

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 научных трудов  
Всероссийской научно-практической  
конференции молодых ученых

24–26 мая 2022 года

Под редакцией  
доктора технических наук, профессора *А. А. Поповича*,  
доктора технических наук, профессора *Д. П. Гасюка*



**ПОЛИТЕХ-ПРЕСС**

Санкт-Петербургский  
политехнический университет  
Петра Великого

Санкт-Петербург

2022

УДК 621(063)  
ББК 34я431  
И57

**Рецензенты:**

Доктор технических наук, профессор, профессор кафедры технологии и производства артиллерийского вооружения Балтийского государственного технического университета «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова *Д. В. Васильков*  
Доктор технических наук, профессор,  
профессор Высшей школы автоматизации и робототехники  
Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого *А. Н. Волков*

**Инновационные идеи в машиностроении** : сборник научных трудов Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых, 24–26 мая 2022 г. / под ред. д-ра техн. наук, проф. А. А. Поповича, д-ра техн. наук, проф. Д. П. Гасюка. – СПб. : ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2022. – 618 с.

В сборнике научных трудов Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых «Инновационные идеи в машиностроении» размещены в авторской редакции 120 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», «Перспективные материалы и технологии».

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.

Ответственный за выпуск – кандидат технических наук *В. Г. Теплухин*

Компьютерная верстка *Е. А. Хлопкова*

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

- © Попович А. А., Гасюк Д. П.,  
научное редактирование, 2022
- © Санкт-Петербургский политехнический  
университет Петра Великого, 2022

ISBN 978-5-7422-7771-2

Уважаемые коллеги! Молодые ученые и начинающие исследователи!

Мы рады приветствовать Вас в городе Санкт-Петербург на Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых «Инновационные идеи в машиностроении». Наша конференция проводится впервые и предоставляет возможность молодым ученым и исследователям получить опыт публичных выступлений, обменяться результатами своих научных исследований, установить научные связи между разными научными школами, регионами.

Тематика конференции охватывает широкий круг актуальных направлений машиностроения, машиноведения и материаловедения, практического использования научных результатов. Конференция вызывает большой интерес со стороны молодых ученых и представителей промышленности. На конференции представлено более 100 докладов ученых из России, Беларуси, Донецкой народной республики, Китая, Узбекистана. Организатором проведения конференции выступает Высшая школа машиностроения, Институт машиностроения, материалов и транспорта, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург.

Дорогие участники конференции! От имени Организационного и Программного комитетов желаем вам успешной продуктивной работы, налаживания новых научных и творческих связей.

Председатель Организационного 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

## **ОСОБЕННОСТИ И НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ СИСТЕМЫ ПОДГОТОВКИ СПЕЦИАЛИСТОВ В ОБЛАСТИ МАШИНОСТРОЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ИМПОРТОЗАМЕЩЕНИЯ И ЦИФРОВИЗАЦИИ ЭКОНОМИКИ РОССИИ**

В сложившихся условиях, с развитием рыночной экономики и изменениями во внешнеполитической обстановке произошли принципиальные перемены. Как следствие, изменились *внутренняя* и *внешняя среда* хозяйственной деятельности отечественных предприятий машиностроения.

Во *внутренней среде*, прежде всего:

- изменилось и развивается законодательство, отражающее особенности рыночной экономики;
- организационно-правовые формы и нормативы, регулирующие производственную и хозяйственную деятельность предприятий;
- осуществляется перестройка не только хозяйственного механизма, но и внутрипроизводственных отношений.

**Особенности современных условий** ведения производственной и хозяйственной деятельности отечественных предприятий, прежде всего, определились изменениями социально-экономических условий, произошедших в начале 90-х годов прошлого столетия, к которым следует отнести следующие основные изменения:

- **расслоение собственности** и приобретение **частной собственностью** определяющего статуса;
- **приобретение** российскими предприятиями **самостоятельности** и **независимости в выборе основных видов** производственной и хозяйственной деятельности;
- **изменение юридических и экономических основ управления** выбранными производственной и хозяйственной видами деятельности, **приобретение предприятиями юридического статуса** и **ориентация на потребителя**;
- **расширение спектра решаемых руководителем предприятия задач**, сопровождаемое объективной необходимостью внедрения международной практики управления предприятием, основанной на реализации научных **принципов менеджмента**.

Зарождение и развитие **частной собственности** потребовало коренной перестройки всего механизма управления экономикой России.

**Во-первых**, в существенной степени **был утрачен опыт** отечественными производителями **управления предприятием на основе частной собственности**. Потребовалось:

- формирование принципиально новой мотивации персонала частных предприятий;
- поиск новых форм и способов выстраивания отношений с партнерами, поставщиками и заказчиками;

- поиск новых форм и способов подбора и расстановки кадров;
- освоение и развитие основ предпринимательской деятельности.

В основе формирования мотивации персонала был положен процесс распределения полномочий и ответственности, формирования персональной заинтересованности в результатах своего труда.

**Переход от коллективной к персональной ответственности каждого** за результаты своей профессиональной деятельности.

**Во-вторых**, возникла объективная необходимость юридического подтверждения отношений с партнерами, поставщиками и заказчиками.

В основе данных отношений было положено **юридическое закрепление прав и ответственности предприятия** за свои обязательства перед заказчиками, поставщиками и партнерами.

Достаточно сложной задачей на первом этапе процедуры юридического закрепления была **задача идентификации** всех зародившихся частных предприятий, состоявшая в формировании их реестра и регистрации по соответствующим признакам. Было принято решение формирования государственного реестра регистрации данных предприятий по их наименованию, адресу пребывания и банковским реквизитам.

Данная процедура регистрации частных предприятий **приобрела статус юридической регистрации**, сопровождаемой формированием предприятий как **юридических лиц**. Принятый порядок регистрации был распространен и на предприятия других форм собственности.

С момента приобретения предприятиями статуса юридических лиц отношения с заказчиками, поставщиками и партнерами стали выстраиваться как отношения между юридическими лицами **на основе взаимного письменного обмена условий договоренности**, прав и ответственности друг перед другом с указанием признаков юридического лица **в виде контракта (договора)**. Наличие данного документа позволило, при необходимости, привлекать третичное лицо для разрешения разногласий.

Для реализации данной процедуры была разработана и принята соответствующая законодательная база. Приобретение предприятиями статуса юридических лиц на законном основании позволило предприятиям **самостоятельно и независимо выбирать виды производственной и хозяйственной деятельности**.

В свою очередь, данная процедура обеспечила расширение поля предложений по одним и тем же видам деятельности различных предприятий, что закономерно породило первые признаки **конкурентного отбора исполнителя** того или иного вида деятельности. Причём, конкурентный отбор был положен в основу взаимоотношений между заказчиком и исполнителем заказа.

**В-третьих**, участие в конкурентном отборе, в условиях участия нескольких претендентов на выполнение одной и той же работы, объективно потребовалось подтверждение способности предприятия справиться с данной работой перед заказчиком.

Зародилась конкурентная среда, оказавшая существенное влияние на изменение приоритетов во взглядах на мотивацию производственной и хозяйственной деятельности предприятий, на определяющую роль заказчика в этой деятельности.

**Определяющим мотивом деятельности предприятий стало мнение заказчика**. Зародилась объективная необходимость научного подхода в изучении его психологии, нужд и потребностей.

**Была выявлена первопричина зарождения любого производства.**

Производство стало рассматриваться как **единственный способ удовлетворения нужды (потребности) заказчика. Основным мотивом поведения предприятия** стал принцип **«Ориентации на интересы потребителя»**.

Потребитель стал центром внимания у предприятий в условиях развивающейся рыночной экономики, что в свою очередь, определило существенные перемены в самом характере процесса производства.

**Основной особенностью производственной и хозяйственной деятельности предприятия** стало **позаказное производство**, отражающее определяющий приоритет – существующие и предполагаемые потребности заказчика, максимальное удовлетворение его потребностей.

В данных условиях стремление добиться многократного использования отлаженного и освоенного производства продукции становится не актуальным.

Реализация принципа **«Ориентации на потребителя»** объективно требует от производителя **быть готовым оперативно перестраивать технологическое наполнение производства от заказа к заказу**, чтобы привлечь внимание потребителя, обеспечить конкурентоспособность производственной деятельности.

В условиях конкуренции необходимо, чтобы каждый работник предприятия понимал существенное значение потребителя в успехе предприятия.

При данном отношении к потребителю **зарождается принципиально новый мотив организации производственной и хозяйственной деятельности предприятия**, основным содержанием которого становится, в конечном итоге, стремление путем **своевременного и качественного удовлетворения потребностей заказчика достичь экономической цели – извлечь прибыль**, что составляет экономическую основу предпринимательской деятельности любой коммерческой организации.

**В-четвертых**, стремление своевременно и качественно удовлетворить потребности заказчика порождают необходимость поиска новых приемов и способов организации производственного процесса его технологической подготовки, основанного в соответствии со сложившимися за долгие десятилетия взглядами на выполнении огромного количества трудоемких процессов в соответствии с требованиями существующих на тот период времени нормативно-правовых и нормативно-технических документов.

Требуются более динамичные приемы и способы планирования и организации производственного процесса, которые позволяли бы **существенно сократить временные ресурсы на конструкторскую и технологическую подготовки производства от заказа к заказу**.

Объективно возникает необходимость **перехода от последовательной схемы к параллельной схеме подготовки производства**.

Реализация такой схемы может привести к стиранию условных границ стадий жизненного цикла продукции, т.к. в условиях стадии жизненного цикла «Проектирования и разработка» требуется принципиальное решение вопросов опытного производства, а в условиях стадии жизненного цикла «Производство» - решение вопросов опытной эксплуатации.

Данный подход позволяет оперативно учесть все большее сокращение продолжительности жизненного цикла в связи с положительной динамикой растущих потребностей заказчика.

**Особенностью данного подхода** в планировании и организации производственного процесса является концентрация существенных ресурсов в ограниченных временных интервалах времени, которых не всегда достаточно у развивающихся частных предприятий.

Появилась объективная потребность поиска новых форм объединений усилий отдельными предприятиями для достижения взаимных интересов, новых форм управления объединенными ресурсами. К таким относятся **объединения в корпорации, холдинги, консорциумы**.

Наиболее актуальной формой управления в процессе реализации нововведений становится **проектное управление**.

Существенными изменениями *внешней среды*, проявляющейся, прежде всего, в проведении западным миром **санкционной политики** в отношении экономики России, что определило объективную необходимость проведения **технической политики импортозамещения**.

Курс на **импортозамещение** декларируется в России с 2014 года, после введения санкций странами Запада [1].

Сущность **импортозамещения** состоит **в замещении импорта товарами, произведёнными внутри России**.

Наиболее зависимыми от импортного сырья и комплектующих оказались такие отрасли, как:

- сельское хозяйство;
- **машиностроение**;
- сфера информационных технологий.

Доля импорта для данных отраслей **составляла к 2014 году до 90 %** при производстве отдельных видов продукции.

Данные перемены должны учитываться при решении конкретных вопросов планирования и организации производства машиностроения.

В настоящее время **машиностроение России** представляет собой комплекс отраслей промышленности, а также интеллектуальный потенциал работников машиностроительной отрасли, изготавливающих:

- средства производства;
- транспорт;
- предметы потребления;
- **оборонную технику**.

В соответствии с положениями концепции развития машиностроения в России на период до 2025 года [2], роль и значение **машиностроения** определяется, прежде всего, тем, что **это базовая отрасль экономики страны**, тесно взаимосвязанная с ведущими отраслями экономики и обеспечивающая их устойчивое функционирование, наполнение потребительского рынка, и являющаяся основой развития технологического ядра промышленности.

В концепции развития машиностроения на период до 2025 года [2] отмечено, «... что сложившиеся в машиностроении за переходный период проблемы и факторы, препятствующие его развитию, носят не частный, локальный характер, а представляют собой, общую взаимосвязанную и взаимообусловленную систему».

На уровне машиностроительных предприятий к числу **основных из них следует отнести:**

- **критический моральный и физический износ оборудования и технологий;**

- **острый дефицит квалифицированных кадров в следствии падения престижа инженерно-технических и рабочих специальностей, обострения социальных проблем;**

- **слаборазвитую систему менеджмента качества (несоответствие международным стандартам качества, включая систему контроля, техническое регулирование, культуру производства);**

- **недостаточно развитую систему сервиса и технической поддержки выпускаемой продукции в течение всего жизненного цикла изделия...»**

**Стратегической целью России** является переход в обозримом будущем в число высокоразвитых стран, опирающихся на постиндустриальную материально-техническую базу.

Исходя из этого, в качестве реальных **долгосрочных целей считать:**

- **в период до 2025 года** - выход на траекторию постиндустриального развития на основе **пятого технологического уклада** с одновременным формированием и развитием наиболее эффективных направлений **шестого технологического уклада**.

**Пятый технологический уклад (1970-2010 гг.)** охватывает:

- технологии, используемые в микроэлектронной промышленности, вычислительной, оптико-волоконной технике, программном обеспечении, телекоммуникациях, роботостроении, при производстве и переработке газа, оказании информационных услуг;

- технологии, используемые в производстве, основанном на использовании биотехнологий, космической технике, химии новых материалов с заданными свойствами.

**Шестой технологический уклад** – это социально-экономическая модель жизни (формация), которая сменит современный мир (постиндустриальное общество Пятого технологического уклада).

Природа того или иного технологического уклада определяется доминирующей в нём технологией (ядром), появившейся в предыдущем технологическом укладе как инновационная технология.

Ядром **шестого технологического уклада** станут нанотехнологии, альтернативная энергетика, биология и медицина, когнитивные технологии, цифровизация экономики и ряд других.

Приоритетным направлением развития машиностроения является внедрение **информационных технологий, цифровизация производства машиностроения**. В этот период машиностроение должно развиваться более умеренными и стабильными темпами по сравнению с предыдущим периодом (2,3-2,5 раза против 1,6-2 раза роста ВВП России в целом). Указанные темпы роста производства в машиностроении позволят довести его доли до 27-30% в промышленности и до 17-20% в ВВПи позволят:

- **преодолеть последствия санкционной политики** западных стран;

- **обеспечить развитие отечественного машиностроения путём обновления оборудования во всех отраслях экономики каждые 7-10 лет.**

Проведенный анализ особенностей состояния и развития отечественного машиностроения позволяет утверждать, что основным объектом внимания для ВУЗов России в современных условиях становится **компетентность персонала** отечественных промышленных предприятий.



Это вызвано прежде всего тем, что *в основе концепции экономического развития России* положена объективная необходимость перенесения акцента на *инженерное образование*.

**Компетентность** административно-управленческого персонала предприятия **формируется путем формирования системы знаний в процессе обучения в ВУЗе** и формирования умений в процессе деятельности в соответствующей области профессиональной деятельности.

С переходом системы высшего профессионального образования на двух уровневую подготовку в соответствии с образовательными стандартами третьего поколения **необходимо учитывать особенности преобразования хозяйственного механизма России**, систем управления предприятиями на основе рыночных подходов, а также требования основных документов, регламентирующих развитие машиностроения, таких как:

- **Государственной комплексной программы развития машиностроительного комплекса России на период до 2025 года** [2].

- **Концепция развития национальной системы стандартизации на период до 2027 года** [3].

Существенно возросла роль международных стандартов в области декларирования требований к продукции, а также способов подтверждения состоятельности предприятий в выполнении требований заказчика.

На территории Российской Федерации была признана и законодательно закреплена **процедура сертификации** как единственный способ подтверждения соответствия систем менеджмента предприятий требованиям стандартов.

Была введена **процедура аутентичного перевода международных стандартов**, изменен статус **государственных стандартов на национальные стандарты**.

В период времени с начала 2000-х тысячных годов началась активная процедура актуализации национальной системы стандартизации подтверждение этому является выход в свет **ФЗ №162 от 29 июня 2015 года «О стандартизации в Российской Федерации»** [4].

Основное внимание при изучении зарубежного опыта стандартизации привлекли стандарты международной организации по стандартизации **семейства ИСО серии 9000**.

**Особенностью данных стандартов** для российских предприятий является то, что они отражают и раскрывают содержание основных принципов менеджмента организаций:

- ГОСТ Р ИСО 9000-2015 Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь [5];

- ГОСТ Р ИСО 9001-2015 Системы менеджмента качества. Требования [6].

Существенной особенностью в формировании новых нормативно-технических документов является введение **технических регламентов**, как документов, содержащих требования, подлежащие обязательному выполнению.

В первую очередь, данные требования связаны с **безопасностью производства, персонала и экологией**.

Введение выше приведенных новых документов в области нормативно-правовой и нормативно-технической основы производственной и хозяйственной деятельности предприятий потребовали пересмотра существующих подходов к

подготовке потенциальных руководителей промышленных предприятий и, в первую очередь, **к уровню их компетентности.**

Правительством России, о чём отмечено в **концепции развития машиностроения на период до 2025 года** [3], был принят ряд решений, в том числе:

- обеспечить создание эффективной **комплексной системы целевой подготовки и переподготовки высококвалифицированных кадров машиностроительной отрасли**, отвечающей современным требованиям;

- **создать условия для максимального приближения новых достижений в производстве, технологиях, станочном оборудовании и машиностроительной продукции к процессам обучения**, путем организации коллективных с втузами инновационных центров пользования на территории предприятий и объединенных кафедр в технических университетах.

Данные **тенденции развития инженерного образования в России** уже нашли свое отражения в **новой системе образования в высшей школе** в целом:

- введена многоуровневая система образования;

- в соответствии с **приказом Минобрнауки РФ № 89 от 1 февраля 2022 года** [7] утверждены и вводятся в действие новые специальности и направления подготовки, в том числе, и специалистов машиностроения по кодам укрупнённых групп: **21 «Машиностроение»** и **22 «Управление в технических системах»**;

- разработаны и определены области и виды профессиональной деятельности;

- разработаны требования к результатам освоения основных образовательных программ на основе определения **профессиональных компетенций в соответствии с профессиональными стандартами.**

В соответствии с **концепцией развития национальной системы стандартизации на период до 2027 года** [3] для решения этих задач необходимо:

- актуализировать или **ввести** в образовательных учреждениях высшего образования инженерного и экономического профиля **дисциплины по стандартизации** по соответствующим направлениям подготовки;

- от модели повышения квалификации перейти к модели управлениями знаниями;

- организовать переработку учебников, методических материалов по стандартизации для учреждений высшего образования, которые содержат методологии, отвечающие современному уровню научно - технического развития;

- развивать возможности получения обучающимися в учреждениях высшего образования дополнительного образования в

области стандартизации параллельно с освоением ими основной профессиональной образовательной программы, в том числе, с использованием методов и средств дистанционного образования;

- **обеспечить постоянное взаимодействие Росстандарта в сфере стандартизации с Минобрнауки РФ**, объединениями работодателей, учреждениями высшего образования по актуализации федеральных государственных образовательных стандартов, а также федеральных государственных требований к образовательным программам профессиональной переподготовки специалистов в области стандартизации.

В развитие требований руководящих документов Правительства РФ в ВШМ разработаны образовательные программы такие как:

- **«Управление качеством. Организация управления полным жизненным циклом продукции машиностроения» по направлению 27.04.02;**

**- «Машиностроение. Технологии виртуального инжиниринга» по направлению. 15.04.01.**

Всего несколько вузов России готовят специалистов в области цифровизации экономики.

**Специалист этой области обладает:**

- знаниями о цифровой трансформации;
- умением использовать инновационные технологии в различных сферах деятельности;
- навыками управления цифровым развитием;
- навыками ведения бизнеса в условиях онлайн распространения глобального пространства. Только за последние годы стали реальностью цифровое производство, беспилотные автомобили, криптовалюта.

Наиболее **рациональной схемой формирования системы знаний будущих руководителей предприятий машиностроения** в современных условиях может быть принята следующая:

- **бакалавриат** (по профильной образовательной программе технического ВУЗа);

- **магистратура** (по образовательной программе – производственный менеджмент организаций машиностроения, техника и технологии).

Данная схема подготовки **позволит реализовать участие предприятий в формировании требований к квалификации молодых специалистов, в разработке профессиональных образовательных стандартов** на втором уровне подготовки, тем более по программе создаваемых совместных с вузами инновационных центров пользования на территории предприятий для реализации целевых магистерских программ.

**У предприятий – работодателей появится возможность непосредственного участия в магистерских программах, формировании специалиста с учетом своей специфики и потребности.**

При данном подходе **выигрывают обе стороны:**

**Предприятие-работодатель** получает целевого компетентного специалиста в своей предметной области и преференции от Правительства РФ, участвуя в выполнении **Государственной комплексной программы развития машиностроения России [2].**

**Университет** выполняет поручение Правительства РФ по качественному выполнению образовательных программ и формирует свою востребованность и привлекательность со стороны предприятия-работодателя на основе целей подготовки компетентного профильного специалиста в области машиностроения.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Государственная программы Российской Федерации "Развитие промышленности и повышение ее конкурентоспособности, утверждённая(постановлением правительства Российской Федерации от 15 апреля 2014 г. № 328.

2. Государственная комплексная программа развития машиностроительного комплекса России на период до 2025 года.

3. Концепция развития национальной системы стандартизации на период до 2027 года.

4. ФЗ №162 от 29 июня 2015 года «О стандартизации в Российской Федерации».

5. ГОСТ Р ИСО 9000-2015 Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь.

6. ГОСТ Р ИСО 9001-2015 Системы менеджмента качества. Требования.

7. Приказ Минобрнауки РФ № 89 от 1 февраля 2022 года "Об утверждении перечня специальностей и направлений подготовки высшего образования по программе бакалавриата, программам специалитета, программам магистратуры, программам ординатуры и программам ассистентуры-стажировки".

# Технология машиностроения

УДК 621.941.01

Т.А. Ларионова, Е.О. Ларионов  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Санкт-Петербург, Россия, [tsimkoshka@mail.ru](mailto:tsimkoshka@mail.ru)

## ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ РЕЗАНИЯ И ГЕОМЕТРИИ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА НА ПАРАМЕТРЫ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ТОЧЕНИИ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

### Аннотация

В работе представлены результаты научных исследований по определению зависимостей параметров шероховатости поверхности Ra и Rz от режимов резания и геометрии режущего инструмента при токарной обработке титановых сплавов на операциях чистового точения. Приведена методика оценки численных значений параметров шероховатости поверхности.

*Ключевые слова:* шероховатость поверхности, параметры шероховатости Ra и Rz, титановые сплавы, экспериментальная установка, режущий инструмент, радиус при вершине, режимы резания, математическая модель

### Введение

Параметры шероховатости поверхности определяются ГОСТ 2789–73. Качество поверхности зависит от таких факторов как: режимы обработки, геометрия инструмента, износа, обрабатываемого материала и материала инструмента и т.д. [1].

Существует методика предварительной оценки значения параметров шероховатости и влияния на нее параметров режимов резания для обработки традиционных материалов. В методике, разработанной Михайловым С.В. при обработке пластичных материалов максимальная, высота неровностей обработанной поверхности определяется четырьмя составляющими (рисунок 1):

$$Rz = h_1 + h_2 + h_3 + h_4 \quad (1)$$

где  $h_1$  – геометрическая составляющая шероховатости;  $h_2$  – шероховатость, вызванная вибрациями;  $h_3$  – шероховатость, зависящая от пластической деформации в зоне контакта заготовки и инструмента;  $h_4$  – шероховатость режущей кромки инструмента [2].

Величины составляющих шероховатости рассчитываются из схемы формирования неровностей при несвободном резании и геометрического анализа графической модели сечения срезаемого слоя.

Среднеарифметическое отклонение профиля для токарной обработки может быть вычислено по формуле:

$$Ra = 0,25 \cdot Rz \quad (2)$$

Помимо вышеперечисленных факторов, заметное влияние на шероховатость поверхности оказывает явление нароста. В целях избегания такого нежелательного эффекта, возможна обработка при более низких скоростях резания [3-5]. На высоту микронеровностей влияет и интенсивность размерного износа инструмента [6].

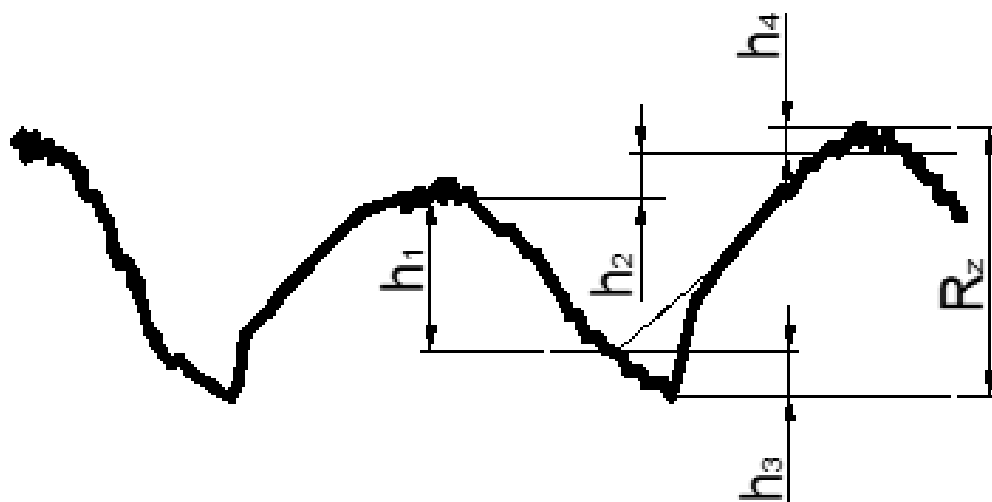


Рисунок 1 – Схема для расчета высоты профиля шероховатости поверхности при точении:  $h_1, h_2, h_3, h_4$  – составляющие шероховатости [2]

Подача оказывает существенное влияние на производительность обработки и параметры шероховатости поверхности. При чистовом точении величину подачи ограничивают из-за требуемой шероховатости поверхности. При работе на малых подачах может наблюдаться значительное расхождение между расчетной высотой неровности и действительной, измеренной на детали. Повышение подачи при неизменной скорости резания ведет к росту температуры в зоне контакта, что влияет на износ инструмента, поэтому приходится уменьшать скорость резания. В противном случае, выявляется недостаток стойкости инструмента [7- 9].

Как показывает практика, существует предел уменьшения высоты неровности за счет снижения подачи, это значит, что при уменьшении подачи ниже некоторого критического значения подачи  $Sk$ , высота микронеровностей практически не изменяется.

Вышеперечисленные рекомендации относятся к обработке заготовок из стали. Рекомендаций по получению требуемой шероховатости поверхности при резании титановых сплавов, как таковых нет, что говорит о необходимости дальнейшего изучения этой проблемы.

## Методы

Для проведения экспериментальных исследований по точению заготовок из титановых сплавов в СПбПУ на кафедре «Технология машиностроения» была разработана и реализована уникальная научная установка –автоматизированный многопараметрический стенд (рисунок 2).

В качестве базы для экспериментальной установки был выбран токарно-винторезный станок модели Knuth Turnado 230/1000 V без использования смазочно-охлаждающей технологической смеси (СОТС).

В составе разработанной установки используются технологические компоненты: 1 – деталь; 2 – тепловизор производственной компании BALTECH TR-01200; 3 – система, измеряющая силы резания; 4 – система, измеряющая температурную деформацию режущего инструмента; 5 – система, измеряющая размерный износ резца; 6 – токарно-винторезный станок Turnado 230/1000V; 7 – системный блок для вторичной обработки информации; 8 – портативный профилометр marsurf PS1; 9 – монитор.

Для измерения значений параметров шероховатости используется компактный портативный цифровой профилометр модели Elcometer 7061 Marsurf PS1. Он может быть использован как в горизонтальном, так и в вертикальном положениях. Включает в себя следующие компоненты: блок обработки данных, цифровой дисплей для вывода обработанной информации, выдвижной стилус с алмазным наконечником диаметром 2 мкм. Профилометр позволяет проводить измерения в процессе производства, на месте непосредственно на детали.

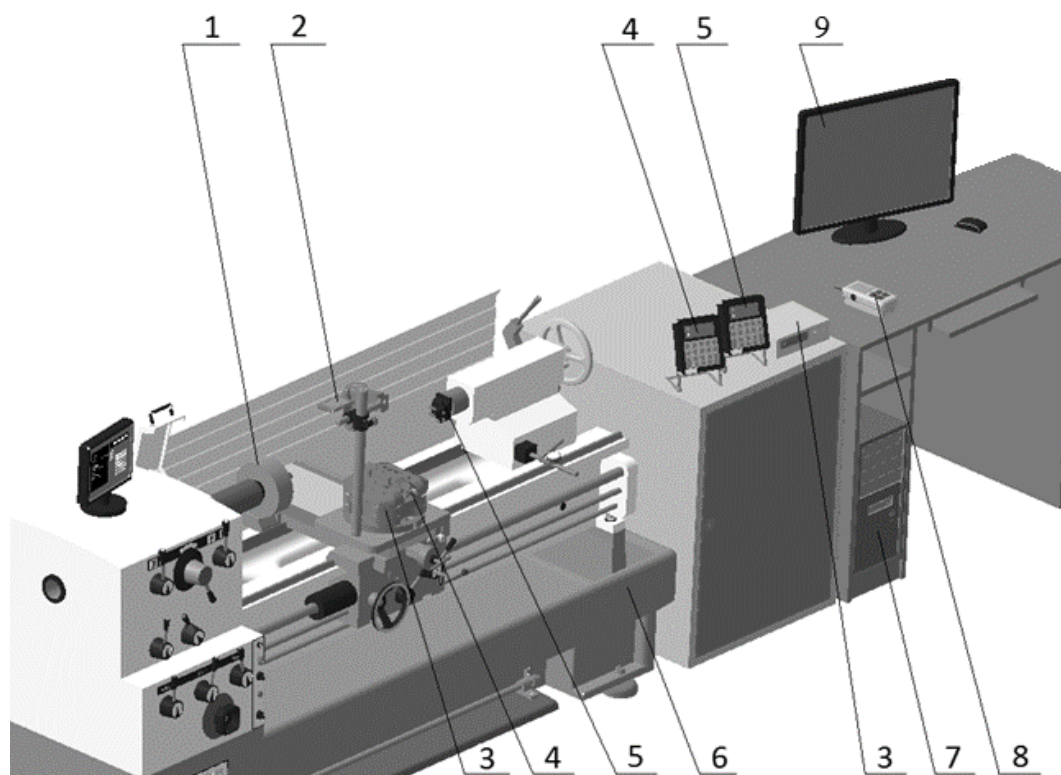


Рисунок 2 – Общий вид экспериментальной установки

Для определения характера зависимостей параметров шероховатости поверхности от режимов резания и геометрии режущего инструмента была разработана методика экспериментальных исследований токарной обработки образцов деталей из титановых сплавов. Экспериментальные исследования проводятся в два этапа: проведение однофакторных экспериментов и многофакторный эксперимент.

### **Результаты и обсуждение**

После проведения серии однофакторных экспериментов по точению заготовок из титанового сплава BT8 при различных режимах резания и геометрии режущего инструмента были получены и построены зависимости параметров шероховатости Ra

и Rz от пути резания L при разных скоростях, разных радиусах при вершине и разных подачах. Некоторые графики представлены на рисунках 3 и 4.

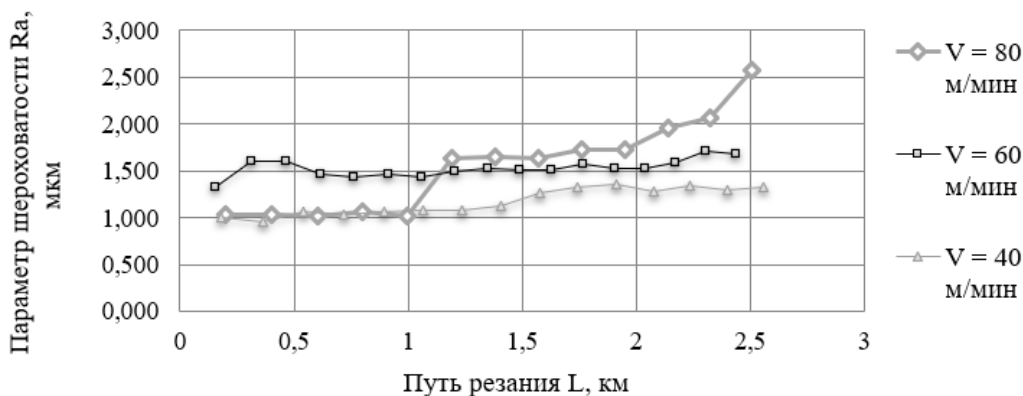


Рисунок 3 – Ra от пути резания при разных скоростях:  
 $s = 0,136$  мм/об,  $R = 0,4$  мм,  $t = 0,5$  мм

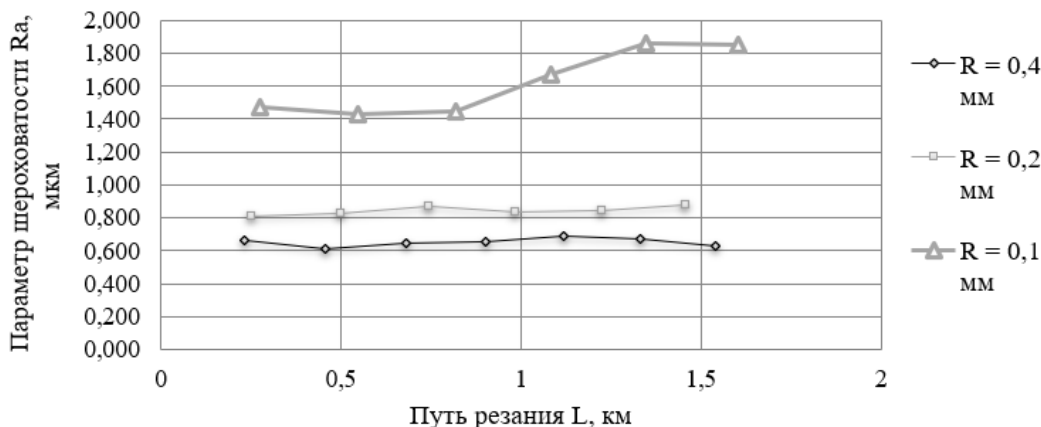


Рисунок 4 – Ra от пути резания при разных радиусах при вершине резца:  
 $s = 0,062$  мм/об,  $V = 60$  м/мин,  $t = 0,5$  мм

По полученным экспериментальным данным построены зависимости параметров шероховатости Ra и Rz от скорости резания V, радиуса при вершине резца R (рисунок 5) и подачи s (рисунок 6).

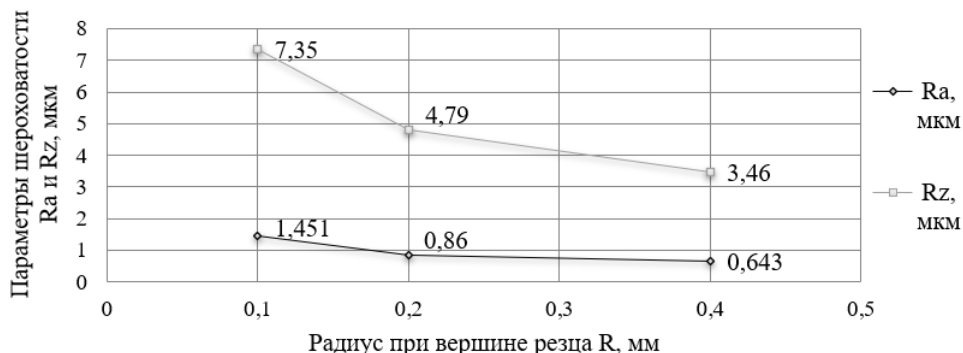


Рисунок 5 – Ra и Rz от радиуса при вершине резца:  
 $s = 0,062$  мм/об,  $V = 60$  м/мин,  $t = 0,5$  мм



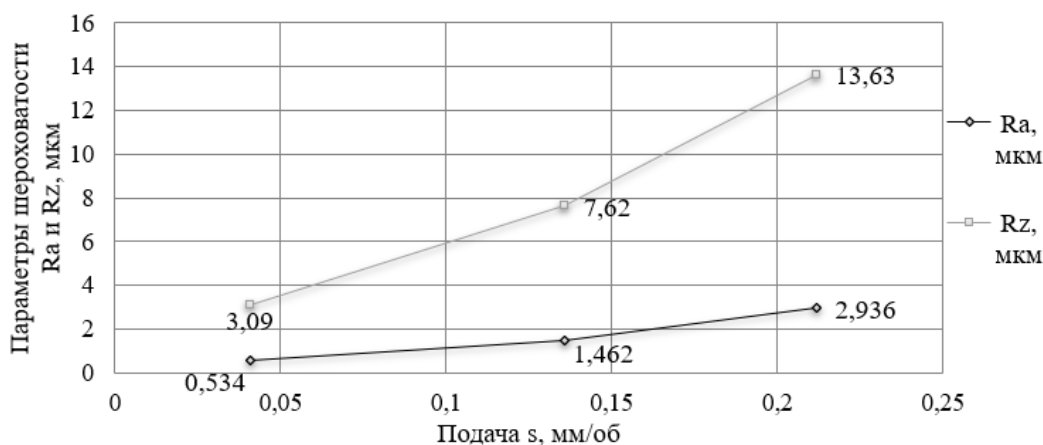


Рисунок 6 – Ra и Rz от подачи: R = 0,4 мм, V = 60 м/мин, t = 0,5 мм

### Заключение

Анализ полученных данных показал, что с увеличением подачи от 0,041 мм/об до 0,212 мм/об параметры шероховатости поверхности: Ra увеличился на 2,4 мкм, Rz увеличился на 10,5 мкм; с увеличением радиуса при вершине с 0,1 мм до 0,4 мм параметры шероховатости поверхности: Ra уменьшился на 0,8 мкм, Rz уменьшился на 3,9 мкм; с увеличением скорости резания с 40 м/мин до 80 м/мин параметры шероховатости поверхности: Ra увеличился на 0,5 мкм, Rz увеличился на 2,9 мкм.

На шероховатость поверхности самое большое влияние оказывает подача. Скорость резания и радиус при вершине влияют в меньшей степени.

Степени зависимости параметров шероховатости от режимов резания и геометрии режущего инструмента выражается формулами:

$$Ra = C_{Ra} V^{aRa} S^{bRa} R^{dRa} \quad (3)$$

$$Rz = C_{Rz} V^{aRz} S^{bRz} R^{dRz} \quad (4)$$

где V – скорость резания, м/мин; S – подача инструмента, мм/об; R – радиус при вершине резца, мм;  $C_{Ra}$ ,  $C_{Rz}$  – коэффициенты, зависящие от материала инструмента;  $aRa$ ,  $aRz$ ,  $bRa$ ,  $bRz$ ,  $dRa$ ,  $dRz$  – показатели степени V, S и R соответственно.

Что бы определить коэффициенты модели, необходимо провести многофакторный эксперимент в диапазоне рекомендованных режимов резания. Значение параметров шероховатости рассчитываются по вышеприведенным формулам с учетом полученных ранее параметров резания. Если величина шероховатости соответствует указанной на чертеже, то параметры резания принимаются как рабочие, если не соответствуют необходимо, либо уменьшать подачу, либо увеличивать радиус при вершине инструмента и снова производить расчет.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Табенкин А.Н., Тарасов С.Б., Степанов С.Н. Шероховатость, волнистость профиль. Международный опыт / Под ред. канд. техн. наук Н. А. Табачниковой. - СПб.: Изд-во Политехн. ун-та. 2007. - 136 с.
2. Михайлов С.В., Ковеленов Н.Ю., Болотских С.В. Технологические условия обеспечения шероховатости поверхности при токарной обработке материалов инструментов с СМП. Станкоинструмент. - 2016. - № 1 (2). - С. 76-79.

3. Ларионова Т.А., Жуков Э.Л., Плавник С.Л. Методы обеспечения заданной шероховатости обрабатываемой поверхности на операциях чистового точения - Современное машиностроение. Наука и образование. - 2016. - № 5. - С. 924-935
4. Технология машиностроения: в двух кн. Учебное пособие для вузов / Э. Л. Жуков, И. И. Козарь, С. Л. Мурашкин и др.; под ред. С. Л. Мурашкина. 3-е изд., доп. - М.: Высш. шк., 2008.
5. Макаров А.Д. Оптимизация процессов резания / А.Д. Макаров. - М.: Машиностроение, 1976. - 278 с.
6. Вульф А.М. Резание металлов. Изд. 2-е. / А.М. Вульф. - Л.: «Машиностроение», 1973. - 496 с.
7. Федотова А.М., Гасюк Д.П. Анализ рисков возникновения проблем с качеством технологической подготовки производства и разработка мероприятий по их снижению в условиях АО "НИИЭФА" // Металлообработка. 2021. № 1 (121). С. 50-54.
8. Макаров А.Д., Волгарев Л.Н. Влияние диаметра и жесткости заготовки на износ резцов и чистоту обработанной поверхности // Тезисы докладов ВНТК "Жесткость в машиностроении" / БИТМ. Брянск, 1971. - С. 226-230.
9. Косова В.А., Гасюк Д.П. К вопросу анализа условий разработки технологических процессов машиностроительных предприятий // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2021. № 2. С. 655-658.

## ОПТИМИЗАЦИЯ ТОКАРНОЙ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ ПО КРИТЕРИЮ НАИМЕНЬШЕЙ СЕБЕСТОИМОСТИ С УЧЕТОМ СТРУЖКОДРОБЛЕНИЯ

### Аннотация

Изложена методика оптимизации токарной обработки пластичных материалов инструментом с СМП по критерию наименьшей технологической себестоимости с учетом получения благоприятной формы стружки. В качестве примера приведен расчет оптимальных режимов резания для продольного точения заготовки из стали 45 токарной пластиной VBMT160404-ММ.

*Ключевые слова:* резание материалов, стружкодробление, оптимизация режимов резания.

В настоящее время для токарной обработки пластичных материалов в основном применяются сборные резцы, оснащенные сменными многогранными пластинами (СМП) с криволинейной стружкозавивающей поверхностью. Сложнопрофильная передняя поверхность пластины позволяет обеспечить стабильность процесса стружкообразования, надежное дробление и удаление из зоны резания стружки. Вместе с тем создание на передней поверхности стружкозавивающих элементов ограничивает диапазон технологических возможностей пластин, что необходимо учитывать при назначении оптимальных условий эксплуатации инструмента. Проблема аналитического расчета режимов резания материалов групп ISOP, M, S с учетом получения благоприятной формы стружки относится к числу актуальных.

Методика назначения обоснованных режимов резания включает выбор критерия оптимизации и поиск оптимальных условий с учетом технических ограничений для операции точения [1, 2]. В качестве критерия оптимизации распространение получил критерий минимальной технологической себестоимости обработки. Его использование позволяет построить технологический процесс с минимальными затратами на оборудование, инструмент, заработную плату рабочего.

Зависимость себестоимости удаления единицы объема припуска от режимов резания имеет вид:

$$C_{y\partial} = \frac{E}{vst} + \frac{(W + ET_{cm})v^{n-1}s^{y_T-1}t^{x_T-1}}{C_T}, \quad (1)$$

где  $E$  – себестоимость эксплуатации оборудования за минуту, руб/мин;

$W$  – затраты, связанные с приобретением, хранением и сменой инструмента, отнесенные к одному периоду стойкости, руб;

$T_{cm}$  – время на снятие изношенного инструмента и подналадку, мин;

$n$ ,  $x_T$ ,  $y_T$ ,  $C_T$  – коэффициенты и показатели степени зависимости стойкости от режимов резания [3].

Для условий однопроходной обработки эту зависимость можно представить в виде функции:

$$C_{y\partial} = f(v, s) \quad (2)$$

В декартовых осях координат зависимость удельной себестоимости от подачи и скорости резания представляет собой поверхность типа оврага, с локальными минимумами в поперечных сечениях. При этом функция (2) абсолютного глобального минимума не имеет. Поэтому оптимальное сочетание режимов резания зависит от технических ограничений операции точения и находятся на их границах.

Критерий оптимальности для функции (2) имеет вид:

$$C_{y\partial} = f(v, s) \rightarrow \min \quad (3)$$

Ограничивающими факторами режимов резания являются кинематические возможности станка, мощность оборудования, устойчивость технологической системы СПИЗ, прочность режущего инструмента, параметры точности, качество поверхностного слоя и др. Важным техническим ограничением режимов резания для токарных операций инструментом с СМП является ограничение по стружкодроблению.

Исследования показывают, что дробление стружки происходит в результате ее распрямления при взаимодействии с препятствиями, возникающими на ее пути. Величина критического радиуса распрямления, при котором происходит ее дробление на элементы, зависит от физико-механических свойств обрабатываемого материала, начального радиуса кривизны, толщины и ширины стружки. Для цилиндрической стружки величина критического радиуса кривизны равна:

$$R_{кр} = 0,5a_2 + \left( \frac{1 + \sigma_T / E}{R_0 - 0,5a_2} - \frac{\sigma_T}{0,5a_2 E (0,086 - 0,11\delta)} \right)^{-1} \quad (4)$$

где  $a_2$  – толщина стружки;

$R_0$  – наружный радиус кривизны винтовой стружки;

$E, \sigma_T$  – модуль упругости и предел текучести материала стружки;

$\delta$  – относительное остаточное удлинение при разрыве.

Толщина стружки связана с подачей по формуле:

$$a_2 = k_a s \sin \phi, \quad (5)$$

где  $k_a$  – коэффициент утолщения стружки,

$\phi$  – главный угол в плане.

Условие надежного стружкодробления может быть представлено в виде следующего ограничения:

$$R_{кр} \leq C_R R_0 \quad (6)$$

где  $C_R$  – коэффициент, учитывающий специфические условия обработки (СОЖ, износостойкие покрытия и др).

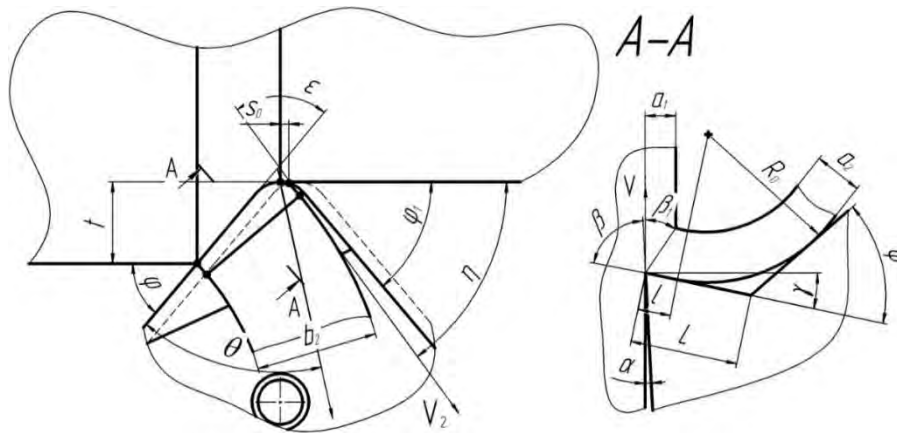


Рисунок 1 – Схема резания сборным резцом с СМП

Радиус кривизны стружки  $R_0$  в момент ее схода зависит от формы стружкозавивающих элементов пластины. Например, для схемы, показанной на рисунке 1.

$$R_0 = \frac{(L - l_k)}{\operatorname{tg}(\psi / 2)}, \quad (7)$$

где  $L$ ,  $\psi$  – параметры геометрии стружкозавивающей поверхности;

$l_k$  - длина контакта стружки с передней поверхностью пластины.

Аналитическая зависимость длины контакта от режимов процесса точения дана в работе [3].

Решая систему выражений (1–7) относительно режимов резания получим ограничение по стружкодроблению:

$$v, s \geq f(E, \sigma_T, \delta, \gamma, \varphi, L, \psi, k_a) \quad (8)$$

Вторым ограничением использования инструментов со стружкозавивающей поверхностью является ограничение по максимально допустимым подаче и скорости резания для выбранной геометрии передней поверхности пластины. Это ограничение связано с определением условий благоприятного стружкообразования, не вызывающего резкого увеличения сил резания. Предельное минимальное значение радиуса естественного завивания стружки, начиная с которого наблюдается рост сил резания, соответствует наиболее энергетически эффективным условиям резания:

$$R_{\text{opt}} = 0,0357 a_1 \left( \frac{1 + \operatorname{tg} \beta_1 \cdot \operatorname{tg} \gamma}{\operatorname{tg} \beta_1 - \operatorname{tg} \gamma} \right)^{3,46} \exp\left( \frac{5,87(\operatorname{tg} \beta_1 - \operatorname{tg} \gamma)}{1 + \operatorname{tg} \beta_1 \cdot \operatorname{tg} \gamma} \right), \quad (9)$$

где  $\operatorname{tg} \beta_1$  – угол наклона условной плоскости сдвига,

$\gamma$  - передний угол,

$a_1$  - толщина срезаемого слоя.

Угол наклона условной плоскости сдвига можно рассчитать через коэффициент утолщения стружки  $k_a = \frac{\cos \gamma + \operatorname{tg} \beta_1 \sin \gamma}{\operatorname{tg} \beta_1}$ , связанный с тангенциальной составляющей силы резания по формуле:

$$k_a = \left( \frac{P_z}{0,8\sigma_b st} - 1 \right) \cos \gamma + \sin \gamma \quad (10)$$

где  $\sigma_b$  – предел прочности обрабатываемого материала при растяжении.

После несложных преобразований получим расчетное выражение для определения  $\operatorname{tg} \beta_1$  от режимов обработки:

$$\operatorname{tg} \beta_1 = \frac{0,8\sigma_b}{10C_{Pz} v^{n_{Pz}} s^{y_{Pz}-1} t^{x_{Pz}-1} - 0,8\sigma_b} \quad (11)$$

Таким образом, через эмпирическую зависимость силы резания от режимов обработки [3] можно установить зависимость предельно допустимых условий благоприятного стружкообразования от скорости резания и подачи.

Оптимальный радиус кривизны  $R_{\text{опт}}$  соответствует минимальным силам резания и может быть интерпретирован как минимально рекомендуемый радиус завивания стружки. При дальнейшем уменьшении радиуса кривизны стружки за счет стружкозавивающих элементов происходит увеличение сил и мощности резания. В соответствие с этим ограничение по оптимальному радиусу кривизны стружки можно записать в следующей форме:

$$R_{\text{опт}} \leq R_0 \quad (12)$$

После подстановки уравнений (7,9,11) в неравенство (12) получим модель ограничения режимов резания по обеспечению условий благоприятного стружкообразования.

В качестве примера приведен расчет задачи оптимизации по минимальной себестоимости для токарной пластины VВМТ160404-ММ при условиях продольного течения заготовки марки сталь 45 на станке 16К20. Приняты следующие экономические характеристики:  $E=10$  руб/мин;  $W=125$  руб;  $T_{\text{см}}=3$  мин; параметры оборудования: диапазон подач станка – 0,07 - 4,16 мм/об; диапазон частоты вращения станка – 12,5-2000 об/мин; мощность главного привода – 10 кВт; КПД – 0,8; жесткость станка – 12000 Н/мм; требования по качеству обработки: допуск радиального биения  $\Delta_{\text{дон.дет}}=0,07$  мм,  $\Delta_{\text{дон.заг}}=0,8$  мм. Оптимизация выполнена для глубин резания: 0,5 мм, 1,0 мм, 1,5 мм.

Ограничение по мощности оборудования рассчитывалось по формуле:

$$v^{n_{Pz}+1} s^{y_{Pz}} \leq \frac{6120N_{\text{дв.эт}}\eta}{C_{Pz} t^{x_{Pz}}}, \quad (13)$$

где  $N_{\text{дв.эл}}$  – мощность двигателя главного движения,  
 $\eta$  - КПД;

$n_{Pz}$ ,  $x_{Pz}$ ,  $y_{Pz}$ ,  $C_{Pz}$  - коэффициенты и показатели степени  $Pz$  составляющей силы резания, согласно [3].

Ограничение по прочности твердосплавной пластины:

$$v^{n_{Pz}} S^{y_{Pz}} \leq \frac{34q^{1.35} \left(\frac{\sin 60}{\sin \varphi}\right)^{0.8}}{C_{Pz} t^{x_{Pz}-0.17}}, \quad (14)$$

где  $q$  – толщина пластины,  
 $\varphi$  - главный угол в плане,

$n_{Pz}$ ,  $x_{Pz}$ ,  $y_{Pz}$ ,  $C_{Pz}$  - коэффициенты и показатели степени  $Pz$  составляющей силы резания.

Ограничение режимов резания по допустимому биению детали:

$$v^{n_{Py}} S^{y_{Py}} \leq \frac{\Delta_{\text{доп.дет}} j_{\text{стан}}}{10 C_{Py} \Delta_{\text{доп.заг}}}, \quad (15)$$

где  $\Delta_{\text{доп.дет}}$  – радиальное биение детали,

$\Delta_{\text{доп.заг}}$  - радиальное биение заготовки,

$j_{\text{стан}}$  - жесткость станка;

$n_{Py}$ ,  $x_{Py}$ ,  $y_{Py}$ ,  $C_{Py}$  - коэффициенты и показатели степени  $Py$  составляющей силы резания, согласно [4].

Графоаналитическое решение задачи оптимизации режимов резания с учетом получения благоприятной дробленой стружки представлено на рисунке 2.

Анализ результатов расчета позволяет выбрать технически обоснованные режимы резания при использовании сборного инструмента с СМП.

### Заключение

Разработана методика оптимизации технологического процесса токарной обработки материалов, позволяющая прогнозировать и назначать наиболее эффективные условия резания с учетом получения благоприятной формы стружки.

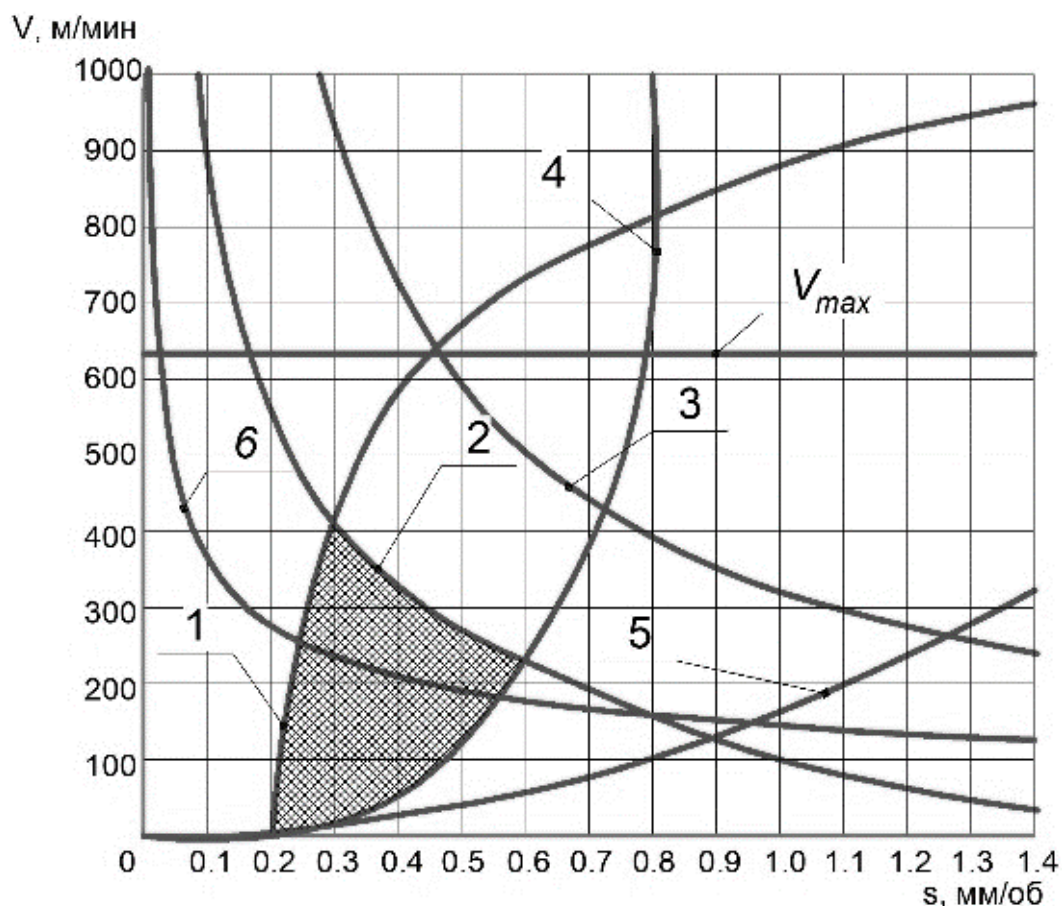


Рисунок 2 – Блокирующий контур допустимых режимов резания ( $v, s$ ) и линия локальных минимумов себестоимости при глубине резания 1,5 мм: 1 – ограничение по дроблению стружки, 2 – ограничение по оптимальному радиусу кривизны стружки, 3 – ограничение по мощности оборудования, 4 – ограничение по прочности пластины, 5 – ограничение по допускаемому биению, 6 – функция локальных минимумов удельной себестоимости,  $v_{max}$  – кинематическое ограничение по скорости резания

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федотова А.М., Гасюк Д.П. Анализ рисков возникновения проблем с качеством технологической подготовки производства и разработка мероприятий по их снижению в условиях АО "НИИЭФА" // *Металлообработка*. 2021. № 1 (121). С. 50-54.
2. Косова В.А., Гасюк Д.П.К вопросу анализа условий разработки технологических процессов машиностроительных предприятий // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2021. № 2. С. 655-658.
3. Справочник технолога-машиностроителя: в 2-х т. /под ред. А. Г. Косиловой. – М.: Машиностроение, 1972.
4. Михайлов, С. В. Компьютерное прогнозирование и системный анализ причинно-следственных связей процессов образования, завивания и дробления сливной стружки / С. В. Михайлов. – Кострома: изд-во Костром. гос. технол. ун-та, 2009. – 159 с.



А.В. Петров, С.Н. Степанов, С.С. Степанов  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Санкт-Петербург, Россия, [apetrov@spbstu.ru](mailto:apetrov@spbstu.ru)

## РАЗРАБОТКА МОДУЛЯ ДЛЯ РАСПОЗНАВАНИЯ ПОЛОЖЕНИЯ СТРЕЛКИ ИНДИКАТОРОВ ЧАСОВОГО ТИПА

### **Аннотация**

Описана особенность работы прибора для автоматической поверки индикаторов часового типа. Представлен модуль распознавания положения стрелки индикатора часового типа ИЧ-10 [1]. Подробно рассмотрен алгоритм распознавания и определения положения стрелки по шкале индикатора. Представлены результаты исследований, которые отображены на графике и сделаны выводы о дальнейших шагах по работе с модулем распознавания.

*Ключевые слова:* поверка, индикатор, машинное зрение, погрешность, распознавание.

### **Введение**

Ведущие иностранные производители для поверки и калибровки индикаторов и головок выпускают полностью автоматизированные приборы, стоимость которых высока, поэтому они недоступны для многих отечественных предприятий. В России такие приборы не производят, но потребность в них есть. Индикаторы используют массово, их поверка производится в ручном режиме, требует высокой квалификации и точности [2].

Чтобы повысить доступность измерительного оборудования для предприятий, предложена разработка автоматизированного инструмента на базе прибора для поверки индикаторов ППИ-50 [3]. Автоматизация состоит в двух действиях – это автоматическое перемещение штока с помощью сервопривода и считывание показаний со шкалы поверяемого индикатора с помощью так называемого «машинного зрения». Машинное зрение – это применение компьютерного зрения для промышленности и производства. В нашем случае для контроля положения стрелки индикатора.

Во время автоматической поверки показания снимаются со шкалы индикатора с помощью камеры и расшифровываются специальным модулем распознавания [4]. Окно с полученными значениями модуля распознавания показано на рис. 1а. Модуль распознавания относится к машинному зрению и основывается на специальном алгоритме, который позволяет считывать значения со шкал различных индикаторов часового типа. Алгоритм основан на определении угла между начальным и конечным положениями стрелки и пересчете полученного значения (ф. 1) в микрометры.

Порядок действий состоит из двух частей: подготовительной и измерительной.

Подготовительная часть запускается в начале процесса измерения для выполнения разовых и наиболее ресурсоемких операций:

- получение (из базы данных) численного значения диапазона измерений в пределах одного оборота  $N_R$ ;

- поиск на кадре окружности максимального размера, диаметр которой будет лежать на границе между шкалой и корпусом индикатора. По нему определяются координаты центра шкалы и радиус окружности  $R_I$  (рис. 1б).

- на изображении по координатам центра шкалы прибора выделяется круговая область стрелки и определяются координаты ее центра вращения  $P_{CA}$ .

- по начальному положению стрелки определяется угол смещения нулевого положения стрелки от вертикали на изображении камеры –  $\alpha_{A0}$ .

- на изображении прибора относительно  $P_{CA}$  определяется окружность максимального радиуса  $R_M$  (рис. 1б), в которой минимум точек черного цвета (минимальное количество или отсутствие надписей и штрихов на шкале). Именно по этой окружности в измерительной части будет выполняться предварительный поиск положения стрелки прибора. Также в этой области определяется ширина стрелки  $L_{AI}$ . Шириной стрелки будет хорда, проходящая через дугу, которая образована пересечением стрелки и окружности.

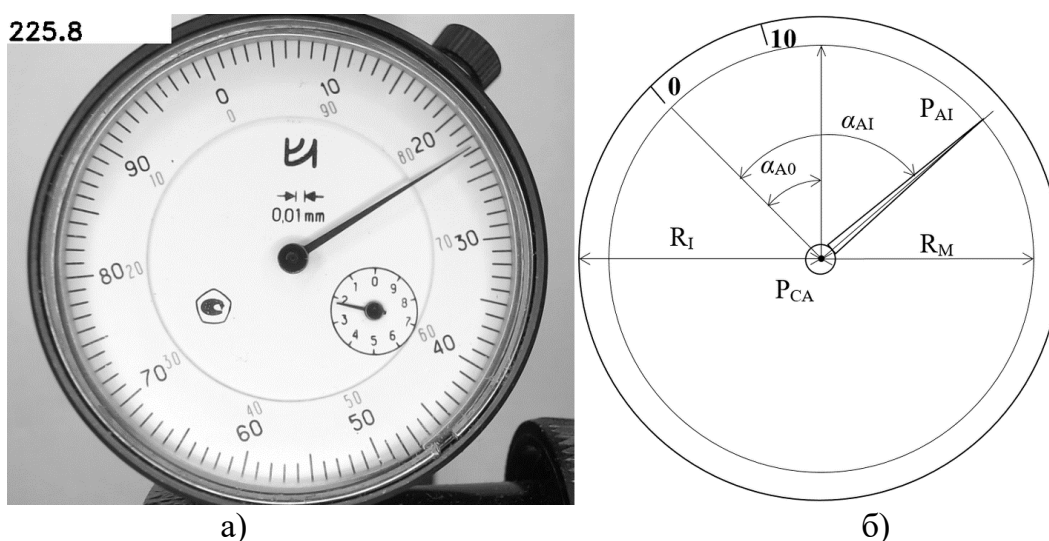


Рисунок 1 – а – окно модуля с результатом распознавания шкалы, б– расположение основных измеряемых параметров прибора

Вторая часть – измерительная, выполняется для каждого кадра с камеры в реальном времени. Она содержит следующие операции:

- поиск дуг на пересечении стрелки и окружности с радиусом  $R_M$ . Из найденных дуг выделяется та, которая максимально приближена к ширине стрелки  $L_{AI}$ . Находятся координаты середины этой дуги – середины стрелки  $P_{AI}$ .

- по координатам положения стрелки  $P_{AI}$  и координатам центра вращения стрелки  $P_{CA}$  строится линия и определяется угол ее наклона – угол наклона стрелки  $\alpha_{AT}$ .

- вычисляются показания прибора по формуле 1:

$$X = \frac{N_R}{360^\circ} \cdot (\alpha_{AI} - \alpha_{A0}) \quad (1)$$

Минимальная погрешность индикатора часового типа составляет  $3 \mu\text{m}$  [5]. Для обеспечения такой погрешности нам достаточно чтобы алгоритм распознавал значения с точностью до  $0,5 \mu\text{m}$ .

В алгоритме распознавания координаты положения стрелки  $P_{AI}$  находятся на окружности с радиусом  $R_M$ . Эти координаты могут определяться с точностью 1 пиксель. Для оценки разрешающей способности (точности) нужна длина окружности с максимальным радиусом  $C=2\pi R$ , рассчитанная в пикселях. Чем выше разрешение, тем точнее можно определить положение стрелки. Например, при разрешении камеры 4K ( $4096 \times 3072$ ) максимальная окружность будет иметь радиус  $3072/2$ , а длина окружности будет равна  $3,14 \times 3072 = 9648$  пикселей. Тогда разрешающая способность равна 1 из 9648 пикселей.

Дискретность отсчета по шкале индикатора должна быть не более  $0,1 \mu m$ . Рассчитаем дискретность по шкале:

$$\frac{1000 \mu m}{9648 pix} \approx 0.1.$$

Для проверки точности распознавания оператор выставляет стрелку на штрихи шкалы. Измерения проводились по шкале индикатора часового типа ИЧ-10 с использованием камеры с разрешением  $2592 \times 1944$  (дискретность  $0,2 \mu m$ ). Значения распознавания положения стрелки, полученные из модуля распознавания, достигают  $2,2 \mu m$  (Line2, рис. 2). Точность расположения штрихов на ИЧ-10 по заявлению производителя составляет  $\pm 5'$  ( $\pm 0,2 \mu m$ ). Полученные нами данные превышают допустимые примерно в 10 раз и в 4 раза дискретность, которую мы заложили. Для того чтобы выяснить в чем проблема, «вручную» (с помощью сторонней программы) по сохраненному изображению шкалы индикатора определено расположение штрихов, за центр была взята ось стрелки. Расхождение также превышало допустимое значение в несколько раз, но не превышают  $0,5 \mu m$  по сравнению со значениями, которые были получены «вручную» (Line1, рис. 2).

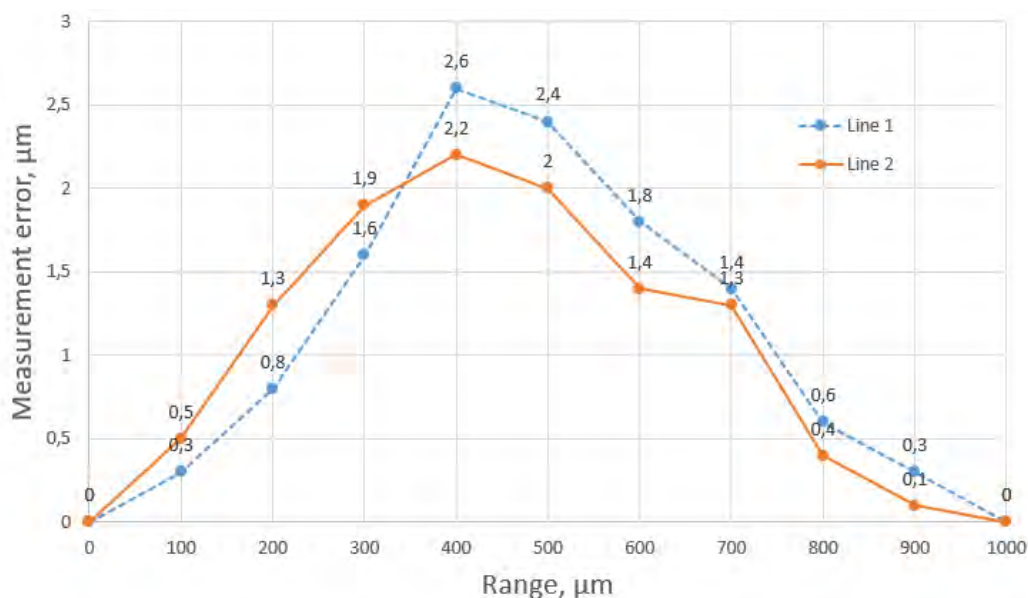


Рисунок 2 – Погрешности расположения штрихов от центра вращения стрелки

Далее была подробно изучена шкала и установлено, что оси шкалы и стрелки не совпадают. Значение штрихов определяется через угловое положение, а так как в модуле распознавания и, при определении значений «вручную», берутся координаты центра стрелки, то можно сделать вывод, что на графиках мы видим отклонение

углового положения штрихов от оси стрелки, а не оси шкалы. При определении погрешности углового положения штрихов от центра шкалы их отклонение соответствует заявленному и не превышает  $\pm 5'$  ( $\pm 0,2 \mu\text{m}$ ) (Рис. 3).

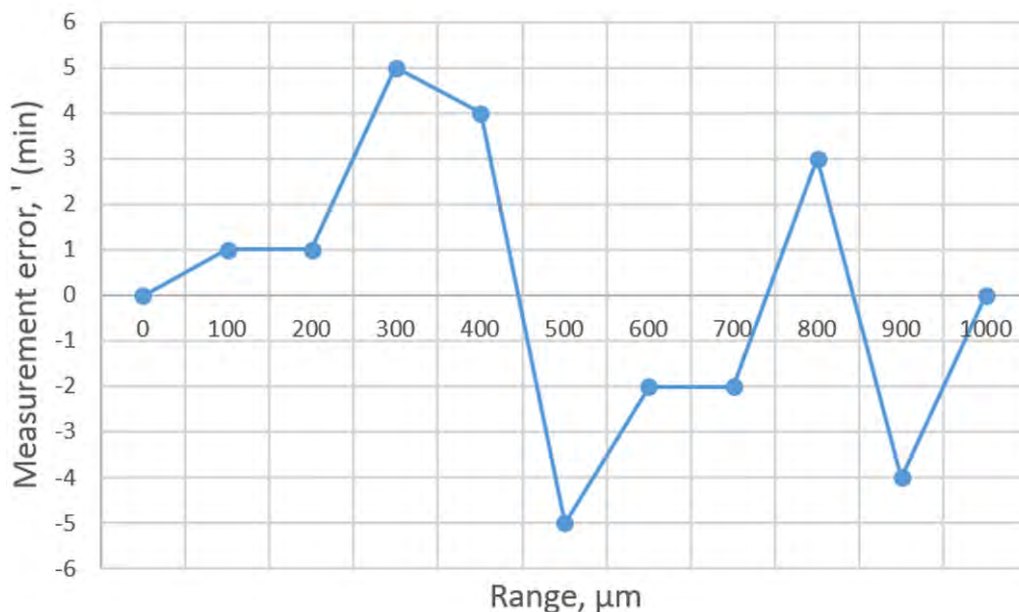


Рисунок 3 – График погрешности расположения штрихов от центра шкалы

### Заключение

Разработан модуль, который определяет положение стрелки. Определение углового положения стрелки от центра вращения недостаточно, требуется определение положения каждого штриха от центра шкалы и последующая корректировка данных положения стрелки с учетом этого фактора. В результате чего мы получим такие значения, которые видит оператор, считывая значения со шкалы.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 577-68. Индикаторы часового типа с ценой деления 0,01 мм. Технические условия.
2. Приказ №2840 от 29.12.2018 "Об утверждении Государственной поверочной схемы для средств измерений длины в диапазоне от  $1 \cdot 10^{-9}$  до 100 м и длин волн в диапазоне от 0,2 до 50 мкм"
3. 437-175-2020 МП. Методика поверки. Приборы для поверки индикаторов ППИ-50.
4. Степанов С.С., Петров А.В., Тарасов С.Б., Степанов С. Автоматизация калибровки приборов для линейных измерений // Наноиндустрия. 2019. Т. 12. № 2 (88). С. 122-127.
5. МИ 2192-92. Методика поверки. ИНДИКАТОРЫ ЧАСОВОГО ТИПА С ЦЕНОЙ ДЕЛЕНИЯ 0,01 мм.

## **ВЫЯВЛЕНИЕ УСЛОВИЙ ВЫПОЛНЕНИЯ СОЕДИНЕНИЯ «КОРПУС – НИШПЕЛЬ» АЛМАЗНОГО ДОЛОТА ПРИ АВТОМАТИЧЕСКОЙ СБОРКЕ**

### **Аннотация**

В статье обоснована актуальность задач, связанных с автоматизацией технологических процессов изготовления горных машин и породоразрушающего инструмента. В частности, рассматривается возможность автоматизации сборки соединений алмазного долота. Выявлены условия выполнения автоматической собираемости соединения «корпус-нипель», рассмотрены основные этапы автоматической сборки и факторы, влияющие на формирование позиционной точности элементов конструкции бурового инструмента.

*Ключевые слова:* алмазное долото, корпус, ниппель, автоматическая сборка, условия собираемости

### **Введение**

Повышение технического уровня горного машиностроения может быть достигнуто на основе внедрения высокоэффективных технологических процессов, а также комплексной автоматизацией этапов изготовления машин и горного инструмента. Особую актуальность данные вопросы приобретают в сборочном производстве, где пока еще преобладает ручной труд, а уровень автоматизации составляет 10...15 % [1-4]. В связи с этим внедрение в производство автоматической сборки является важным средством повышения производительности труда и качества изготовления породоразрушающего инструмента.

Следует отметить, что для выполнения механической обработки составных элементов конструкции горного инструмента широко применяются металлорежущее оборудование с числовым программным управлением, а также средства автоматизированного контроля. Вместе с тем, сборку изделий, как правило, осуществляют вручную. Принимая во внимание объемы производства горного инструмента и предъявляемые требования к точности соединений, становится очевидной целесообразность автоматизации сборочных операций, в процессе которых гарантированно обеспечиваются точность относительного положения элементов его конструкции.

Рассмотрим возможность реализации автоматической сборки для алмазного долота. Для этого выполним анализ его конструкции.

На рисунке 1 изображен общий вид алмазного долота, которое состоит из корпуса 1, разделенного на четыре равных секции лапами 2. Лапы включают в себя резцы двух видов: режуще-истирающего 3 и защитного 4 действия. Резцы алмазных долот, в зависимости от применяемости и назначения, могут позиционироваться на теле инструмента тремя способами: радиально относительно корпуса, спирально по поверхности лап корпуса и ступенчато. Корпус инструмента присоединяется к ниппелю 5 при помощи замковой резьбы. Для исключения проворота корпуса его

дополнительно приваривают к ниппелю по торцевой поверхности. Ниппель предназначен для крепления бурового инструмента к колоннам бурового механизма с помощью переводника.

### Методы

При автоматической сборке резьбовых соединений последовательно выполняется ряд переходов, предусматривающих [3]:

1. взаимную ориентацию ниппеля относительно корпуса по фаскам и кромкам сопрягаемых поверхностей;
2. наживление резьбовых поверхностей;
3. свинчивание деталей;
4. затяжка резьбового соединения;
5. стопорение соединения.

Одним из наиболее ответственных и трудоемких этапов является наживление резьбовых поверхностей, в процессе которого происходит совмещение осей присоединяемой и базовой деталей резьбового соединения (рис. 2). На этом этапе могут возникнуть погрешности относительного положения осей сопрягаемых элементов  $\Delta_{\Sigma}$  и  $\alpha_{\Sigma}$ . Определим условия гарантированного автоматического сопряжения элементов соединения «корпус-ниппель».

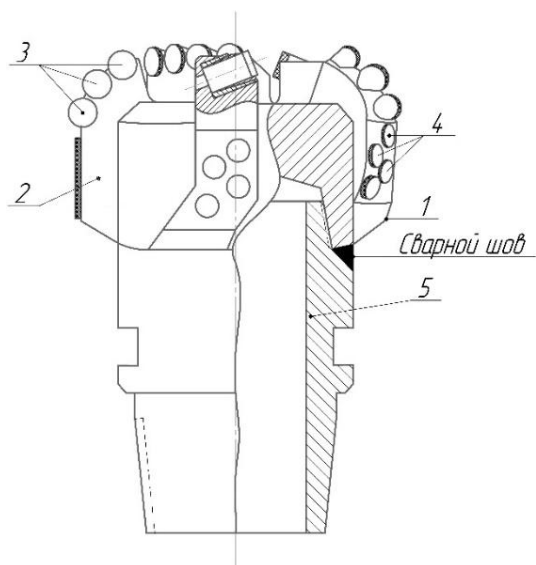


Рисунок 1 - Алмазное долото

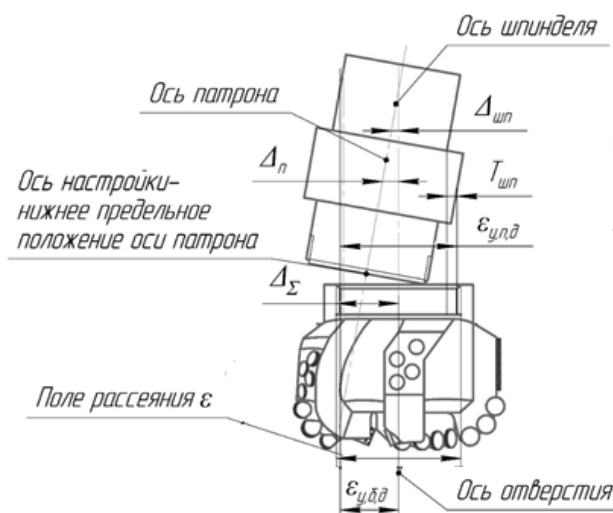


Рисунок 2 – Формируемые погрешности относительного положения резьбовых поверхностей деталей при автоматической сборке

Погрешность положения резьбовой поверхности базовой детали  $\varepsilon_{у.б.д}$  - (рис. 2), определяется, как [3]

$$\varepsilon_{у.б.д} = \sqrt{\varepsilon_{б.б.д}^2 + \varepsilon_{з.б.д}^2 + \varepsilon_{пр}^2} \quad (1)$$

где погрешность базирования  $\varepsilon_{б.б.д}$  зависит от выбранной схемы базирования, а также от погрешности изготовления базовой детали и ее резьбовой поверхности,  $\varepsilon_{з.б.д}$  – погрешность закрепления базовой детали;  $\varepsilon_{пр}$  – погрешность приспособления.

Погрешность положения резьбовой поверхности присоединяемой детали рассчитывается по формуле

$$\varepsilon_{у.п.д} = \sqrt{\varepsilon_{б.п.д}^2 + \varepsilon_{з.п.д}^2 + \varepsilon_{им}^2} \quad (2)$$

где в погрешности базирования ниппеля, как присоединяемой детали,  $\varepsilon_{б.п.п}$  учитывают погрешность изготовления ниппеля и его резьбовой поверхности, а в погрешности исполнительного механизма  $\varepsilon_{им}$  – погрешность изготовления шпинделя и патрона:  $\Delta_{шп}, \Delta_n$  соответственно.

При вращении ниппеля в патроне исполнительного механизма ось торца резьбовой поверхности, перемещаясь, очерчивает окружность, радиусом  $r$  (рис. 3), равным

$$r = \frac{\varepsilon_{у.п.д}}{2} + \Delta_y \quad (3)$$

где  $\Delta_y$  – упругие деформации патрона.

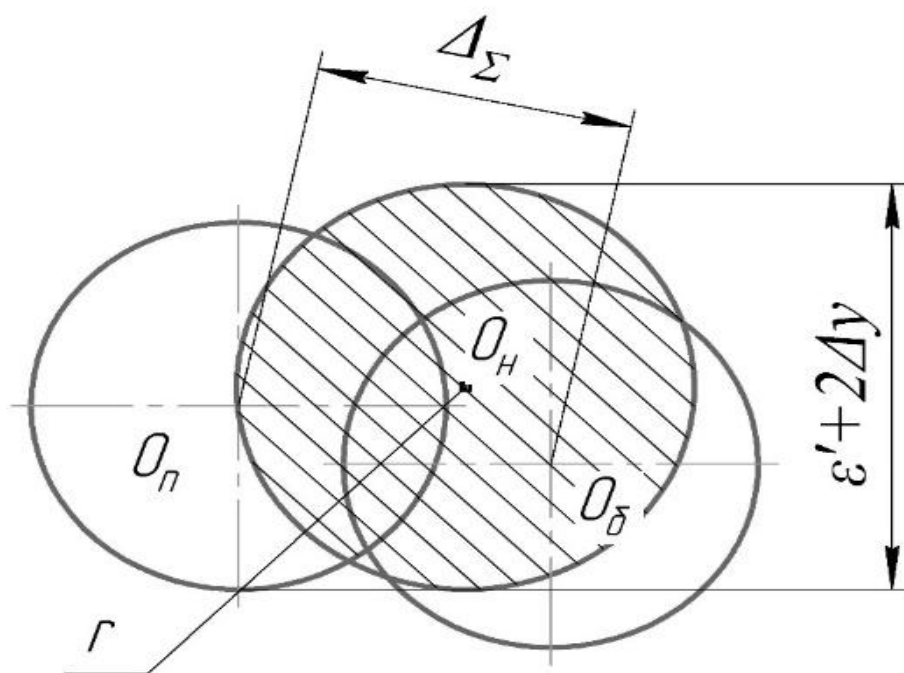


Рисунок 3 - Контур перемещения торца ниппеля (присоединяемой детали  $O_n$ ) перед началом сопряжения с резьбовой поверхностью корпуса ( $O_b$ )

При этом вероятность совмещения осей ниппеля и корпуса долота будет определяться вероятностью попадания оси присоединяемой детали ( $O_n$ ) в окрестность оси сопрягаемой поверхности базовой детали ( $O_b$ ), определяемую радиальным зазором  $\delta_c/2$ .

Тогда, первое условие автоматической собираемости можно записать как [5]

$$\frac{\varepsilon_{у.п.д}}{2} + \Delta_y > \frac{1}{2} \varepsilon_{у.б.д} + \Delta_n - \left( \Sigma f + \frac{\delta_c}{2} + \frac{\Sigma \delta_n}{2} \right) \quad (4)$$

где  $\varepsilon_{у.б.д}$ ,  $\varepsilon_{у.п.д}$  – погрешности установки базовой и присоединяемой деталей (корпуса долота и ниппеля);  $\Delta_n$  – погрешность настройки сборочной позиции;  $\delta_c, \Sigma f$  и  $\frac{\Sigma \delta_{п}}{2}$  – параметры фасок и центрирующих поясков элементов резьбового соединения.

Вторым условием гарантированной автоматической собираемости на этапе наживления резьбовых поверхностей является выполнение неравенства

$$\alpha_{\Sigma} < \alpha_{пр},$$

где  $\alpha_{пр}$  – предельный угол перекося, при котором может произойти срыв резьбы.

Предельный угол перекося  $\alpha_{пр}$  определяют из уравнения

$$\operatorname{tg} \alpha_{пр} = \frac{p - T_{d_{ср}} \operatorname{tg} 30^{\circ}}{d + d_1 + T_{d_1}} \quad (5)$$

где  $d$  и  $d_1$  – наружный и внутренний диаметр резьбы;  $T_{d_{ср}}$  и  $T_{d_1}$  – допуски на средний и внутренний диаметр резьбы;  $p$  – шаг резьбы.

Таким образом, исполнительный сборочный механизм не должен допускать перекося присоединяемой резьбовой поверхности на угол  $\alpha_{\Sigma} > \alpha_{пр}$ .

При завершении наживления угол  $\alpha_{\Sigma}$  принимается равным нулю, тогда из уравнения (4) получаем условие

$$\frac{\varepsilon_{у.п.д}}{2} = \frac{\varepsilon_{у.б.д}}{2} + \Delta_n \quad (6)$$

для обеспечения которого в резьбовозавертывающем механизме предусматривают дополнительный компенсирующий элемент, который позволяет присоединяемой детали перемещаться и поворачиваться.

### Заключение

На основе анализа основных переходов, выполняемых при автоматической сборке резьбовых соединений, выявлены условия автоматического выполнения соединения «корпус-ниппель» алмазного долота на этапе наживления резьбовых поверхностей с учетом формируемых погрешностей относительного положения сопрягаемых элементов соединения.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Проектирование технологии: Учебник для студентов машиностроительных специальностей вузов / И. М. Баранчукова, А. А. Гусев, Ю. Б. Крамаренко и др.; Под общ. ред. Ю. М. Соломенцева. — М.: Машиностроение, 1990. — 416 с.: ил. — (Технология автоматизированного машиностроения).
2. Федотова А.М., Гасюк Д.П. Анализ рисков возникновения проблем с качеством технологической подготовки производства и разработка мероприятий по их снижению в условиях АО "НИИЭФА" // Металлообработка. 2021. № 1 (121). С. 50-54.
3. Технология автоматической сборки / А.Г. Холодкова, М.Г. Кристаль, Б.Л. Штриков и др.; под ред. А.Г. Холодковой. – М. Машиностроение, 2010. – 560 с.: ил.
4. Косова В.А., Гасюк Д.П. К вопросу анализа условий разработки технологических процессов машиностроительных предприятий // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2021. № 2. С. 655-658.
5. Холодкова А.Г., Максимович Б.Д. Автоматизация проектирования технологических процессов автоматической сборки // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2004. №4. С.14-18.



Р.В. Абрамов, Е.А. Польский, К.А. Матророва  
ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет»,  
Брянск, Россия, [polski.eugene@hotmail.com](mailto:polski.eugene@hotmail.com)

## **ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ СБОРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ЭЛЕМЕНТОВ ФОРМООБРАЗУЮЩЕЙ ОСНАСТКИ**

### **Аннотация**

В работе рассмотрены рекомендации по технологическому обеспечению установленных параметров контактной жесткости плоских стыков сборных конструкций формообразующих элементов пресс-форм для достижения требуемой наработки на отказ с учетом основных этапов конструкторско-технологической подготовки производства.

*Ключевые слова:* качество поверхности, контактная жесткость, технологическое обеспечение, анализ размерных связей, пространственные отклонения, точность.

### **Введение**

В настоящее время основным направлением повышения производительности качества продукции, формируемой из полимерных материалов на термопластавтоматах является применение в качестве формообразующей оснастки сборных конструкций, состоящих из отдельных знаков, собранных с достижением требуемой точности расположения отдельных элементов. При этом главной причиной выхода из строя такой штамповой оснастки выделяют усталостное разрушение, которое вызвано деформацией формообразующих элементов в процессе смыкания форм вследствие погрешностей пространственного расположения сопрягаемых поверхностей.

В этой связи достаточно актуальными являются исследования по технологическому обеспечению требуемых показателей надежности конструкции (наработка на отказ) на этапах проектирования, изготовления и сборки.

### **Методы**

Теоретические исследования базируются на положениях научных основ технологии машиностроения, математического моделирования, методики обработки однофакторных и многофакторных экспериментов.

### **Результаты и обсуждение**

Контактная жесткость определяется геометрическими и физико-механическими параметрами качества поверхностного слоя. Качество поверхностного слоя, в свою очередь, зависит от способа и условий обработки поверхности. Также следует учитывать влияние на формирование поверхностного слоя механических свойств материала изделия. Сборка как окончательный этап получения изделия также оказывает воздействие на достижение точности замыкающего звена пространственной размерной цепи согласования сопрягаемых половин штампа.

Следовательно, возникает задача прогнозирования величины сближения контактирующих поверхностей отдельных знаков сборной конструкции при формировании элемента пресс-формы с учетом различного сочетания параметров качества поверхности и положения знака в размерной цепи. В настоящее время недостаточно полно отражено влияние на контактную деформацию пространственных отклонений сопрягаемых поверхностей, и также требуют корректировки известные зависимости упругой и пластической составляющей контактной жесткости с учетом метрологического обеспечения отдельных геометрических параметров качества (действующий стандарт по геометрическим характеристикам изделия – структура поверхности) [1, 2].

Возможность расчета на контактную жесткость с учетом всех условий контактирования изделий позволяет оценивать и сравнивать предложенные конструктивные решения с точки зрения перераспределения предельных отклонений на размеры деталей, обеспечивающих точность замыкающего звена, выбор отделочных методов и режимов обработки контактирующих поверхностей, а также последовательности выполнения сборочной операции. Это позволит не только прогнозировать возникающие погрешности расположения сопрягаемых деталей, но и перейти от высокотратных финишных профилешлифовальных операций на статистически устойчивые лезвийные методы.

Вследствие поверхностной деформации контактирующих деталей происходит нарушение заложенных размерных связей (рис. 1).

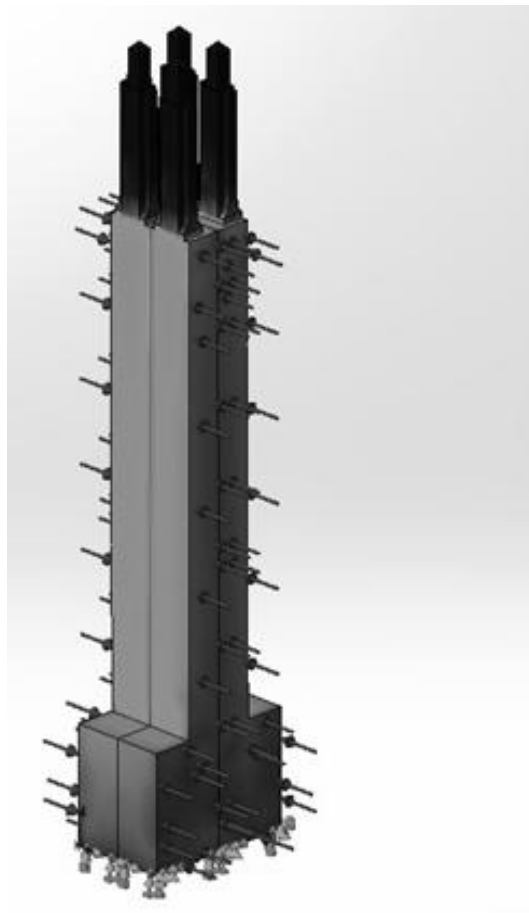


Рисунок 1 – Схема распределения усилий нагружения при сборке отдельных знаков формообразующей оснастки

В проанализированных исследованиях приводят следующие рекомендации по расчету контактной жесткости плоских стыков. Упругое сближение определяется по формуле (1):

$$y = c \cdot \varepsilon \cdot p_H^{0.5} \quad (1)$$

где  $\varepsilon$  – коэффициент понижения контактной жесткости, предложенный Решетовым Д.Н. и Левиной З.М.;

$c$  – коэффициент учитывающий технологический фактор, определяемый по зависимости:

$$c = Ra \cdot c_0 \cdot [H / E_H \cdot E]^{0.5} \quad (2)$$

где  $Ra = (Ra_1 + Ra_2) / 2$  – приведенное среднее арифметическое отклонение профиля шероховатости контактирующих поверхностей;

$c_0$  – безразмерный параметр, зависящий от вида обработки поверхностей;

$\varepsilon$  – коэффициент влияния масштаба [3]: если  $\varepsilon < a$ , то  $\varepsilon = (3 \cdot a)^{1/3}$ , а если  $\varepsilon > a$ , то

$\varepsilon = 0.5 \cdot a + (1 - a^2 / 12)^{0.5}$  (здесь  $a = (\Delta - W_{\max}) \cdot (E_H \cdot E)^{0.5} / [Ra \cdot c_0 (H \cdot p)^{0.5}]$ , значение допуска

плоскостности по справочнику, значения  $W_{\max} - R_{\max}$ );

$H$  – твердость наиболее мягкой поверхности, МПа;  $E = 2E_1E_2 / (E_1 + E_2)$  – приведенный модуль упругости, МПа;

$E_H$  – модуль упругости материала контактирующей поверхности, имеющей меньшую твердость, МПа.

При решении задачи технологического обеспечения установленных эксплуатационных свойств функциональных поверхностей отдельных знаков выполняется последовательный расчет величины контактных сближений с учетом предварительного нагружения в соответствии с технологическими рекомендациями сборочной операции и номера знака в последовательности гребенки (для четных и нечетных знаков необходимо указать дополнительное ограничение размерных связей) [4, 5].

В качестве расчетной модели принимается пространственное искривление волнистой и шероховатой поверхности относительно выбранной точки начала расчета с учетом того, что отклонение от плоскостности — это наибольшее расстояние от точек реальной поверхности до прилегающей плоскости в пределах нормируемого участка. Следовательно, волнистость конструктора рассматриваем, как часть отклонения от плоскостности. Коэффициент  $\varepsilon$  зависит от наибольшего размера контактной поверхности  $l$ , а также от разности  $\Delta_0 = \Delta - W_{\max}$  допуска плоскостности  $\Delta$  и наибольшей высоты волны волнистой шероховатой поверхности  $W_{\max}$  ( $R_{\max}$ ).

Весьма важную роль играет оценка не только шероховатости, но и топография рабочих поверхностей. Существенно значение имеет высота микронеровностей и формы единичных микронеровностей. Форма профиля шероховатости поверхностей может характеризоваться углами наклона боковых сторон микронеровностей к горизонтали и радиусами закругления вершин выступов. От этих параметров прежде всего зависят величины сближений контактирующих деталей под действием

нагрузки. Но, в свою очередь, формы профиля порождаются особенностями метода обработки поверхности. Поэтому в вопросах определения контактной жесткости первостепенную роль играют технологические методы обработки. Величины радиусов вершин микровыступов в разных сечениях детали оказываются различными и в весьма сильной степени зависят от расположения плоскости измерения по отношению к направлению следов обработки.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Польский, Е.А. Технологическое обеспечение точности и качества поверхностей деталей машин при проектировании маршрутно-операционного технологического процесса методом синтеза на основе анализа размерных связей / Е.А. Польский // Научные технологии в машиностроении. - 2016. - № 10(64). - С. 39-48.

2. Федотова А.М., Гасюк Д.П. Анализ рисков возникновения проблем с качеством технологической подготовки производства и разработка мероприятий по их снижению в условиях АО "НИИЭФА" // Металлообработка. 2021. № 1 (121). С. 50-54.

3. Иванов, А.С. Справочные данные для расчета на контактную жесткость при конструировании машин // Вестник машиностроения. - 2005. - № 2. - С. 37-40.

4. Pol'skii, E.A. Improvements in surface precision by automated design of machining trajectories / E.A. Pol'skii // Russian Engineering Research. - 2017. - Vol. 37. - No 5. - P. 455-458. - DOI 10.3103/S1068798X17050185.

5. Косова В.А., Гасюк Д.П. К вопросу анализа условий разработки технологических процессов машиностроительных предприятий // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2021. № 2. С. 655-658.

Д.Е. Васильева, Е.А. Польский, Е.А. Абрамов  
ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет»,  
Брянск, Россия, [polski.eugene@hotmail.com](mailto:polski.eugene@hotmail.com)

## **ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ КОМБИНИРОВАННЫХ РЕЗЬБОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ ВЫСОКОНАГРУЖЕННОГО СТЫКОВОГО УЗЛА НА ЭТАПАХ КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА**

### **Аннотация**

В работе рассмотрена модель технологического обеспечения требуемых параметров точности и качества комбинированных резьбовых соединений на основных этапах жизненного цикла изделия на основе выбора материалов и проектирования технологических процессов изготовления и сборки резьбовых элементов, обеспечивающих установленные показатели надежности высоконагруженных стыковых соединений.

*Ключевые слова:* качество поверхности, эксплуатационные свойства, технологическое обеспечение, контактная жесткость.

### **Введение**

Для высоконагруженных стыковых соединений применяется достаточно большое число вариантов обеспечения их эксплуатационных свойств. Для формирования величины контактных усилий в стыковом соединении используют резьбовые соединения. Для установки крышки на корпус изделия с высокими параметрами перепада давлений внутри и снаружи в конструкцию заложены комбинированные резьбовые соединения, в которых шпилька устанавливается в резьбовую втулку. При этом следует отметить, что в настоящее время недостаточно данных по контактным напряжениям в сборных резьбовых соединениях. Исследования, посвященные технологическому обеспечению эксплуатационных свойств комбинированных резьбовых соединений с учетом требований по материалу и параметрам качества контактирующих поверхностей, являются достаточно актуальными.

### **Методы**

Теоретические исследования базируются на положениях научных основ технологии машиностроения, математического моделирования, методики обработки однофакторных и многофакторных экспериментов.

### **Результаты и обсуждение**

На основных этапах жизненного цикла изделия предполагается представить обоснование по оптимизации конструктивных показателей соединения (подбор сопрягаемых материалов, установление степени точности и посадки взаимосвязанных резьбовых пар), рекомендации по подбору инструментального обеспечения и корректировке размеров настройки управляющей программы для станков с ЧПУ по формированию параметров точности и качества резьбовых поверхностей

сопрягаемых элементов и режимов сборки с достижением показателей надежности узла и установлению методов [1].

Для крупногабаритных узлов замыкания изделий, предназначенных для эксплуатации в условиях больших перепадов давления, необходимо обеспечить параметры сопряжения контактирующих поверхностей с учетом общей конструкции изделия. В частности, зазор между центрирующим выступом крышки и выточкой корпуса представляет собой функцию относительно установленных требований по позиционному допуску на расположение отверстий в двух сопрягаемых деталях. При этом следует учесть, что кроме допуска на расположение исходного отверстия под нарезание внутренней резьбы, требуется определить величину смещения резьбовой втулки с учетом отклонения от соосности наружной и внутренней резьбовой поверхности и, кроме того, согласовать параметры посадки резьбового соединения корпуса и втулки после запрессовки фиксирующего штифта (рис. 1).

На этапе проведения исследований требуется провести анализ показателей герметичности на натуральных образцах (НПО «ГКМП») с выявлением значимых факторов для обеспечения установленных нормальных напряжений в стыковом соединении (рис. 2) с требуемыми параметрами контактной жесткости (установка для определения показателей контактной жесткости при формировании сопряжения с применением комбинированных резьбовых соединений) [2].

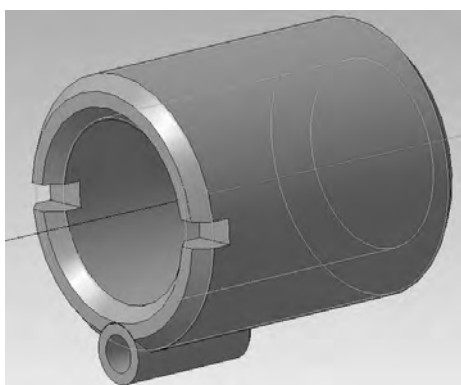


Рисунок 1 – Модель резьбовой втулки в сборе со штифтом

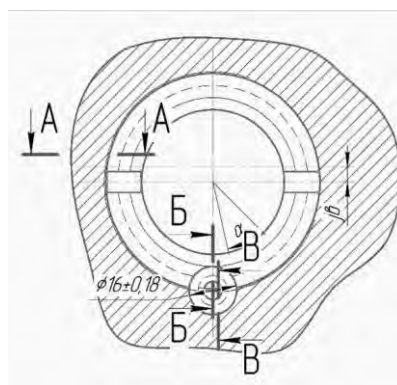


Рисунок 2 – Схема формирования контактных деформаций при сборке комбинированного резьбового соединения

При одноступенчатом технологическом обеспечении эксплуатационных свойств, параметры точности и качества элементов комбинированных резьбовых соединений с учетом ограничений по показателям надежности (динамометрический стенд для проверки собираемости комбинированных резьбовых соединений с использованием элементов из различных материалов) формируются на основных этапах жизненного цикла – проектирование соединений с учетом выбора материалов и назначения параметров качества и точности, изготовление элементов комбинированных резьбовых соединений с учетом одноступенчатого формирования эксплуатационных свойств, сборка комбинированных соединений с учетом коррекции размеров посадок (устройство контроля параметров точности и качества элементов резьбовых соединений с обработкой информации с последующей разработкой рекомендаций по формированию установленных показателей надежности узла) [3 - 5].

Конструктивные требования для установки по натурным испытаниям:

- блок для определения показателей контактной жесткости при формировании сопряжения с применением комбинированных резьбовых соединений;
- динамометрический стенд для проверки собираемости комбинированных резьбовых соединений с использованием элементов из различных материалов;
- устройство контроля параметров точности и качества элементов резьбовых соединений с обработкой информации с последующей разработкой рекомендаций по формированию установленных показателей надежности узла;
- приспособление для определения параметров точности и качества элементов комбинированных резьбовых соединений с учетом ограничений по показателям надежности, состоящее из: установочной плиты с пазами и отверстиями, а так же рым-болтами для перемещения данного приспособления, двух шпилек, пружин средней жесткости, гаек, шайб, откидывающейся планки для регулирования по высоте втулки, призмы с приваренным упором с одной стороны для лишения втулки пяти степеней свободы, а так же коробка, служащего для поднятия призмы с втулкой. Данная конструкция позволяет упростить и снизить себестоимость, а также трудоемкость определения параметров точности и качества элементов комбинированных резьбовых соединений с учетом ограничений по показателям надежности.

### **Заключение**

Представленная в данной работе концепция технологического обеспечения показателей надежности комбинированных резьбовых соединений решает комплексную задачу по взаимосвязанной корректировке параметров отдельных этапов конструкторско-технологической подготовки производства по заданному критерию оптимальности.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Польский, Е.А. Технологическое обеспечение точности и качества поверхностей деталей машин при проектировании маршрутно-операционного технологического процесса методом синтеза на основе анализа размерных связей / Е. А. Польский // Научно-технические технологии в машиностроении. - 2016. - № 10(64). - С. 39-48.
2. Филькин, Д.М. Погрешность базирования заготовок при установке на опорные призмы с учетом макроотклонений / Д. М. Филькин, Е. А. Польский // Транспортное машиностроение. - 2022. - № 1-2(1-2). - С. 8-19. - DOI 10.30987/2782-5957-2022-01-02-8-19. - EDN ZGUWSN.
3. Pol'skii, E.A. Improvements in surface precision by automated design of machining trajectories / E. A. Pol'skii // Russian Engineering Research. - 2017. - Vol. 37. - No 5. - P. 455-458. - DOI 10.3103/S1068798X17050185.
4. Федотова А.М., Гасюк Д.П. Анализ рисков возникновения проблем с качеством технологической подготовки производства и разработка мероприятий по их снижению в условиях АО "НИИЭФА" // Металлообработка. 2021. № 1 (121). С. 50-54.
5. Косова В.А., Гасюк Д.П.К вопросу анализа условий разработки технологических процессов машиностроительных предприятий // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2021. № 2. С. 655-658.

И.Д. Воронина, П.В. Скачков, С.В. Сорокин  
ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет»,  
Брянск, Россия, [sorokin.tm@mail.ru](mailto:sorokin.tm@mail.ru)

## **АВТОМАТИЗАЦИЯ ЭТАПОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА НА ОСНОВЕ ФОРМИРОВАНИЯ КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО КОДА ДЕТАЛИ**

### **Аннотация**

В работе рассмотрена модель системы формирования конструкторско-технологического кода детали и алгоритмов автоматизации этапов подготовки производства по назначению технологического оснащения на основе элементов сформированного кода.

*Ключевые слова:* конструкторско-технологический код детали, качество поверхности, эксплуатационные свойства, шлифовальный круг.

### **Введение**

В современных условиях производства одной из главных задач становится сокращение сроков подготовки производства, что является основной причиной внедрения САПР на предприятиях [1 - 6]. Объединение модулей конструкторских и технологических разработок в единую САПР снижает стоимость и трудоемкость изготовления продукции [7 - 11].

Автоматизированная подсистема формирования конструкторско-технологического кода детали может широко использоваться при технологической подготовке производства и управлении им для анализа и группирования номенклатуры деталей по конструкторско-технологическим признакам, разработки типовых, групповых технологических процессов и операций с применением компьютерной техники [12 - 14].

### **Методы**

При реализации поставленных задач использовались научные положения теории автоматизированного проектирования. При разработке программных модулей использовались методы структурного и объектно-ориентированного программирования. Для разработки математических моделей проектных процедур использовались основные положения технологии машиностроения.

### **Результаты и обсуждение**

Процесс кодирования заключается в присвоении детали кода классификационных группировок конструктивных признаков по классификатору ЕСКД и технологических признаков по технологическому классификатору.

Разработка автоматизированной системы формирования конструкторско-технологического кода включила в себя проектирование структурно-функциональной схемы автоматизированной системы, которая отражает в общем виде принцип работы; разработку математического обеспечения алгоритмов получения кода детали по чертежу и получения описания детали по коду; создание пользовательского интерфейса, реализующего удобный ввод исходных данных и



представление результата проектирования; разработку программного обеспечения системы.

Разработанная система производит формирование конструкторско-технологического кода детали, используя необходимые исходные данные, введенные пользователем, и выводит отчет. В качестве входных параметров пользователь должен указать (рис. 1): размерная характеристика, группа материала, вид детали по технологическому методу изготовления, класс детали; подкласс детали; группа детали; подгруппа детали; вид детали; размерная характеристика детали; группа материалов; вид детали по технологическому методу изготовления; вид исходной заготовки; качество точности наружных и внутренних поверхностей; шероховатость или отклонения формы и расположения поверхностей; степень точности; вид дополнительной обработки; масса детали.

Конструкторско-технологический код

Подкласс детали: с L до 0,5 D включ. кольца, диски, тарелки, крышки, фланцы, катушки, шкивы, блоки и др. с наружной поверхностью цилиндрической

Группа детали: с закрытыми уступами без наружной резьбы

Подгруппа детали: с центральным сквозным отв. круглым в поперечном сечении цилиндрическим, без резьбы ступенчатым

Вид детали: без кольцевых пазов на торцах, без пазов и шлицев на наружной поверхности, без отверстия вне оси детали

Наибольший диаметр детали, мм: 20      Длина детали, мм: 100

Наибольший диаметр отверстия детали, мм: 5

Материал детали: стали углеродистые

Вид детали по технологическому методу изготовления: обрабатываемая резанием

Способ получения исходной заготовки: заготовка, полученная литьем

Квалитет точности наружных поверхностей детали: 8

Квалитет точности внутренних поверхностей детали: 8

Выбор признака по важности:  Шероховатость поверхностей     Ra    12,5     Rz

Укажите нормируемые отклонения формы

Степень точности: 1

Вид дополнительной обработки детали: без термической обработки; без покрытия

Характеристика массы детали, кг: 30

Конструкторско-технологический код: 7116515Г20141044260Ж

OK    Выход

Рисунок 1 – Рабочее окно формирования конструкторско-технологического кода

Созданный программный модуль может найти применение на различных этапах технической подготовки производства: при разработке маршрута обработки деталей, при выборе инструмента, оборудования, при нормировании технологических процессов, что в целом значительно сократит время работ ТПП. На основании спроектированной системы был разработан модуль выбора абразивного инструмента для круглошлифовальной операции. Правильный выбор шлифовального круга позволяет понизить временные затраты на изготовление детали и обеспечить требуемое качество функциональных поверхностей [15 -17].

Созданная автоматизированная система выбора абразивного инструмента, позволяет быстро и правильно подобрать необходимый шлифовальный круг при вводе сравнительно небольшого количества исходных данных, в частности,

учитываются класс детали, размерные характеристики, группа обрабатываемого материала, вид детали по технологическому методу изготовления, вид исходной заготовки, параметр шероховатости и вид дополнительной обработки (рис. 2).

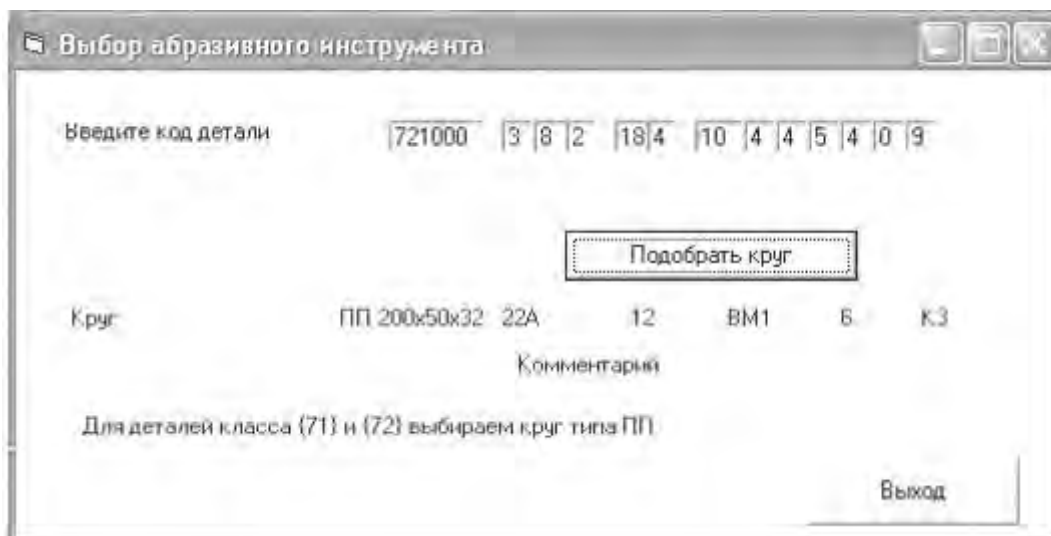


Рисунок 2 – Рабочее окно формирования конструкторско-технологического кода

Созданный программный модуль автоматизированного выбора абразивного инструмента на основе конструкторско-технологического кода детали позволяет быстро подобрать абразивный инструмент, что значительно сокращает время технологической подготовки производства.

### Заключение

Разработанная и представленная в данной работе новая конструкция датчика угла поворота может быть использована для упрощенного способа монтажа на частотно-регулируемые асинхронные электродвигатели промышленного и взрывозащищенного исполнения.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сауренко Т.Н., Чварков С.В. Экономическая политика в системе национальной безопасности российской федерации // Национальные приоритеты России. 2016. № 3 (21). С. 22-32.
2. Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г., Гапов М.Р., Родионова Е.С., Сауренко Т.Н., Силкина Г.Ю., Тебекин А.В. Стратегическое управление инновационной деятельностью: анализ, планирование, моделирование, принятия решений, организация, оценка.- Санкт-Петербург, 2017.- 312 с.
3. Гасюк Д.П., Филатов И.Н. Информационное обеспечение процесса обоснования требований к уровню унификации продукции // Труды международного симпозиума "Надежность и качество". 2007. Т. 1. С. 15-18.
4. Касяненко Е.О., Гасюк Д.П. Применение процессного подхода для оптимальной работы предприятия // В сборнике: Неделя науки СПбПУ. материалы научной конференции с международным участием. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. 2016. С. 26-29.
5. Гасюк Д.П. О содержании сущности качества менеджмента, качества продукции и их гармонизации // В сборнике: Управление качеством в интересах

устойчивого развития. Сборник материалов межвузовской научно-практической конференции. 2019. С. 31-36.

6. Тебекин А.В. Методический подход к моделированию процессов формирования планов инновационного развития предприятий / А. В. Тебекин, Т.Н. Сауренко [и др.] // Журнал исследований по управлению. 2019. Т. 5. № 1. С. 65-72.

7. Ильин И.В. Математические методы и инструментальные средства оценивания эффективности инвестиций в инновационные проекты / И.В. Ильин [и др.]. - Санкт-Петербург, 2018. - 289 с.

8. Анисимов Е.Г. Модель поддержки принятия решений при формировании инновационной стратегии предприятия / Е.Г. Анисимов [и др.] // Экономика сельского хозяйства России. 2016. № 3. С. 53-59.

9. Ведерников Ю.В. Модели и алгоритмы интеллектуализации автоматизированного управления диверсификацией деятельности промышленного предприятия / Ю.В. Ведерников, А.Ю. Гарькушев [и др.] // Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. 2014. № 5-6 (71-72). С. 61-72.

10. Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г., Ботвин Г.А. Инвестиционный анализ в условиях неопределенности.- Санкт-Петербург, 2006. 288 с.

11. Тебекин А.В. Модель прогноза стоимости и сроков модернизации промышленных предприятий / А.В. Тебекин [и др.]// Журнал исследований по управлению. 2019. Т. 5. № 3. С. 31-37.

12. Гарькушев А.Ю., Курилов А.В., Супрун А.Ф., Гасюк Д.П. Методика оценки показателей качества информационных систем // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. 2019. № 3. С. 56-61.

13. Сорокин, С.В., Концепция автоматизации обеспечения эксплуатационных характеристик деталей пар трения с применением, интегрированных САПР / Матер. междунар. науч.-тех. конф. «Обеспечение и повышение качества изделий машиностроения и авиакосмической техники», 19-20 февраля 2020г. - Брянск: БГТУ, 2020. - 424 с. С.178-181

14. Авдеев М.М. Информационно-статистические методы в управлении микроэкономическими системами / М.М. Авдеев [и др.].- Санкт-Петербург; Тула: Гриф и К (Тула). 2001.- 139 с.

15. Косова В.А., Гасюк Д.П. К вопросу анализа условий разработки технологических процессов машиностроительных предприятий // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2021. № 2. С. 655-658.

16. Польский, Е. А. Технологическое обеспечение точности и качества поверхностей деталей машин при проектировании маршрутно-операционного технологического процесса методом синтеза на основе анализа размерных связей / Е.А. Польский // Научно-технические технологии в машиностроении. - 2016. - № 10(64). - С. 39-48.

17. Федотова А.М., Гасюк Д.П. Анализ рисков возникновения проблем с качеством технологической подготовки производства и разработка мероприятий по их снижению в условиях АО "НИИЭФА" // Металлообработка. 2021. № 1 (121). С. 50-54.

## **ПОВЫШЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ФИНИШНЫХ ОПЕРАЦИЙ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ГРАФИТОВЫХ УПЛОТНЕНИЙ**

### **Аннотация**

Выявлена проблема низкой производительности финишной обработки торцевых уплотнений газотурбинного авиационного двигателя. Принято решение об использовании шлифовально-полировального оборудования на операции без абразивной притирки торцевых поверхностей сегментов уплотнений. Для уменьшения износа рабочей поверхности инструмента и увеличения его стойкости разработан специальный керамический притир с лазерными насечками, обеспечивающими увеличенную интенсивность съема материала.

*Ключевые слова:* авиационный двигатель, изотропный пиролитический углерод, торцевые уплотнения, повышение производительности, финишная обработка, керамический притир.

### **Введение**

Согласно распоряжению правительства РФ от 24 декабря 2012 года «Развитие авиационной промышленности на 2013–2025 годы» одним из направлений определено авиационное двигателестроение. Основными пунктами по развитию в данном направлении определены следующие цели: проведение политики импортозамещения, повышение качественных характеристик эксплуатируемых в данный момент конструкций двигателей, создание новых типов двигателей и вывод на мировой рынок конкурентоспособных типов двигателей [1-4].

Для создания авиационных двигателей нового поколения с улучшенными показателями надежности и экономичности необходимо решение научно-технических проблем [5-11]. Многие из них связаны с изготовлением, высокоэффективных уплотнений работоспособных при высоких скоростях вращения ротора в условиях повышенного давления рабочей среды.

Долгосрочную работу ротора, и как следствие самого газотурбинного двигателя (ГТД), обеспечивают уплотнительные устройства, которые предохраняют его от возникающих утечек масла из масляных полостей в проточную часть двигателя и воспрепятствуют загрязнению основных узлов.

### **Методы**

Уплотнительные устройства делятся по типу на контактные и бесконтактные. Контактные характеризуются непосредственным соприкосновением вращающихся и неподвижных деталей в месте уплотняющего стыка. Они, в отличие от бесконтактных, обеспечивают требуемую герметичность масляных полостей опор роторов ГТД, обладают незначительными потерями на трение и необходимой надежностью [12]. Именно поэтому основным направлением по повышению

качественных характеристик ГТД выбраны радиально торцевые контактные уплотнения.

Данные уплотнительные устройства располагаются в авиационном ГТД как это показано на рисунке 1 (выделено кривой линией).

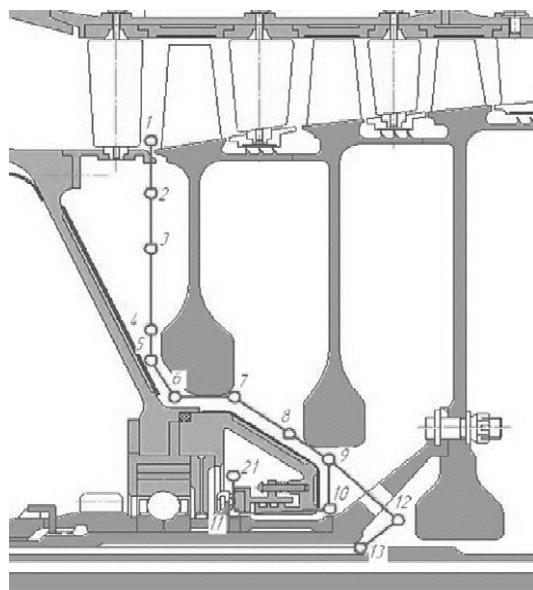


Рисунок 1 – Расположение уплотнительных устройств в двигателе

На увеличенном отдельном виде, представленном на рисунке 2, показана конструкция уплотнения.

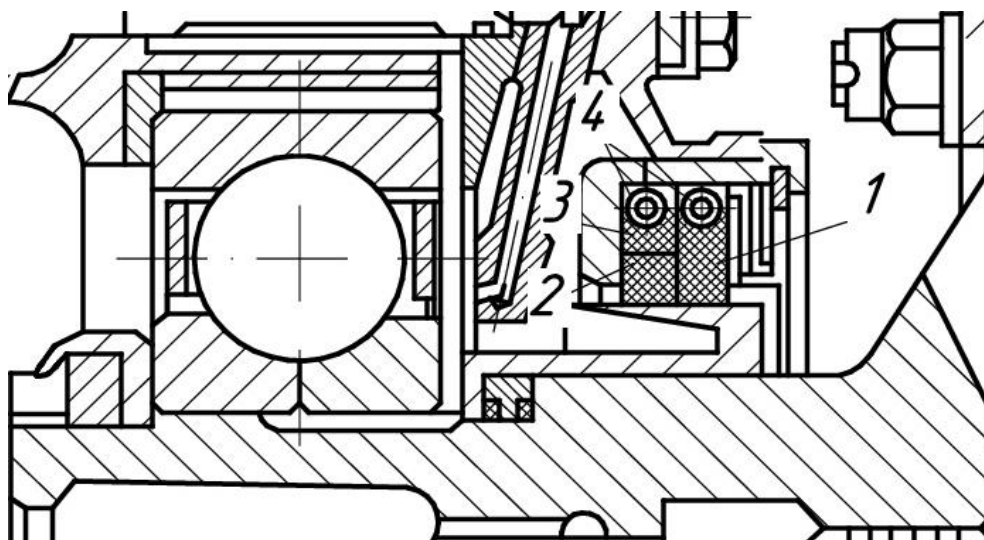


Рисунок 2 – Увеличенный вид уплотнительного устройства

Уплотнение собирается из отдельных секций, изготавливаемых из изотропного пиролитического углерода (пирографита), обладающего гораздо более высокими прочностными характеристиками, чем обычные графиты. Фрагмент чертежа секции приведен на рисунке 3. Первый ряд секций состоит из шести внутренних секций 2 и шести наружных секций 3, обжимаемых браслетной пружиной 4. Внутренние и наружные секции расположены друг относительно друга в шахматном порядке. Второй ряд состоит из шести задних секций 1, обжимаемых второй браслетной

пружиной. Усилие поджатия торцевых поверхностей обеспечивается пружинами (на схеме не показаны).

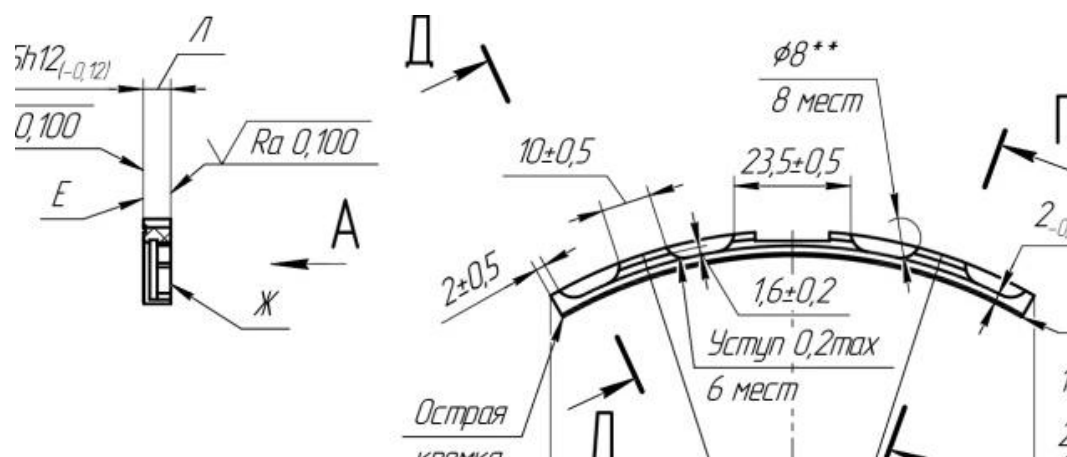


Рисунок 3 – Фрагмент чертежа внутренней секции

Существенное влияние на работу уплотнений и величину утечек через них (герметичность) оказывают характеристики уплотнительных поверхностей, а именно: допуск параллельности торцевых поверхностей секций (Е и Ж) не должен превышать 0,02 мм, допуск их плоскостности должен быть в пределах 0,3...0,6 микрон [13], шероховатость контактирующих поверхностей (в том числе внутренней) по параметру Ra не должна превышать 0,1 микрон. Толщина комплекта внутренних секций должна превышать толщину наружных секций не более, чем на 20 микрон. Видимый просвет между вставкой вала и внутренним диаметром сегментов внутренней и задней секций не допускается.

Приведенные выше значения параметров по имеющейся технологии изготовления таких изделий получают при ручной притирке поверхностей сначала на чугунной плите со свободным абразивом, а затем на матовой шлифованной стеклянной плите без абразива. Данный процесс крайне трудозатратен, а также требует участия в нем высококвалифицированных рабочих. Именно от их квалификации существенно зависит количество брака на данной операции. Помимо описанных проблем с получением самих изделий, возникают проблемы с притирочными плитами – в процессе притирки они быстро изнашиваются, теряя возможность получать заявленную шероховатость и плоскостность секций.

В связи с увеличением объема производства двигателей актуальным становится вопрос повышения производительности изготовления торцевых уплотнений, в том числе сокращение времени выполнения финишных притирочных операций.

### Результаты и обсуждение

На предприятии ООО «Вириал» была разработана и изготовлена установка по получению заготовок из пирографита и испытана прогрессивная технология изготовления торцевых уплотнений с использованием современного оборудования с ЧПУ. Финишные притирочные операции, согласно этой технологии, выполнялись на шлифовально-полировальном станке 3ШП-320. На рисунке 4 приведена схема работы данного станка.

В предложенной технологии предварительная притирка осуществляется с использованием алмазных мелкозернистых кругов на бакелитовой связке, а финишная обработка производится с помощью специально разработанного притира

изготовленного из смешанной керамики марки VCS 45 с нанесенными с помощью лазера насечками.

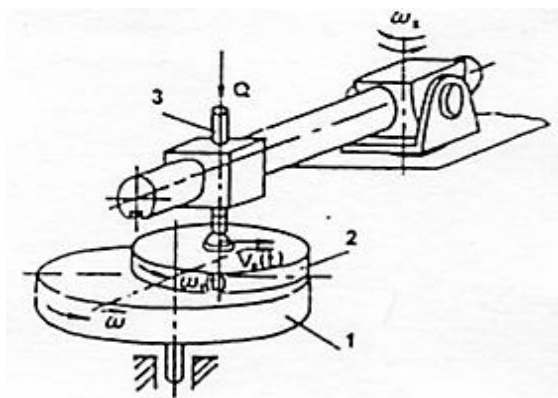


Рисунок 4 – Схема притирки на станке с поводковым механизмом, где нижнее звено 1 – инструмент (шлифовальный круг или притир), верхнее 2 – оправка с наклеенными на нее сегментами, 3 – прижим со сферической головкой, на который передается усилие и возвратно - поступательное движение подачи от поводка станка

Использование станка на операциях предварительной притирки позволило повысить производительность в два раза с 30 до 15 минут (при снятии припуска 100 мкм), получив при этом заданные технические параметры.

Производительность финишной притирки существенно зависит от количества насечек (шага), нанесенных на поверхность притира рисок [14]. Были проведены эксперименты по притирке сегментов с использованием притиров с различным шагом насечек. Результаты экспериментов приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Параметры притирки торцевых поверхностей сегментов с использованием керамических притиров

Расстояние между насечками, мм	Параметр шероховатости Ra, мкм	Параметр плоскостности, мм	Интенсивность съема материала, мкм/мин	Величина снимаемого припуска, мкм	Время обработки, мин
40	0,05	0,0006	0,8	50	125
30	0,07	0,0006	1,9		52,6
20	0,09	0,0006	4,1		24,4
10	0,1	0,0006	6,8		14,7
5	0,15	0,0006	7,9		12,7

При использовании данной схемы притирки плоскостность изделия в значительной степени зависит от плоскостности притира, так как при обработке происходит копирование поверхности притира. Поэтому важной характеристикой

процесса притирки является интенсивность износа притира. В отличие от используемого в базовой технологии стеклянного притира керамический притир показал значительно большую износоустойчивость. Эксперименты производились на одинаковой (заранее определенной) скорости вращения инструмента и усилия прижима.

### **Заключение**

Проведенные исследования показали, что использование керамического притира на операции финишной притирки повышает производительность обработки в два раза и увеличивает износоустойчивость поверхности инструмента в три раза, что позволило сократить время на смену притира и его восстановление.

Притирка внутренней поверхности осуществлялась на специально разработанном приспособлении по керамической втулке. Практика работы с данным приспособлением выявила сложность его использования. Требуется доработка его конструкции.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Анисимов Е.Г., Анисимов В.Г., Сауренко Т.Н., Чварков С.В. Экономическая политика в системе национальной безопасности российской федерации // Национальные приоритеты России. 2016. № 3 (21). С. 22-32.

2. Гасюк Д.П. О содержании сущности качества менеджмента, качества продукции и их гармонизации // В сборнике: Управление качеством в интересах устойчивого развития. Сборник материалов межвузовской научно-практической конференции. 2019. С. 31-36.

3. Анисимов Е.Г., Анисимов В.Г., Гарькушев А.Ю., Селиванов А.А., Чварков С.В. Сущность и проблемы управления обеспечением безопасности и обороной государства // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. 2016. № 3 (93). С. 3-10.

4. Распоряжение Правительства РФ от 24 декабря 2012 г. № 2509-р Об утверждении государственной программы Российской Федерации "Развитие авиационной промышленности на 2013 - 2025 годы".

5. Глухов В.В., Гасюк Д.П. Управление качеством.- Санкт-Петербург, 2013. 399 с.

6. Гасюк Д.П., Ларькин В.В. К вопросу о современном состоянии и перспективах развития системы освоения ракетного вооружения // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. 2017. № 1 (96). С. 34-40.

7. Klochkov Y., Klochkova E., Krasnyuk I., Krymov S., Gasyuk D., Akobiya N. An approach to decrease the risk of losing customers // Reliability, Infocom Technologies and Optimization (Trends and Future Directions). 6th International Conference ICRITO. 2017. P. 133-142.

8. Гасюк Д.П. Нормативно-правовые основы создания, цели, задачи и функции группы стандартизации и каталогизации вооружения, военной и специальной техники // В сборнике: Актуальные проблемы защиты и безопасности. труды XXII Всероссийской научно-практической конференции РАРАН. 2019. С. 370-374.

9. Касяненко Е.О., Гасюк Д.П. Применение процессного подхода для оптимальной работы предприятия // В сборнике: Неделя науки СПбПУ: Материалы



научной конференции с международным участием.- Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. 2016. С. 26-29.

10. Косова В.А., Гасюк Д.П. К вопросу анализа условий разработки технологических процессов машиностроительных предприятий // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2021. № 2. С. 655-658.

11. Гасюк Д.П., Филатов И.Н. Информационное обеспечение процесса обоснования требований к уровню унификации продукции // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2007. № 4. С. 100-104.

12. Конструкция и проектирование авиационных газотурбинных двигателей: учебник для вузов по специальности "Авиационные двигатели и энергетические установки" / Под ред. Хронина Д.В. - М.: Машиностроение, 1989.

13. Белоусов А.И. Зрелов В.А. Конструкция и проектирование уплотнений вращающихся валов турбомашин двигателей летательных аппаратов: Учебное пособие. - Куйбышев: КуАИ, 1989. 104 с.

14. Toshio Shikata, Hirokazu Tokoro, Takanobu Nishimura, Masaharu Kinoshita, Norio Masuda, US Patent No. 4,867,803 (Sep. 19, 1989).

И.Н. Хрусталева, Д.П. Гасюк, Л.Г. Черных, В.В. Михайлов  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Санкт-Петербург, Россия, irina.khrustaleva@mail.ru

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ РЕЗАНИЯ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ ПЕРЕХОДОВ ПОТОЧНОЙ ЛИНИИ НА ОСНОВЕ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

### **Аннотация.**

Статья посвящена вопросам оптимизации рабочего цикла поточной линии. В статье описана имитационная модель, которая направлена на повышение эффективности технологической подготовки производства путем оптимизации технологических параметров поточной линии. Основой оптимизации рабочего цикла поточной линии является синхронизация, основанная на принципе пропорциональности, которая предполагает уравнивание продолжительности всех технологических операций с ритмом поточной линии. Синхронизация технологических операций производится за счет выбора рациональных параметров резания для каждого технологического перехода (скорости резания, подачи, количество рабочих переходов). Определение рациональных параметров резания основано на расчете суммарной погрешности обработки, что позволяет повысить качество выпускаемой продукции. Описанная в статье имитационная модель позволяет повысить эффективность работы поточной линии за счет синхронизации технологических операций и поиска рациональных технологических параметров, а также повысить качество выпускаемой продукции за счет предварительной оценки точности выполнения отдельных размеров.

*Ключевые слова:* имитационное моделирование, режимы резания, погрешность обработки, поточная линия, технологический маршрут обработки, технологический переход, автоматический цикл

### **Введение**

Современные машиностроительные предприятия для поддержки уровня высокой конкурентоспособности на рынке должны обеспечивать высокую производительность труда и требуемое качество изделий при минимальных затратах материальных средств на их изготовление [1 - 9]. Одной из наиболее эффективных форм организации производственного процесса в условиях многосерийного и массового производства является применение поточных линий. Эффективная работа поточной линии основывается на синхронизации работы отдельных ее элементов, основанных на четком соблюдении производственного ритма, при котором обеспечивается минимизация длительности простоев между отдельными технологическими операциями за счет выбора рациональных производственных параметров. Выбор рациональных производственных параметров производится на этапе технологической подготовки производства [10 - 13]. Повышение эффективности данного этапа производственного процесса, и как следствие, повышение качества и надежности выпускаемой продукции возможно на основе имитационного моделирования производственных процессов [14 - 19].

## Описание имитационной модели

Разработанная имитационная модель позволяет произвести синхронизацию работы отдельных элементов поточной линии за счет согласования длительности межоперационных перерывов (рис.1).

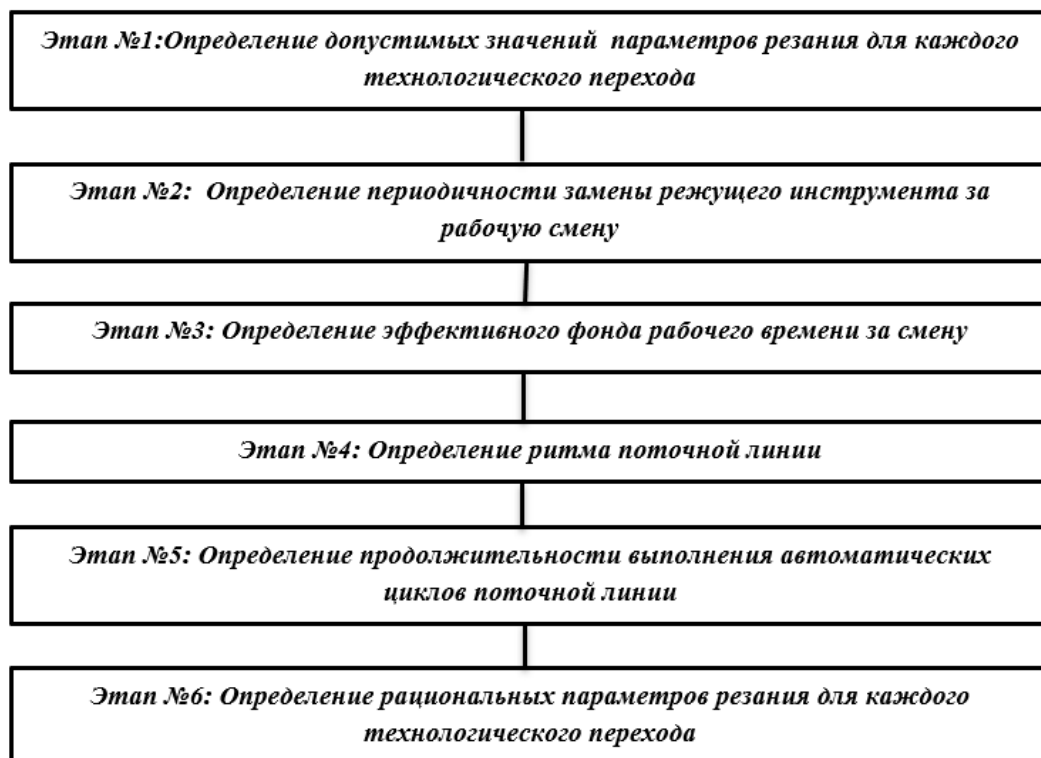


Рисунок 1 – Схема имитационной модели

*Этап №1. Определение допустимых значений параметров резания для каждого технологического перехода.*

При назначении технологических параметров резания необходимо руководствоваться тем, что получаемые суммарные погрешности обработки должны быть меньше величины допуска на соответствующий размер:

$$\Delta_{\Sigma} \leq IT \quad (1)$$

где  $\Delta_{\Sigma}$  – величина суммарной погрешности обработки, мкм;  $IT$  – величина допуска на размер, мкм.

*Этап №2. Определение периодичности замены режущего инструмента за рабочую смену.*

Периодичность замены режущего инструмента зависит от его стойкости. При этом значение стойкости напрямую зависит от величины назначенных режимов резания. На данном этапе для расчета периодичности замены режущего инструмента берутся средние значения параметров резания из допустимых интервалов.

На данном этапе для оценки периода стойкости режущего инструмента производится на основе средних значений параметров резания из допустимых интервалов:

$$V_{\text{ср}}^{\text{доп}}, s_{\text{ср}}^{\text{доп}}, t_{\text{ср}}^{\text{доп}} \rightarrow T' \quad (2)$$

Периодичность замены изношенного режущего инструмента будет определяться по формуле:

$$P_{\text{ри}} = \frac{T_{\text{р.ри}}}{T'} = \frac{t_{\text{обр}} \cdot N}{T'} \quad (3)$$

где  $T_{\text{р.ри}}$  – время работы режущего инструмента за смену при средних допустимых режимах резания, мин;  $t_{\text{дет}}$  – время работы инструмента для обработки одной детали при средних допустимых режимах резания, мин;  $N$  – количество обрабатываемых деталей в смену, шт.

Этап №3. *Определение эффективного фонда рабочего времени за смену.*

Эффективный фонд рабочего времени для по поточной линии может определен по формуле:

$$\Phi_{\text{см}} = D_{\text{см}} \cdot 60 - T_{\text{з.ри}} \cdot k, \quad k = \sum_{i=1}^m (P_{\text{ри}})_i \quad (4)$$

где  $D_{\text{см}}$  – продолжительность рабочей смены, час;  $k$  – количество единиц режущего инструмента, который необходимо заменить за смену, шт.;  $P_{\text{ри}}$  – периодичность замены  $i$ -ого режущего инструмента;  $m$  – количество типов режущего инструмента, необходимого для обработки детали;  $T_{\text{з.ри}}$  – время необходимое для замены одной единицы режущего инструмента, мин.

Этап №4. *Определение ритма поточной линии.*

Определение ритма поточной линии ( $r_{\text{пл}}$ ) производится на основе эффективного фонда рабочего времени за смену и заданного объема выпуска деталей в смену:

$$r_{\text{пл}} = \frac{\Phi_{\text{см}}}{N_{\text{см}}} \quad (5)$$

где  $N_{\text{см}}$  – объем выпуска деталей в смену, шт.

Этап №5. *Определение продолжительности выполнения автоматических циклов поточной линии.*

Цикл поточной линии может быть представлен в виде сочетания двух типов действий: вспомогательных переходов и рабочих циклов.

Длительность рабочего цикла поточной линии равна ритму выпуска и может быть описана следующей формулой:

$$R_{\text{пл}} = \sum_{i=1}^n \text{АЦ}_i + \sum_{j=1}^m (T_{\text{вс}})_j \quad (6)$$

где  $R_{\text{пл}}$  – длительность рабочего цикла поточной линии;  $\text{АЦ}_i$  – длительность  $i$ -ого автоматического цикла поточной линии;  $(T_{\text{вп}})_j$  – длительность  $j$ -ого вспомогательного перехода поточной линии;  $i$  – количество автоматических циклов;  $j$  – количество вспомогательных переходов в рабочем цикле поточной линии.

Длительность каждого вспомогательного перехода является постоянной величиной и определяется техническими параметрами отдельных элементов

поточной линии. Таким образом, длительность автоматических циклов поточной линии можно определить по формуле:

$$\sum_{i=1}^n AЦ_i = R_{пл} - \sum_{j=1}^m (T_{вс})_j \quad (7)$$

Этап №6. *Определение рациональных параметров резания для каждого технологического перехода*

Одним из главных критериев, по которым выбираются параметры резания, является величина минимизация простоя между элементами поточной линии. Данное условие можно записать в следующем виде:

$$P_{пл} = \sum_{i=1}^n P_i = \min \quad (8)$$

где  $P_{пл}$  – общая величина простоев на поточной линии;  $P_i$  – величина простоя элементами поточной линии .

Расчет рациональных параметров резания будет производиться на основе решения системы уравнений и неравенств:

$$\left\{ \begin{array}{l} P_{пл} = \sum_{i=1}^n P_i = \min \\ \sum_{j=1}^m AЦ_j = R_{пл} - \sum_{k=1}^m (T_{вс})_k \\ (V_{min}^{доп})_{1...r} \leq V_{1...r} \leq (V_{max}^{доп})_{1...r} \\ (S_{min}^{доп})_{1...r} \leq s_{1...r} \leq (S_{max}^{доп})_{1...r} \\ (t_{min}^{доп})_{1...r} \leq t_{1...tr} \leq (t_{max}^{доп})_{1...r} \end{array} \right. \quad (9)$$

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анисимов Е.Г. Экономическая политика в системе национальной безопасности Российской Федерации / Е.Г. Анисимов, В.Г. Анисимов [и др.]// Национальные приоритеты России. 2016. № 3 (21). С. 22-32.
2. Тебекин А.В. Методический подход к моделированию процессов формирования планов инновационного развития предприятий / А. В. Тебекин [и др.] // Журнал исследований по управлению. 2019. Т. 5. № 1. С. 65-72.
3. Анисимов В.Г. Стратегическое управление инновационной деятельностью: анализ, планирование, моделирование, принятия решений, организация, оценка / В.Г. Анисимов, Е.Г. Анисимов [и др.].- Санкт-Петербург, 2017.- 312 с.
4. Гасюк Д.П. О содержании сущности качества менеджмента, качества продукции и их гармонизации // В сборнике: Управление качеством в интересах устойчивого развития. Сборник материалов межвузовской научно-практической конференции. 2019. С. 31-36.
5. Анисимов В.Г. Модель поддержки принятия решений при формировании товарной стратегии и производственной программы предприятия / В.Г. Анисимов [и др.] // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экономика. 2016. № 2. С. 62-73.
6. Гасюк Д.П., Хрулев В.Л. Законы и принципы развития и функционирования системы обеспечения ракетных войск и артиллерии ракетами и боеприпасами в

современных условиях // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. 2015. № 2 (87). С. 20-22.

7. Анисимов В.Г. Анализ и оценивание эффективности инвестиционных проектов в условиях неопределенности / В.Г. Анисимов [и др.].- Москва: Военная академия Генерального штаба Вооруженных сил Российской Федерации; 2006. 288 с.

8. Гасюк Д.П., Ларькин В.В. К вопросу о современном состоянии и перспективах развития системы освоения ракетного вооружения // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. 2017. № 1 (96). С. 34-40.

9. Гасюк Д.П., Казенов И.Д. К вопросу ценообразования процессов создания образцов ракетно-артиллерийского вооружения в условиях государственного оборонного заказа // В сборнике: Проблемы технического обеспечения войск в современных условиях. Труды III Межвузовской научно-практической конференции. 2018. С. 268-272.

10. Авдеев М.М. Информационно-статистические методы в управлении микроэкономическими системами / М.М. Авдеев [и др.].- Санкт-Петербург, Тула. 2001.- 139 с.

11. Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г., Босов Д.Б. Сетевые модели и методы ресурсно-временной оптимизации в управлении инновационными проектами.- Москва, 2006.- 117 с.

12. Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г., Чварков С.В. Модель и алгоритм оптимизации решений по технической подготовке предприятия к выполнению государственного оборонного заказа // Научный вестник оборонно-промышленного комплекса России. 2020. № 4. С. 5-11.

13. Повышение эффективности технологической подготовки единичного и мелкосерийного производства на основе имитационного моделирования / С.А. Любомудров, И.Н. Хрусталева, А.А. Толстолес, А.П. Маслаков // Записки Горного института. 2019. Т. 240. С. 669-677. DOI: 10.31897/PMI.2019.6.669.

14. Computer Aided Design Systems for Solving Problems in Mechanical Engineering / S.G. Zhetessova [et. al]. - SPb.: POLYTECH-PRESS, 2020.-100 p.

15. Касяненко Е.О., Гасюк Д.П. Применение процессного подхода для оптимальной работы предприятия // В сборнике: Неделя науки СПбПУ. материалы научной конференции с международным участием. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. 2016. С. 26-29.

16. "Измерение и качество." Тарасов С.Б., Степанов С.Н./Современное машиностроение. Наука и образование. - СПб.: СПбГПУ, 2011-с 86 – 89.

17. А.А. Стрельникова, М.А. Скотникова. Контроль качества производства заготовок цементуемых деталей, работающих на трение // Неделя науки СПбПУ: материалы научной конференции с международным участием, 19-24 ноября 2019 г. Институт металлургии, машиностроения и транспорта. Ч. 2. – СПб.: Изд-во ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2020. – с.334 С. 118-121.

18. Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г., Быстров А.Г., Лобас Е.В. Метод оценивания обоснованности управленческих решений// Вестник Российской таможенной академии. 2008. № 2. С. 103-106.

19. Ильин И.В. Математические методы и инструментальные средства оценивания эффективности инвестиций в инновационные проекты / И.В. Ильин [и др.]. - Санкт-Петербург, 2018. - 289 с.

И.Н. Хрусталева, Д.П. Гасюк, Л.Г. Черных, А.А. Лаптев  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Санкт-Петербург, Россия, [irina.khrustaleva@mail.ru](mailto:irina.khrustaleva@mail.ru)

## **ВЫБОР РАЦИОНАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ ЛИНИИ СБОРКИ НА ОСНОВЕ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

### **Аннотация**

Статья посвящена вопросам оптимизации производственного цикла сборочной линии. В статье описана имитационная модель, с помощью которой решается задача повышения эффективности технологической подготовки процесса сборки. Описанная в статье модель позволяет определить оптимальную структуру сборочной линии, провести анализ возможности и целесообразности организации узловых постов сборки, а также определить рациональные значения технологических параметров сборочного процесса.

*Ключевые слова:* имитационное моделирование, сборка, узловые посты сборки, технологический маршрут обработки, технологический переход.

### **Введение**

В условиях современной экономики выбор оптимальной производственной структуры и параметров технологического процесса является одной из основных задач подготовки производства, который непосредственно влияет на эффективность деятельности машиностроительного предприятия [1 - 9]. Наиболее эффективным методом определения оптимальной структуры производственного участка является имитационное моделирование, основой которого является имитационная модель, содержащая математическое описание отдельных элементов технологического процесса и взаимосвязь между ними [10 - 17].

В условиях крупносерийного и массового производства наиболее распространённой организационной формой является: однопредметные и многопредметные поточные линии, основной характеристикой которых является такт выпуска продукции.

Задачей исследования является разработка методики определения выбора рационально структуры поточной линии сборочного производства. Данные исследования позволяют проводить объективный анализ функционирования производственной системы и прогнозирование ее работы в последующие временные интервалы.

### **Описание имитационной модели**

В качестве целевых параметров, на основе которых производится выбор рациональной структуры производственной линии, были выбраны: технологическая себестоимость и производительность [18 - 19].

Управляемыми параметрами в имитационной модели являются квалификация производственных рабочих, технические параметры оборудования и технологической оснастки, методы контроля [20 - 23].

Алгоритм, описывающий работу имитационной модели, представлена на рисунке 1.

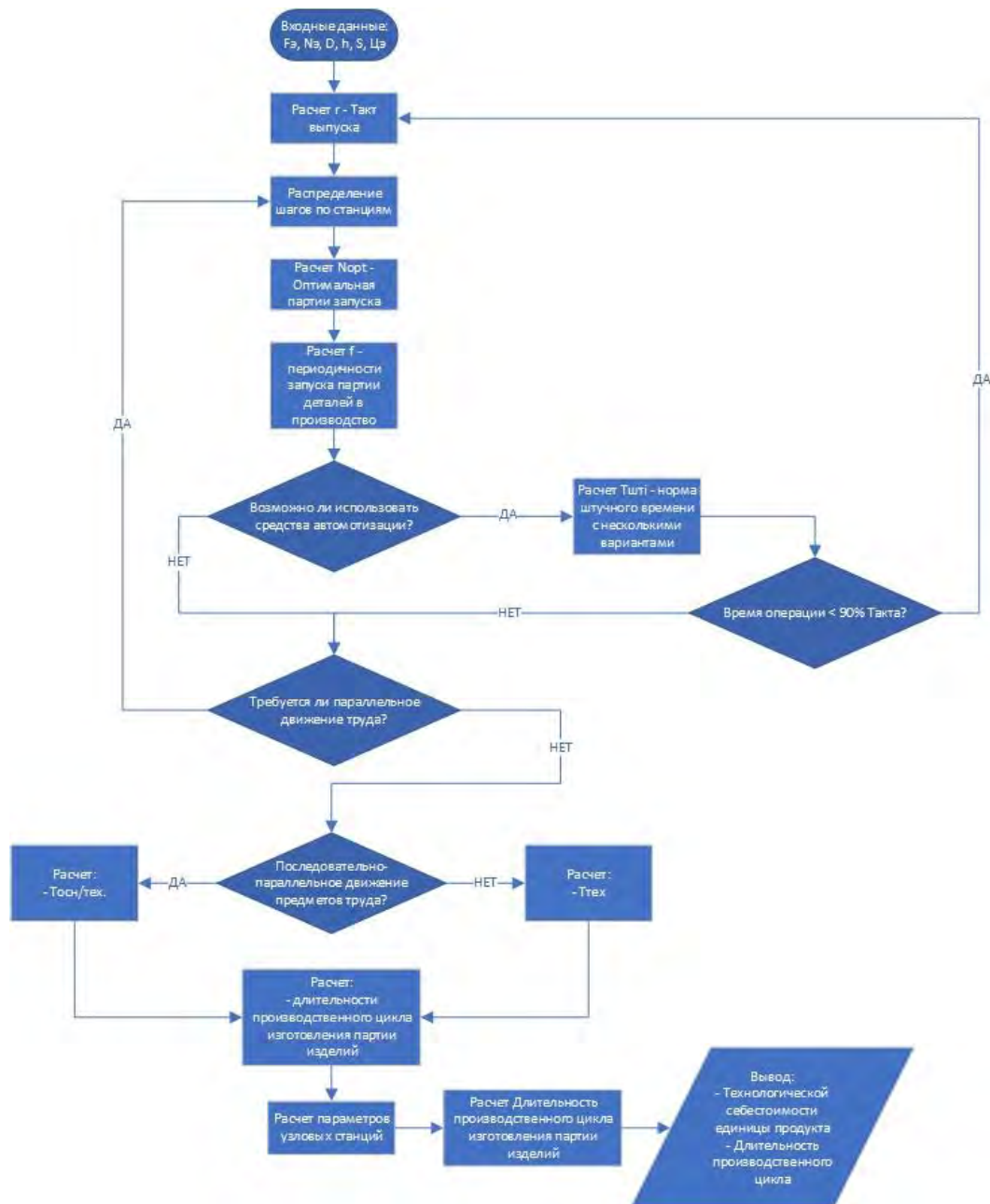


Рисунок 1 – Алгоритм работы имитационной модели

Определение значений отдельных параметров поточной линии производится по следующим формулам:

Такт выпуска:

$$r = \frac{F_3}{N_3} \quad (1)$$

$$F_3 = (D_p \cdot T_{cm} \cdot K_{cm} - T_{сум}) \cdot \left(1 - \frac{p_{пр}}{100}\right) \quad (2)$$



$F_э$  - эффективный фонд времени за плановый период, мин;  $N_э$  - количество изделий, подлежащих выпуску в плановый период времени, шт.;  $D_p$  - число расчетных дней в рабочем периоде;  $T_{см}$  - продолжительность рабочей смены, мин;  $K_{см}$  - коэффициент сменности работ;  $T_{сум}$  - суммарное время за период сокращения рабочего времени в праздничные дни, мин;  $p_{пр}$  - процент времени планового технического обслуживания по отношению к номинальному фонду времени.

Оптимальная партии запуска:

$$n_{opt} = \sqrt{\frac{2 \cdot D \cdot S}{h}} \quad (3)$$

$D$  - объем потребления ресурса (необходимое количество деталей/изделий) в плановом периоде;  $h$  - затраты, обусловленные хранением единицы запаса в течение всего планового периода;  $S$  - затраты на переналадку технологического оборудования.

Периодичности запуска партии деталей в производство:

$$f = \frac{D}{n_{opt}} \quad (4)$$

где  $D$  - объем потребления ресурса (необходимое количество деталей/изделий) в плановом периоде;  $n_{opt}$  - оптимальная партия запуска, шт.

Длительность изготовления партии деталей:

$$T_{пар} = T_{тех} + T_{п.з.} \quad (5)$$

где  $T_{тех}$  - длительность производственного цикла изготовления партии изделий, мин.;  $T_{п.з.}$  - подготовительно-заключительное время, шт.;

Последовательно-параллельное движение предметов труда:

$$T_{тех.} = n_{opt} \cdot \sum_{i=1}^m \frac{(T_{шт})_i}{C_i} - (n_{opt} - p) \cdot \sum_{i=1}^{m-1} \frac{(T_{шт})_{ki}}{C_i} \quad (6)$$

Параллельное движение предметов:

$$T_{тех.} = (n_{opt} - p) \cdot \frac{(T_{шт})_{imax}}{C_i} + p \cdot \sum_{i=1}^m \frac{(T_{шт})_{ki}}{C_i} \quad (7)$$

$m$  - число операций в технологическом процессе;  $C_i$  - принятое число рабочих мест (станков) на  $i$ -й операции, шт;  $(T_{шт})_i$  - норма штучного времени на  $i$ -й операции, мин.;  $p$  - размер транспортной (передаточной) партии, шт;  $(T_{шт})_{ki}$  - наименьшая норма времени между  $k$ -й парой смежных операций с учетом количества единиц оборудования, мин.

$$T_{шт} = (T_o + T_B) \cdot \left(1 + \frac{\alpha_{орг} + \alpha_{отл} + \alpha_{пт}}{100}\right) + \frac{\alpha_{тех}}{100} \quad (8)$$

$\alpha_{орг}$  – время организационного обслуживания рабочего места, % от оперативного времени;  $\alpha_{отл}$  – время на отдых личные надобности, % от оперативного времени;  $\alpha_{пт}$  – время перерывов, обусловленных технологией и организацией производства, % от оперативного времени;  $T_0$  – основное время сборки, мин;  $T_в$  – вспомогательное время, мин.

Для сокращения длительности производственного цикла при проектировании сборочной линии в рамках имитационной модели реализован алгоритм расчета параметров узловых постов сборки. В соответствии с данным алгоритмом на первом этапе производится формирование структуры изделия с учетом иерархии сборочных единиц (рис. 2).

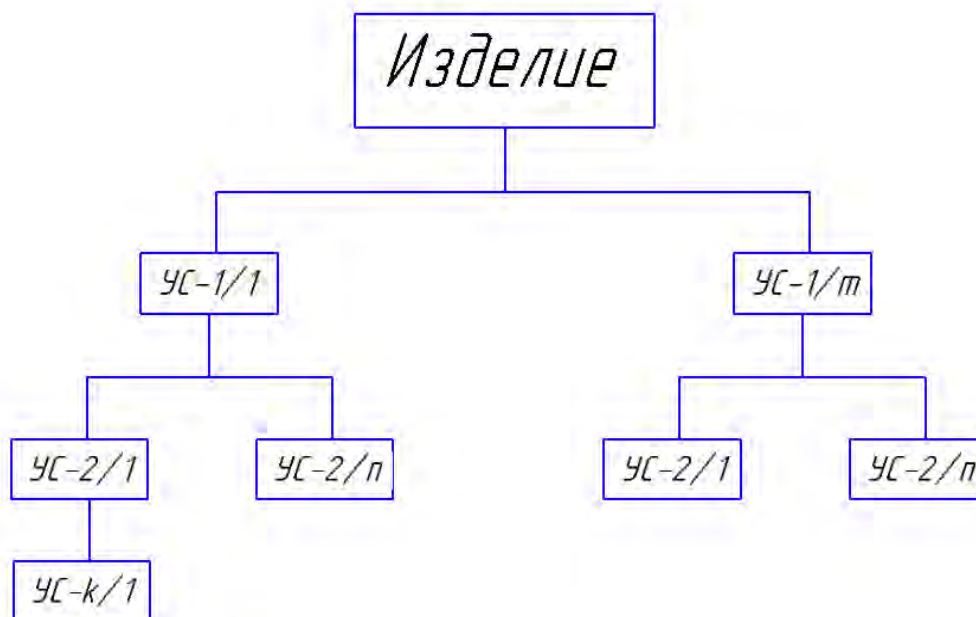


Рисунок 2 – Схема построения иерархии сборочных единиц

После определения иерархии сборочных единиц производится расчет следующих параметров:

Суммарного времени изготовления подборок каждого уровня

$$T^{сум} = \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m t_{ij} \quad (9)$$

$j$  – номер уровня под сборки;  $n$  – количество подборок  $j$ -ого уровня;  $i$  – номер под сборки;  $m$  – количество подборок  $j$ -ого уровня;  $t_i^m$  – время изготовления  $m$ -ой под сборки  $i$ -ого уровня.

Определение минимального количества постов узловой сборки

$$n_{yc} = \frac{n_{opt} \cdot T_{п/сб}^{сум}}{F_э} \quad (10)$$

$T^{сум}$  – суммарное время изготовления подборок для одного изделия, мин;  $n_{opt}$  – оптимальная партия запуска, шт.;  $F_э$  – эффективный фонд рабочего времени за период, ч.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анисимов Е.Г. Экономическая политика в системе национальной безопасности Российской Федерации / Е.Г. Анисимов, В.Г. Анисимов [и др.]// Национальные приоритеты России. 2016. № 3 (21). С. 22-32.
2. Гасюк Д.П. О содержании сущности качества менеджмента, качества продукции и их гармонизации // В сборнике: Управление качеством в интересах устойчивого развития. Сборник материалов межвузовской научно-практической конференции. 2019. С. 31-36.
3. Тебекин А.В. Методический подход к моделированию процессов формирования планов инновационного развития предприятий / А. В. Тебекин [и др.] // Журнал исследований по управлению. 2019. Т. 5. № 1. С. 65-72.
4. Анисимов В.Г. Стратегическое управление инновационной деятельностью: анализ, планирование, моделирование, принятия решений, организация, оценка / В.Г. Анисимов, Е.Г. Анисимов [и др.].- Санкт-Петербург, 2017.- 312 с.
5. Гасюк Д.П., Хрулев В.Л. Законы и принципы развития и функционирования системы обеспечения ракетных войск и артиллерии ракетами и боеприпасами в современных условиях // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. 2015. № 2 (87). С. 20-22.
6. Анисимов В.Г. Модель поддержки принятия решений при формировании товарной стратегии и производственной программы предприятия / В.Г. Анисимов[и др.] // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экономика. 2016. № 2. С. 62-73.
7. Гасюк Д.П., Ларькин В.В. К вопросу о современном состоянии и перспективах развития системы освоения ракетного вооружения // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. 2017. № 1 (96). С. 34-40.
8. Анисимов В.Г. Анализ и оценивание эффективности инвестиционных проектов в условиях неопределенности / В.Г. Анисимов [и др.].- Москва: Военная академия Генерального штаба Вооруженных сил Российской Федерации; 2006. 288 с.
9. Гасюк Д.П., Казенов И.Д. К вопросу ценообразования процессов создания образцов ракетно-артиллерийского вооружения в условиях государственного оборонного заказа // В сборнике: Проблемы технического обеспечения войск в современных условиях. Труды III Межвузовской научно-практической конференции. 2018. С. 268-272.
10. Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г., Босов Д.Б. Сетевые модели и методы ресурсно-временной оптимизации в управлении инновационными проектами.- Москва, 2006.- 117 с.
11. Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г., Чварков С.В. Модель и алгоритм оптимизации решений по технической подготовке предприятия к выполнению государственного оборонного заказа // Научный вестник оборонно-промышленного комплекса России. 2020. № 4. С. 5-11.
12. Авдеев М.М. Информационно-статистические методы в управлении микроэкономическими системами / М.М. Авдеев [и др.].- Санкт-Петербург, Тула. 2001.- 139 с.
13. Касяненко Е.О., Гасюк Д.П. Применение процессного подхода для оптимальной работы предприятия // В сборнике: Неделя науки СПбПУ. материалы научной конференции с международным участием. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. 2016. С. 26-29.

14. Коханова Н.М., Малькова А.Л. Выбор структуры производственных функций на основе синтеза безальтернативных статистических гипотез // Вестник Российской таможенной академии. 2008. № 4. С. 74-79.
15. Анисимов Е.Г., Анисимов В.Г., Солохов И.В. Проблемы научно-методического обеспечения межведомственного информационного взаимодействия // Военная мысль. 2017. № 12. С. 45-51.
16. I.N. Khrustaleva, S.A. Lyubomudrov, L.G. Chernykh, S.N. Stepanov, T.A. Larionova. Automating production engineering for custom and small-batch production on the basis of simulation modeling // Journal of Physics: Conference Series. - 2021. - Vol. 1753. - P. 012047
17. И.Н. Хрусталева, С.А. Любомудров, П.И. Романов. Имитационная модель технологической подготовки производства цеха механической обработки // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. - 2017. - Т. 23. - № 2. - С. 215–222. DOI: 10.18721/JEST.230219.
18. Глухов В.В., Гасюк Д.П. Управление качеством.- Санкт-Петербург, 2013. 399 с.
19. Гасюк Д.П., Хрулев В.Л. Законы и принципы развития и функционирования системы обеспечения ракетных войск и артиллерии ракетами и боеприпасами в современных условиях // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. 2015. № 2 (87). С. 20-22.
20. Гасюк Д.П., Ларькин В.В. К вопросу расчета времени освоения образца ракетного вооружения // В сборнике: Проблемы технического обеспечения войск в современных условиях: Труды II межвузовской научно-практической конференции. 2017. С. 228-232.
21. Косова В.А., Гасюк Д.П. К вопросу анализа условий разработки технологических процессов машиностроительных предприятий // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2021. № 2. С. 655-658.
22. Федотова А.М., Гасюк Д.П. Анализ рисков возникновения проблем с качеством технологической подготовки производства и разработка мероприятий по их снижению в условиях АО "НИИЭФА" // Металлообработка. 2021. № 1 (121). С. 50-54.
23. Текстура поверхности и ее измерение. Шероховатость, волнистость, профиль, топография / А.Н. Табенкин, С.Б. Тарасов, С. Н. Степанов; под редакцией Н. А. Табачниковой; Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. — Санкт-Петербург: Изд-во Политехн. ун-та, 2018. 265 стр.

Я.Ю. Бровкина, Д.Н. Шабалин  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Санкт-Петербург, Россия, [zoom87@list.ru](mailto:zoom87@list.ru)

## МОДЕЛЬ ПЛОТНОСТИ ЗЕРЕН АЛМАЗОСОДЕРЖАЩЕГО ПРОСТРАНСТВА КРУГА НА ГЛУБИНЕ ПРОФИЛЯ

### Аннотация

Эффективность шлифования алмазными кругами заготовок из технической керамики зависит от износа вершин зерен, плотности вершин зерен  $N_{[0,\Delta_2]}$ , шт/см<sup>2</sup>, глубины  $\Delta_2$  погружения зерен круга в материал заготовки при шлифовании. Для возможности прогнозирования производительности процесса шлифования и работоспособности шлифовальных инструментов, необходима математическая модель плотности зерен алмазосодержащего пространства круга на глубине профиля.

*Ключевые слова:* керамика, нитрид кремния, режущие вершины зерен, алмазное шлифование, алмазосодержащее пространство, технология механической обработки, коэффициент трения.

### Введение

Керамические материалы нашли применение в различных областях деятельности, при этом особую значимость они имеют в авиационной и космической промышленности [1 - 4].

Техническая керамика – это искусственным образом синтезированные материалы различных фазовых и химических составов, благодаря чему они имеют ряд специфических свойств. Основными элементами технической керамики являются оксиды и соединения металлов (бескислородные). Большинство ее видов имеют спекшуюся структуру и поликристаллическое строение [5].

В настоящее время наиболее распространенным способом обработки керамических заготовок является процесс шлифования инструментом из природных и синтетических алмазов. Эффективность шлифования алмазными кругами в значительной степени зависит от используемой модели оборудования, метода шлифования (традиционное или скоростное), характеристики алмазного круга, состояния его режущей поверхности.

### Цель работы

Разработка математической модели плотности зерен алмазосодержащего пространства круга на глубине профиля.

Абразивные зерна имеют различную длину, ширину и расположены в связке по отношению к режущей поверхности случайным образом, как показано на рис. 1. От числа режущих вершин зерен и высоты их выступания из связки круга зависит производительность при обработке твердых хрупких материалов [5, 6].

По мере затупления, при шлифовании с постоянной силой прижима круга к поверхности заготовок режущая способность (см<sup>3</sup>/мин), круга падает в 2–3 раза [7].

На рис. 2 приведены в качестве примера расчетные значения плотности зерен на глубинах до 12–24 мкм абразивного профиля кругов зернистостью 40/28, 80/63, 125/100. На графики нанесены эмпирические точки. Расхождение расчетных и

эмпирических значений не превышает 7 %. Плотность зерен по глубине абразивного профиля (рис. 2) нарастает. У кругов меньшей зернистости интенсивность нарастания выше. Отношение плотностей вершин зерен  $[\Delta 1, \Delta 2]$  максимально затупленных кругов зернистостью 40/28...125/100 к плотности вершин зерен в полной высоте рельефа  $[0, \Delta 2]$  равно  $N[\Delta 1, \Delta 2] / N[0, \Delta 2] = 0,018 \div 0,021$ , где  $\Delta 2 - \Delta 1 = \text{Ин}$ ,  $\Delta 1$  — приработка (износ) вершин зерен до начала шлифования,  $\Delta 2$  — износ  $\text{Ин}$  вершин зерен режущего профиля круга за период шлифования плановой группы заготовок.

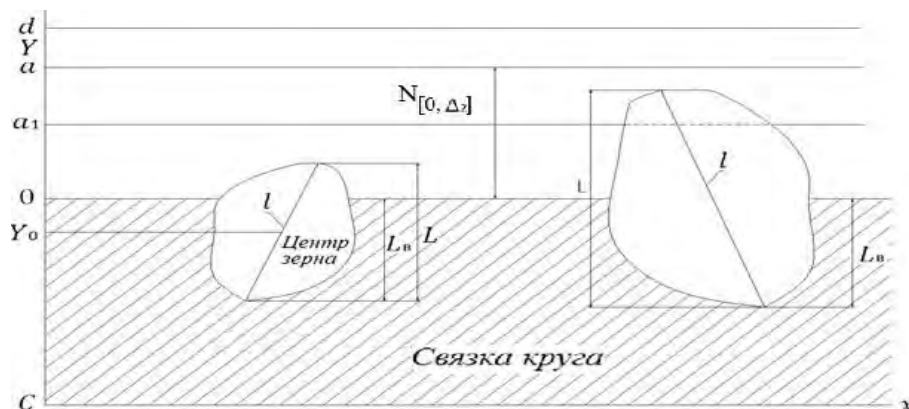


Рисунок 1 – Схема расположения зерен над поверхностью связки после правки круга:  $\alpha 1$  — координата положения плоскости предельного износа вершин зерен за период стойкости круга.

В процессе исследовательской работы, проведения многочисленных испытаний и обработки данных, была получена следующая математическая модель плотности зерен алмазосодержащего пространства круга на глубине профиля, представляет собой систему уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} F_l(x) = (1/\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_l) \cdot \int_{-\infty}^x \exp^{-1/2(\frac{t-\bar{l}}{\sigma_l})^2} \cdot dt \\ F_L(x) = F_l(x) + F_1(x) \\ F_1(x) = k(1/\sqrt{1-\alpha^2}) \cdot \int_x^{x/\alpha} \sqrt{(x/t)^2 + \alpha^2} \cdot \exp^{-1/2(\frac{t-\bar{l}}{\sigma_l})^2} \cdot dt \\ N_{[\Delta 1, \Delta 2]} = N_{[0, \Delta 2]} - N_{[0, \Delta 1]} = N_{[1]} \cdot (1 - \varepsilon) \cdot \int_{\frac{\Delta 1}{1-\varepsilon}}^{\frac{\Delta 2}{1-\varepsilon}} [1 - F_L(x)] \cdot dx \end{array} \right. \quad (1)$$

Исходными данными, для которой являются:  $\sigma_1$ - среднеквадратическое отклонение длины зерна,  $\bar{l}$  –длина зерна основной фракции,  $\sigma_1 \sim 0,127\bar{l}$ ,  $t$  – глубина внедрения,  $\varepsilon = 0,5$ ,  $N_{[1]}$  – число зерен в 1 мм<sup>3</sup> алмазосодержащего пространства.

### Вывод

Приведенная математическая модель позволяет вычислить высоту  $\Delta 2$  выступания вершин зерен из связки алмазного круга, плотность вершин зерен  $N[\Delta 1, \Delta 2]$ , шт/см<sup>2</sup> в слое  $[0, \Delta 2]$  или через каждый микрон в слое от  $\Delta 1$  до  $\Delta 2$ . Однако необходимо учитывать, что после 1-2 минут шлифования при постоянной силе прижима круга к поверхности заготовок самые высокие зерна над связкой изнашиваются на 3-8 мкм в зависимости от твердости и прочности шлифуемого материала заготовок. При этом количество зерен круга на площадке контакта с

материалом заготовки резко возрастает, давление на площадках контакта и температура нагрева вершин алмазных зерен падает, и, следовательно, скорость износа алмазов уменьшается.

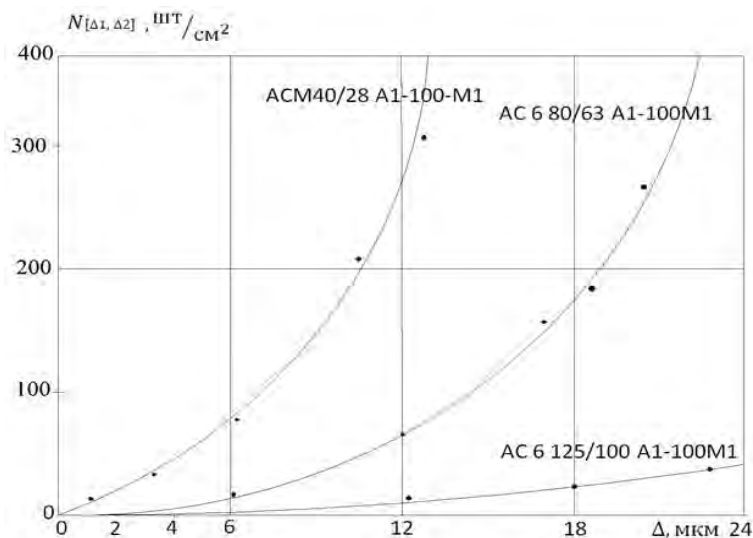


Рисунок 2 –Плотность зерен  $N [\Delta_1, \Delta_2]$  в слое  $\Delta_1, \Delta_2$  у кругов разной зернистости, где  $\Delta_1$ – начальный износ вершин зерен при правке круга;  $\Delta_2$  – глубина внедрения вершин зерен заготовки

Глубина внедрения зерен круга в материал заготовок уменьшается, производительность съема припуска снижается в схеме шлифования с постоянной силой прижима круга к поверхности заготовок. Важно заранее вычислить время, через которое скорость съема материала заготовки снизится в 3-4 раза. После этого алмазный круг необходимо править.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анисимов Е.Г. Экономическая политика в системе национальной безопасности Российской Федерации / Е.Г. Анисимов, В.Г. Анисимов [и др.]// Национальные приоритеты России. 2016. № 3 (21). С. 22-32.
2. Гасюк Д.П., Ларькин В.В. К вопросу о современном состоянии и перспективах развития системы освоения ракетного вооружения // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. 2017. № 1 (96). С. 34-40.
3. Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г., Гарькушев А.Ю., Проценко Д.С. Модель и метод оптимизации плана подготовки космических систем // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. 2015. № 4 (89). С. 34-39.
4. Гасюк Д.П., Хрулев В.Л. Законы и принципы развития и функционирования системы обеспечения ракетных войск и артиллерии ракетами и боеприпасами в современных условиях // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. 2015. № 2 (87). С. 20-22.
5. Никитков, Н. В., Ковеленов, Н. Ю., Шабалин, Д. Н. Расчет режимов резания при алмазном шлифовании заготовок из твердых хрупких материалов // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 2012. № 3–2 (154). С. 155–159. [Calculation of cutting modes in diamond grinding of blanks made of hard brittle materials // N.V. Nikitkov, N.Yu. Kovelenuv, D.N. Shabalin. Scientific and technical statements of St. Petersburg state Polytechnic University. 2012. N 3–2 (154). P. 155–159.]

6. Мильштейн; под общей редакцией В. Н. Бакуль. Киев: Техніка, 1971. 208 с. [A Guide to diamond processing, metal-cutting tools / V. N. Bakool, I. P. Zakharenko, J. A. Conkin, M. Z. Milstein // Under the General editorship V. N. Bakul. Kiev: Technika, 1971. 208 p.]

7. Абразивная и алмазная обработка материалов: справочник / Под ред. Н. В. Новикова. Киев: Науковадумка, 1981. 121 с. [Abrasive and diamond processing of materials: Directory / Ed. N. V. Novikov. Kiev: Naukova Dumka, 1981. 121 p.] 3. Справочник по алмазной обработке металлорежущего инструмента / В. Н. Бакуль, И. П. Захаренко, Я. А. Кункин, М.



Намбудри Танудж, С.Н.Степанов  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Санкт-Петербург, Россия, [tanuj.namboodri@gmail.com](mailto:tanuj.namboodri@gmail.com)

## ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИИ БАМПЕРА АВТОМОБИЛЯ НА ОСНОВЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

### **Аннотация**

В данной работе, на основе компьютерного моделирования, проводились исследования по деформации бамперов, изготовленных из двух разных материалов, конструкционной стали IF-180 и ударопрочного пластика полистирола высокой жёсткости.

*Ключевые слова:* бампер, математическое моделирование, энергия, полистирол, конструкционная сталь.

### **Введение**

Увеличение количества автомобилей увеличивает несчастные случаи, а несчастные случаи увеличивают травматизм, а в некоторых случаях и смертность на дорогах [1 -4].

Помимо устройств пассивной и активной безопасности, большое внимание уделяется жёсткости кузова и энергопоглощающих свойств отдельных элементов его конструкции. Обычно, при дорожно-транспортных происшествиях, бампер первым воспринимает всю силу удара. Поэтому, исследование энергопоглощающих свойств бампера автомобиля является актуальной задачей.

Целью работы является создание конструкции и выбор материала бампера обладающего максимально возможным энергопоглощением при лобовом столкновении.

### **Методы**

Данные исследования проводились в два этапа, в следующей последовательности:

1. Проектирование имитационной модели бампера с использованием AutodeskFusion 360, и железобетонного столба.

2. Моделирование в ANSYS (ExplicitDynamics) динамики деформации бампера из конструкционной стали IF-180 и ударопрочного полистирола на скорости 50 км/ч. с исследованием деформации и энергопоглощенная [5].

Для данной работы, в качестве имитационной модели, использовался бампер автомобиля марки Dodge. Материалом для бампера была выбрана конструкционной сталь IF-180 и пластиковый полистирол.

Выбранные, в качестве опытных образцов, материалы имеют следующие характеристики, представленные в табл.1.

Исходные данные для расчетов имитационной модели исследуемых бамперов автомобиля (рис.1) представлены в табл.2.

В соответствии с исходными данными, моделирование краш-теста производилось в программе Ansys (ExplicitDynamics), где автомобиль с испытуемым бампером сталкивался с железобетонным столбом, в результате были получены

максимальная, минимальная и средняя деформация бампера, а также анализ энергии удара поглощения бампером, в течение  $3 \cdot 10^{-3}$  секунд [6]. Вследствие чего, было отмечено, что чем больше энергии поглощается бампером, тем меньшему повреждению других частей транспортного средства и безопаснее для пассажиров и пешеходов.

Таблица 1 – Механические свойства материалов

Материал	Плотность Материал	Модуль Юнга	Коэффициент Пуассона	Модуль объема	Модуль сдвига
Полистирол ударопрочный	1045 кг/м <sup>3</sup>	1720 МПа	0,4074	3095,8 МПа	611,06 МПа
Конструкционная сталь IF-180	7850 кг/м <sup>3</sup>	200 ГПа	0,3	166,67 ГПа	76,923 ГПа

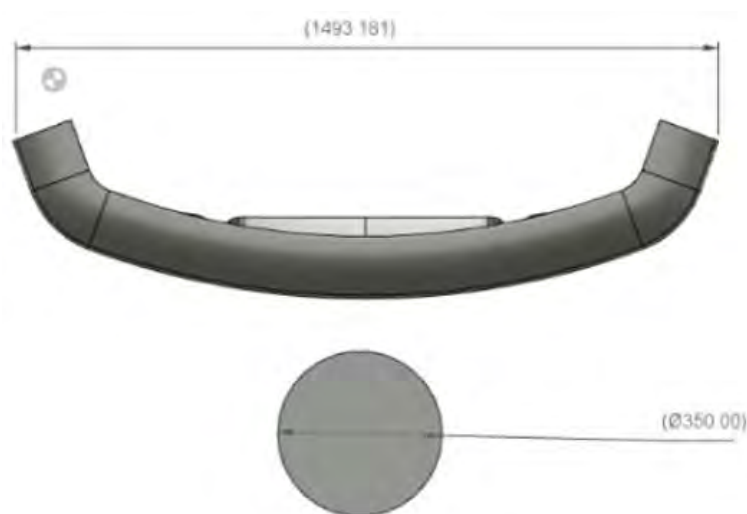


Рисунок 1— Имитационная модель бампера

Таблица 2 – Исходные данные для расчетов

Модуль	Бампер
Материал 1	Полистирол ударопрочный
Материал 2	Конструкционная сталь
Длина	1493,181 мм
Ширина	350 мм
Высота	300 мм
Вес Пластиковый полистирол Ударопрочный бампер	3,3235 кг
Вес Конструкционная сталь Бампер	24,966 кг
Вес автомобиля (прибл.) с полистиролом Ударопрочный бампер (5 пассажиров):	1684 кг
Вес автомобиля (прибл.) с конструкционной сталью (5 пассажиров):	1705 кг
Вес автомобиля (прибл.) с полистиролом Ударопрочный бампер (1 пассажир):	1384 кг
Вес автомобиля (прибл.) с конструкционной сталью (1 пассажир):	1405 кг
Скорость	50 км/ч

## Результаты и обсуждение

Поглощение энергии формулируется уравнением:

$$EA = \int_0^{\delta} F(z) dz \quad (1)$$

где  $F$  – сила столкновения или сила удара;  $\delta$  – деформация.

Деформация прямо пропорциональна поглощению энергии, чем больше деформация, тем больше энергии поглощается бампером.

В результате расчетов с использованием вышеописанного уравнения были построены графики зависимостей кинетической и поглощенной энергий от времени деформации бамперов из двух исследуемых материалов: ударопрочного пластика полистирола и конструкционной стали IF-180 (рис.2, рис.3).

На рисунке 2 представлены данные о кинетической энергии столкновения автомобиля с бампером из ударопрочного полистирола и энергии поглощения бампером.

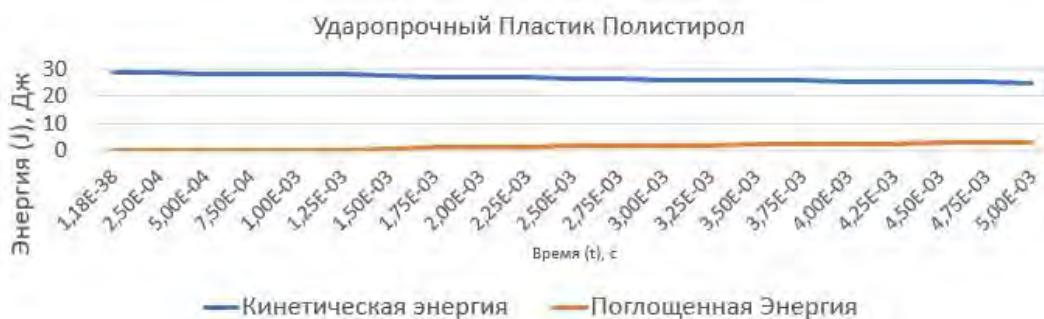


Рисунок 2 – Результаты расчетов кинетической энергии и энергии, поглощенной бампером ударопрочного полистирола

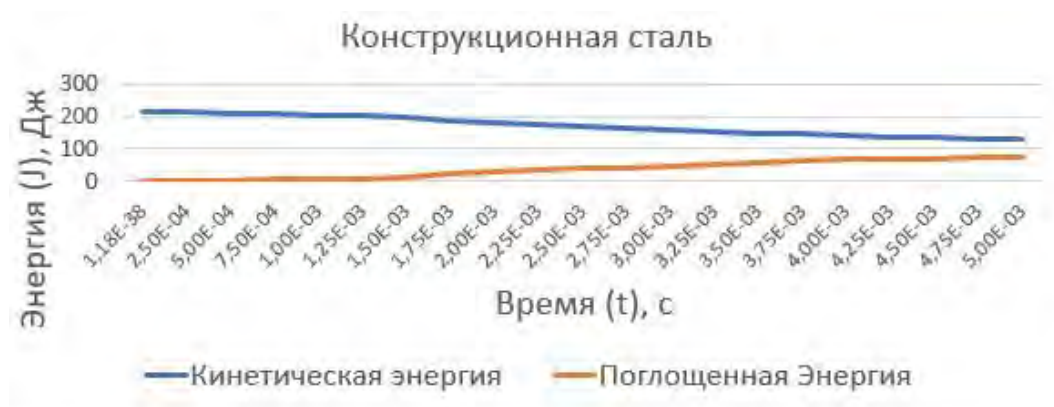


Рисунок 3 – Результаты расчетов кинетической энергии и энергии, поглощенной бампером из конструкционной стали IF-180

На рисунке 3 представлены данные о кинетической энергии столкновения автомобиля с бампером из конструкционной стали IF-180 и энергии поглощения бампером.

## Заключение

При компьютерном моделировании краш-теста установлено, что максимальная деформация в пластиковом полистирольном ударопрочном бампере выше, чем у

бампера из конструкционной стали IF-180, следовательно, выше энергия поглощения. Таким образом, бампер из ударопрочного полистирола, установленный на автомобиле более безопасный для пассажиров и пешеходов, чем бампер из конструкционной стали IF-180. Кроме этого, бампер из ударопрочного полистирола весит в 8 раз меньше, чем бампер из конструкционной стальной стали IF-180, более подходит для легкового автомобиля и имеет еще много преимуществ.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Губенко А.В., Сазыкин А.М. Теоретические основы создания систем поддержки принятия решений в интересах комплексной транспортной безопасности // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. 2015. № 3 (88). С. 10-15.
2. Анисимов А.В., Анисимов А.Е., Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г., Барабанов В.В. Проблема сравнения и выбора варианта построения системы безопасности // Актуальные проблемы защиты и безопасности: Труды Четвертой Всероссийской научно-практической конференции. 2001.- С. 348-351.
3. Сауренко Т.Н., Математические модели прогнозирования экологической угрозы техногенных аварий и катастроф в составе интегрированных систем безопасности региона / Т.Н. Сауренко [и др.] // Технологии гражданской безопасности. 2019. Т. 16. № 3 (61). С. 62-67.
4. Богоева Е.М., Гарькушев А.Ю., Сазыкин А.М. Основы построения моделей интеллектуализации в системах безопасности // Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. 2014. № 9-10 (75-76). С. 22-27.
5. Parameters of Side Intrusion Beam Affecting on Crash Force Efficiency During Impact. Sanjay D. Patil, Vijay Patil Y. Shape, Dheeraj S. Lengare, Arvind J. Bhosale, Rashtrapal B. Teltumade
6. Crashworthiness design of vehicle side door beams under low-speed pole side impacts”, Thin-Walled Structures, 67 (2013) 25–33. AliGhadianlou, ShahrirBinAbdullah.

М.А. Пудовкин, С.А. Любомудров  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Санкт-Петербург, Россия, [max.maxim-pudovkin@yandex.ru](mailto:max.maxim-pudovkin@yandex.ru)

## SMART-ИНСТРУМЕНТ В «ИНДУСТРИИ 4.0»

### Аннотация

В этой статье представлены инновационные концепции контроля и диагностики процесса резания на основе *smart* режущего инструмента, основанного на силе резания, способ управления по термо-эдс, и метод управления по вибрациям, а также инструмент с управлением по температуре.

*Ключевые слова:* резание, инструмент, обработка, датчик, сигнал, температура, износ, измерение, точность.

### Введение

В последние годы «Индустрия 4.0» приобретает все большее значение для промышленности. Сегодняшние основные задачи для производственных компаний машиностроительной промышленности очевидны: оптимизация производства, управление и отслеживание информации для удовлетворения новых требований безопасности и устойчивости [1 - 7]. В частности, для обеспечения таких требований в процессе механической обработки необходим сбор и обмен данными, которые позволят определить текущие параметры в зоне резания.

*Smart* инструменты и *smart* обработка обладают огромным потенциалом и привлекают внимание как одна из технологий точной обработки следующего поколения, особенно в контексте Индустрии 4.0

### 1 Обзор методов мониторинга условий процесса резания

В современном машиностроении прослеживается тенденция обработки деталей с постоянно растущими требованиями к точности размеров, формы и шероховатости поверхности. При высокоточной обработке позиционирование режущего инструмента является одним из определяющих точность факторов. Обычно это выполняется «пассивным» способом, т. е. наладкой, где нет непосредственного измерения положения инструмента и условий процесса резания.

На данный момент существуют некоторые методы мониторинга процессов при помощи сенсорных технологий. Изменения условий процесса резания во многом связаны с износом инструмента, температурными деформациями, вибрациями и другими условиями процесса и, следовательно, все это сказывается на обработке [8 - 10]. Однако приведенные методы сенсорного мониторинга как и классические трехкомпонентные динамометры [11] имеют некоторые ограничения в их промышленном применении, такие как их стоимость и надежность.

Поэтому для высокоточной обработки и контроля процесса резания необходимо применять новые сенсорные технологии. Для таких высокоточных процессов важно использовать *smart* режущие инструменты для выполнения процессов с превентивным регулированием, чтобы справиться с динамикой обработки, изменениями процесса и сложностью.

## 2 Smart - интеллектуальные системы

Интеллектуальные режущие инструменты созданы с датчиками активного контроля процесса, что, вероятно, приведет к улучшению качества деталей и шероховатости поверхности, снижению производственных затрат и повышению производительности.

Можно выделить 4 основных направления в разработке *smart* инструментов по типам. К ним относятся *smart* режущий инструмент, основанный на измерении силы резания, *smart*-инструмент, с регулированием по температуре, термо-эдс и уровню вибраций. Интеллектуальная обработка имеет следующие преимущества:

1. Улучшение чистоты поверхности компонентов;
2. Увеличение срока службы режущего инструмента;
3. Обработка нежестких заготовок (тонкостенные валы, полые цилиндры);
4. Интеграция в процесс машинного обучения;
5. Динамическое определение процесса резания;
6. Совместимость с высокоавтоматизированными средами ЧПУ;
7. Саморегулировка позиционирования.

## 3 Smart инструменты с управлением по силе

Силу резания обычно можно измерить тремя способами: с помощью шунта силы, прямого измерения силы и косвенного измерения силы. Что касается метода прямого измерения силы резания, датчик монтируется непосредственно на пути силы, чтобы измерять всю силу процесса. И наоборот, косвенный метод измерения силы измеряет силу через деформацию, пропорциональную технологической силе [12]. При шунтировании измеряется часть силы резания, проходящей через датчик.

### 3.1 На основе пьезоэлектрической пленки

В основе *smart*-инструмента такого типа (рис. 1) лежит косвенное измерение силы через шунт в виде пьезоэлектрика соответственно [13].

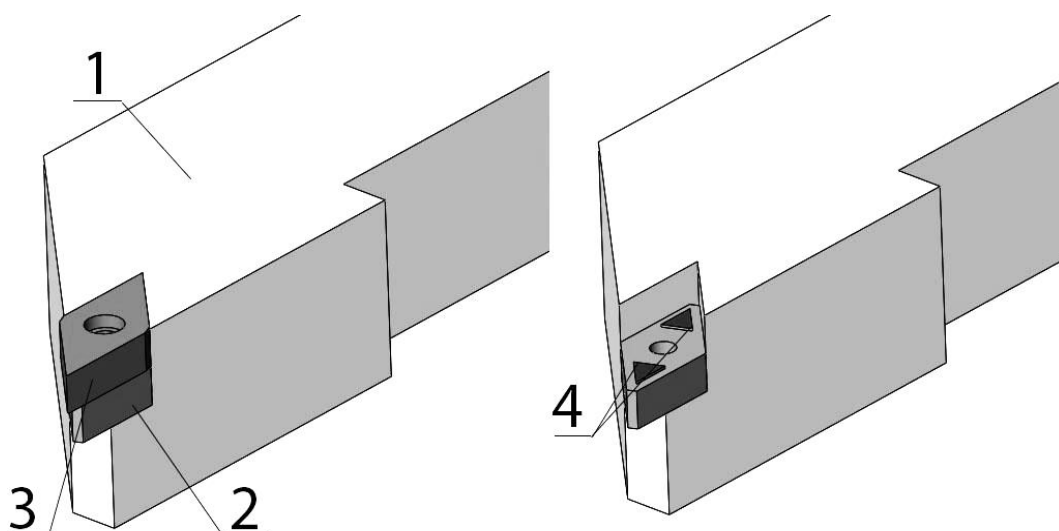


Рисунок 1 – *Smart* инструмент с шунтированным измерением силы  
1 – державка; 2 – проставка; 3 – режущая пластинка; 4 – пьезоэлектрик

*Smart* режущий инструмент этого типа состоит из режущей пластины, однослойной пьезоэлектрической пленки, металлической прокладки и двух кусков изоляционной ленты. Он включает:

- Прокладка в качестве выходного электрода пьезоэлектрического датчика;
- Пьезоэлектрическая пленка для измерения ортогональной силы резания;
- Встроенный датчик, между режущим инструментом и проставкой;
- Проволока и часть металлической прокладки.

### 3.2 На основе поверхностно-акустического (SAW) сенсора

Сенсорная технология *SAW* потенциально может быть применена для измерения силы резания косвенным методом.

Датчики размещаются в точках, где происходит максимальное напряжение. Поскольку взаимосвязь между силой резания и деформацией, возникающей под ее действием, определена, датчик *SAW* может измерять силу.

Датчик *SAW* часто состоит из большого количества электродов, то есть встречно-цифровых преобразователей (*IDT*), изготовленных в виде гребенки на верхней поверхности пьезоэлектрического материала, такого как кварц и ниобат лития. *IDT* предназначены для преобразования механической энергии в электрическую и служат для обнаружения поверхностных акустических волн. Интеграция такого способа в инструмент представлена на рис. 2.

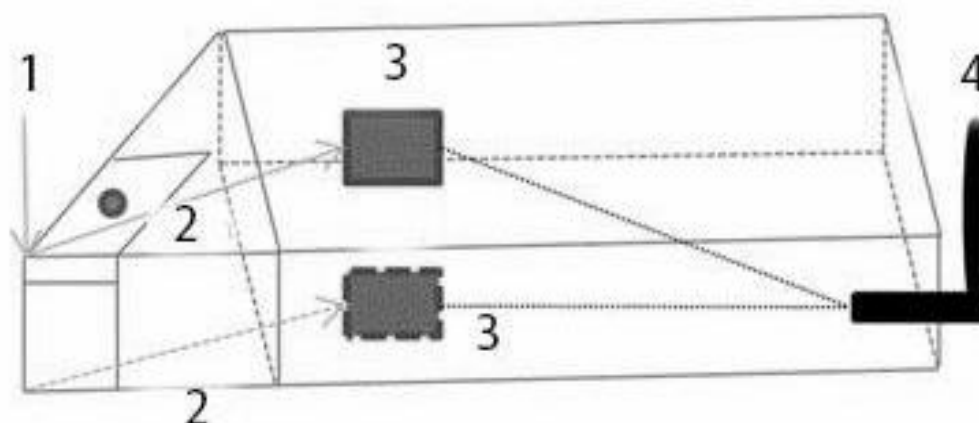


Рисунок 2 – *Smart* инструмент с *SAW* сенсором  
1 – сила резания, 2 – напряжение, 3 – изменение частоты *SAW*, 4 – антенна

Когда сила резания воздействует на кончик инструмента, возникающая деформация в державке смещает частоту поверхностных акустических волн и, зная соотношение между силой резания и разностью частот, деформация может быть обнаружена датчиком *SAW*. В статье [14] подробно описан метод и математический аппарат обработки сигналов данного типа.

### 4 Управление по вибрации

Для контроля износа режущего инструмента важен уровень вибраций. Изменения в характере процесса резания из-за изнашивания инструмента сопровождаются соответствующим изменением параметров вибраций технологической системы. В статье [15] изложен метод обработки вибрационных

сигналов для оценки состояния режущего инструмента. На рис. 3 представлена зависимость вибраций от износа инструмента.

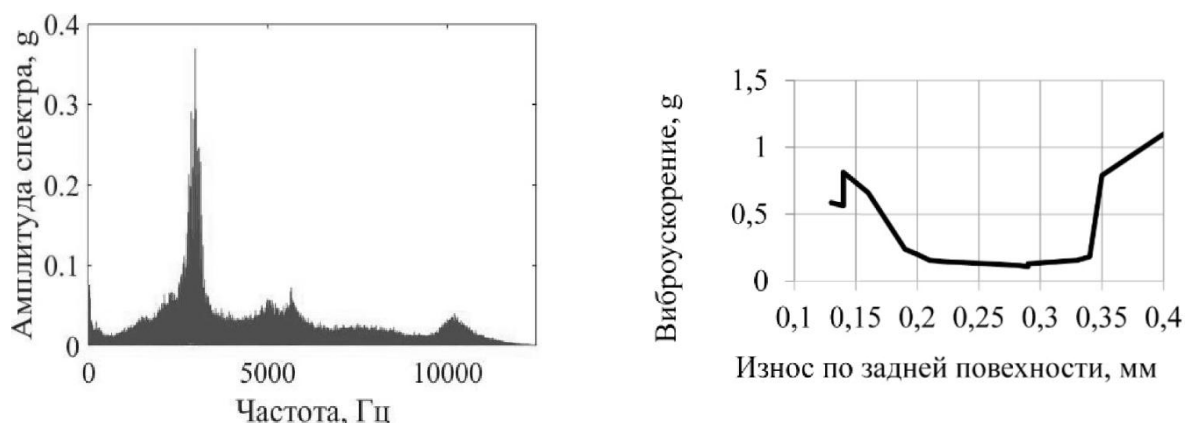


Рисунок 3 – Параметры вибраций в зависимости от износа

Этот метод позволяет получить информацию об износе инструмента, исходя из уровня вибраций, что делает возможным прогнозировать остаточный период стойкости, и может быть использован при чистовой обработке дорогих заготовок для предотвращения брака.

### 5 Управление по термо-ЭДС резания

В статье [16] предложена система адаптивного управления процессом резания основанная на измерении ЭДС резания возникающих в процессе обработки. Увеличение ЭДС говорит об увеличении контакта инструмент-деталь, что является следствием износа инструмента. Согласно предлагаемой блок-схеме (рис. 4), датчики 1 считывают сигналы термо-ЭДС, и ЭДС упругих деформаций при обработке.

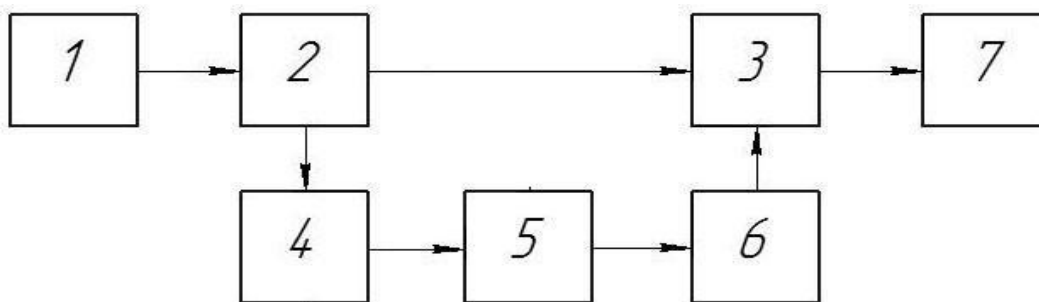


Рисунок 4 - блок-схема управления по термо-ЭДС

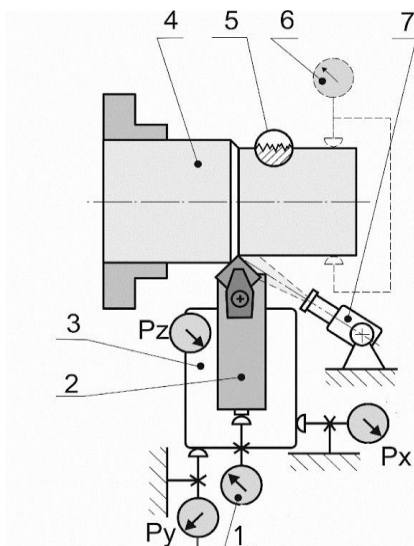
Передавая их в блок 2, который определяет постоянные и переменные части сигналов. Для управления режимами резания, постоянные сигналы подаются в блок управления 3. Переменные сигналы путем преобразования в блоке 4, конвертируются во взаимокоррелирующие функции, которые считываются блоком 5, а затем на основе них в устройстве 6, рассчитываются команды корректировки режимов резания. С их учетом блок 3, окончательно формирует сигналы управления приводами станка.

### 6 Smart инструменты с управлением по температуре

Повышение температуры резания вызывает преждевременный выход из строя инструмента или чрезмерный износ. Использование смазочно-охлаждающей



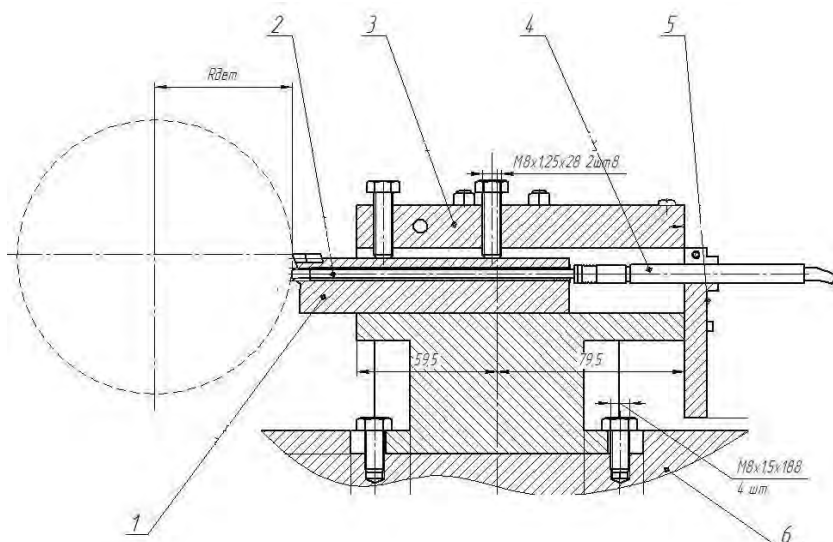
жидкости, традиционно применяемой для отвода тепла, выделяемого в процессе резки, не всегда возможно. *Smart*-система (рис.5), управление которой основано на определении температуры и силы в зоне резания при помощи инфракрасного пирометра, и модернизированного динамометра УДМ-100М, описан в статье [17].



- 1 – Система измерения температурной деформации резца
- 2 – Резец
- 3 – Динамометр УДМ-100М
- 4 – Обрабатываемая поверхность
- 5 – Обработанная поверхность
- 6 – Измерительная скоба для активного контроля
- 7 – Инфракрасный пирометр

Рисунок 5 – *Smart*-система с контролем температуры

Работа системы измерения температурной деформации (рис.6) основывается на инваровом стержне, относительно которого считается линейное расширение инструмента, т.к. коэффициент линейного расширения инвара в 20 раз меньше чем стали.



- 1 – Державка;
- 2 – Инваровый стержень;
- 3 – Резцедержатель;
- 4 – Индуктивный датчик;
- 5 – Кронштейн;
- 6 – Суппорт.

Рисунок 6 – Система измерения температурной деформации резца

### Заключение

По результатам обзора можно сделать следующие выводы:

1. *Smart*-инструменты с различными типами управления служат важными интерфейсными устройствами между станками и интеллектуальными процессами обработки, что особенно применимо в контексте Индустрии 4.0.

2. Применение *smart*-инструментов позволяет осуществлять сбор данных, характеризующих параметры резания.

3. Одним из факторов, влияющих на точность измерения контролируемых сигналов являются «шумы», которые неизбежно возникают в процессе резания. Для качественной обработки поступающих сигналов необходимо применять фильтры.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гарькушев А.Ю., Курилов А.В., Супрун А.Ф., Гасюк Д.П. Методика оценки показателей качества информационных систем // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. 2019. № 3. С. 56-61.

2. Глухов В.В., Гасюк Д.П. Управление качеством. - Санкт-Петербург, 2013. 399 с.

3. Гасюк Д.П., Филатов И.Н. Информационное обеспечение процесса обоснования требований к уровню унификации продукции // Труды международного симпозиума "Надежность и качество". 2007. Т. 1. С. 15-18.

4. Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г., Бажин Д.А., Барабанов В.В., Филиппов А.А. Модели организации и проведения испытаний элементов системы информационного обеспечения применения высокоточных средств // Труды Военно-космической академии им. А.Ф. Можайского. 2015. № 648. С. 6-12.

5. Зегжда П.Д. Модели и метод поддержки принятия решений по обеспечению информационной безопасности информационно-управляющих систем / П.Д. Зегжда [и др.] // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. 2018. № 1. С. 43-47.

6. Анисимов Е.Г., Анисимов В.Г., Солохов И.В. Проблемы научно-методического обеспечения межведомственного информационного взаимодействия // Военная мысль. 2017. № 12. С. 45-51.

7. Anisimov V.G., Zegzhda P.D., Anisimov E.G., Saurenko T.N., Prisyazhnyuk S.P. Indices of the effectiveness of information protection in an information interaction system for controlling complex distributed organizational objects // Automatic Control and Computer Sciences. 2017. Т. 51. № 8. С. 824-828.

8. Косова В.А., Гасюк Д.П. К вопросу анализа условий разработки технологических процессов машиностроительных предприятий // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2021. № 2. С. 655-658.

9. Федотова А.М., Гасюк Д.П. Анализ рисков возникновения проблем с качеством технологической подготовки производства и разработка мероприятий по их снижению в условиях АО "НИИЭФА" // Металлообработка. 2021. № 1 (121). С. 50-54.

10. R Teti, K Jemielniak, G O'Donnell, et al. Advanced monitoring of machining operations. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 2010, 59: 717-739.

11. Исследование сил резания при точении: метод. указания / сост.: М. Б. Сазонов, А. Н. Швецов. – Самара: Изд-во Самарского университета, 2019. – 20 с.

12. Коротыш А.А. Многопараметрический контроль процесса резания // Современные научные исследования и инновации. 2013. № 2.

13. C Wang, Design and analysis of a piezoelectric film embedded smart cutting tool. Proc. IMechE, Part B: J. Engineering Manufacture, 2013, 227: 254-260.

14. M Hofer. Finite-element simulation of wave propagation in periodic piezoelectric SAW structures. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2006, 53: 1192-1201.

15. Анцев, А.В. Пасько, Н.И. Методика обработки вибрационных сигналов для оценки состояния режущего инструмента // Известия Тульского Государственного Университета. Технические науки. 2020. № 4. с.291-296

16. Шарабура С.Н., Шевченко В.В. Система адаптивного управления процессом обработки деталей на станках с ЧПУ // Современные научные исследования и инновации. 2014. № 6. Ч. 1.

17. Козарь, И.И. Математическая модель погрешности при точении труднообрабатываемых сплавов / И.И. Козарь, Д.Ю. Колодяжный, М.М. Радкевич, Т.А. Цимко // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. - 2014. - №2. - С. 194-201.

Е.А. Кунарев, Т.А. Макарова  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Санкт-Петербург, Россия

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТИ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ «ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ РЕЗАНИЯ НА ШЕРОХОВАТОСТЬ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ЛЕЗВИЙНОЙ ОБРАБОТКЕ СТЕЛЛИТОВОГО СПЛАВА»

### Аннотация

В работе исследована точность математической модели по определению влияния режимов резания на шероховатость поверхности стеллитового сплава при токарной обработке. Проведен обзор литературы на тему исследования шероховатости стеллитовых сплавов, отобраны экспериментальные данные для проверки точности математической модели. Определены критерии оценки точности рассматриваемой модели, скомпенсировано влияние угла при вершине резца на шероховатость поверхности обрабатываемых сплавов. По итогам работы определены дальнейшие варианты доработки рассматриваемой модели.

*Ключевые слова:* стеллит, режимы резания, шероховатость поверхности, математическая модель, радиус при вершине резца, точность математической модели.

Точность математической модели «Влияние режимов резания на шероховатость поверхности стеллитового сплава» (далее ММ) не была изучена из-за недостатка экспериментальных данных по обработке стеллита на момент проведения разработки [1].

ММ имеет вид:

$$Ra_{ст} = 10^{0.155} \cdot v^{-0.0639} \cdot t^{0.0803} \cdot s^{0.1875}, \quad (1)$$

где  $Ra_{ст}$  – среднее арифметическое отклонение профиля поверхности стеллита после обработки;

$v$  – скорость резания, м/мин;

$t$  – глубина резания, мм;

$s$  – подача, мм/об.

В качестве инструмента при обработке стеллита [6] применялись резцы с параметрами, представленными в таблице 1.

Таблица 1 – Геометрия резцов

Величины углов резца, °				Материал	Радиус при вершине, мм
$\alpha$	$\gamma$	$\lambda$	$\alpha_1$		
8	-10	+5	8	ВК8	1

Данная ММ построена на основе компьютерной симуляции и ограниченного числа устаревших экспериментальных данных, что привело к необходимости исследования ее точности.

Несмотря на то, что шероховатость в выбранных данных для всех экспериментов превышает значение  $Ra=0,63$  мкм, являющимся требуемым значением для поверхности стеллитовой наплавки в [1], данные остаются пригодными для определения точности построенной модели.

Таблица 2 – Экспериментальные данные для оценки точности ММ [2-5]

№ эксп.	$v$ , м/мин	$s$ , мм/об	$t$ , мм	$Ra_3$
1	25	0,3	0,2	1
2	50	0,1	0,5	0,9
3	75	0,1	0,5	0,85
4	80	0,02	0,5	0,75
5	80	0,23	0,5	1,1
6	80	0,1	0,3	1

**Компенсация влияния радиуса при вершине резца  $r$ .** Следует отметить, что экспериментальные данные, представленные в таблице 2, получены для резца с характеристиками материала и геометрией, близкими к характеристикам резца, используемого в экспериментах в работе [6], на основании которых велось построение ММ. Данные характеристики представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Рекомендуемая геометрия резцов

Величины углов резца, °				Материал	Радиус при вершине, мм
$\alpha$	$\gamma$	$\lambda$	$\alpha_1$		
8	-6	5	8	Твердый сплав с PVD покрытием	0,8

Единственным существенным отличием между данными экспериментами является значение радиуса при вершине резца  $r$ : данным для построения ММ соответствует значение  $r_{\text{ММ}} = 1$  мм [6]; экспериментальным данным, отобранным для проверки ММ соответствует значение  $r_3 = 0,8$  мм. Таким образом, влияние разницы значений  $r$  должно быть проанализировано и скомпенсировано.

Согласно источнику [7], для традиционной токарной обработки справедливы следующие выражения:

$$Rz \approx 4 \cdot Ra, \quad (2)$$

$$Rz = \frac{s^2}{8r}, \quad (3)$$

где  $Rz$  – значение шероховатости по 10 точкам;

$Ra$  – среднее арифметическое отклонение профиля.

Из выражений (2) и (3) очевидно, что  $Ra$  и  $r$  находятся в обратной зависимости. Справедливо также, что при равных подачах ( $s_1 = s_2$ ) соотношение отклонений профиля  $Ra_1$  и  $Ra_2$  обратно пропорционально соотношению радиусов при вершине инструмента  $r_1$  и  $r_2$ , использованных для обработки соответствующих поверхностей:

$$\frac{Ra_1}{Ra_2} = \frac{s_1^2}{8r_1} \cdot \frac{8r_2}{s_2^2} = \frac{r_2}{r_1} = K_r, \quad (4)$$

где  $K_r$  – коэффициент компенсации разницы  $r$ .

Определим  $K_r$  для рассматриваемого случая:

$$K_r = \frac{Ra_1}{Ra_2} = \frac{r_2}{r_1} = \frac{Ra_3}{Ra_{\text{ММ}}} = \frac{r_{\text{ММ}}}{r_3} = \frac{1}{0,8} = 1,25, \quad (5)$$

где  $Ra_{\text{ММ}}$  – среднее арифметическое отклонение профиля для опыта при  $r_{\text{ММ}}$ ;

$Ra_{\text{ЭК}}$  – среднее арифметическое отклонение профиля для опыта при  $r_{\text{ЭК}}$ .

Выражение для расчета шероховатости (1) примет следующий вид:

$$Ra_{ct} = 1,25 \cdot 10^{0.155} \cdot v^{-0.0639} \cdot t^{0.0803} \cdot s^{0.1875} \quad (6)$$

Оценка ММ проводится по следующим критериям:

1. Средняя относительная ошибка  $S1$ , определяющаяся по формуле:

$$S1 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{x_i^{\text{э}} - x_i^{\text{М}}}{x_i^{\text{М}}} \right|, \quad (7)$$

2. Максимальная относительная ошибка  $S2$ , определяющаяся по формуле:

$$S2 = \max_{i=1}^n \left| \frac{x_i^{\text{э}} - x_i^{\text{М}}}{x_i^{\text{М}}} \right|, \quad (8)$$

3. Средняя квадратичная ошибка  $S3$ , определяющаяся по формуле:

$$S3 = \frac{1}{n} \left[ \sum_{i=1}^n \left( \frac{x_i^{\text{э}} - x_i^{\text{М}}}{x_i^{\text{М}}} \right)^2 \right]^{0.5}, \quad (9)$$

где  $n$  – число экспериментальных значений (по таблице 2  $n = 6$ )

$x_i^{\text{э}}$  – экспериментальное значение;

$x_i^{\text{М}}$  – значение, определенное по модели.

Критерием достаточной точности модели выбрано значение  $S1 \leq 15\%$ . Также для всех значений ошибок будет рассчитана относительная величина погрешности  $\sigma\%$ , что позволит сделать вывод о точности модели для каждой строки данных по таблице 2.

**Обработка экспериментальных данных.** Для значений, представленных в таблице 1 определены относительные погрешности, результаты вычислений сведены в таблицу 4.

Таблица 4 – Оценка точности ММ

№ эксп.	$v$ , м/мин	$s$ , мм/об	$t$ , мм	$Ra_3$	$Ra_{cm}$	$\left  \frac{Ra_{cm} - Ra_3}{Ra_3} \right $	$\sigma\%$
1	25	0,3	0,2	1	1,02	0,02	2
2	50	0,1	0,5	0,9	0,85	0,05	5,3
3	75	0,1	0,5	0,85	0,83	0,02	2,1
4	80	0,02	0,5	0,75	0,61	0,14	22,3
5	80	0,23	0,5	1,1	0,97	0,13	13,5
6	80	0,1	0,3	1	0,80	0,20	25,7

Значения выражений (7), (8) и (9) принимают следующие значения:

$$S1 = 0,11 \text{ или } 11\%;$$

$$S2 = 0,25 \text{ или } 25,7\%;$$

$$S3 = 0,074 \text{ или } 7\%.$$

### Обсуждение результатов

Значение характеристики  $S1$  составило 14%, что является допустимым значением для оценочной модели. Таким образом, доказана допустимость применения рассматриваемой ММ при планировании машиностроительного эксперимента.

Характеристика  $S2$  для экспериментальной выборки составила 25,7%, что объясняется тем, что два параметра резания в данном эксперименте (№5) с

наибольшими весовыми коэффициентами лежат на границах рекомендуемых диапазонов ( $v = 80 \frac{\text{м}}{\text{мин}}$ ;  $s = 0,1 \frac{\text{мм}}{\text{об}}$ ). Чтобы уточнить значения в крайних точках, следует провести эксперимент с большим диапазоном выборки.

Характеристика  $S3$  составила 7%, что является свидетельством высокой степени соответствия экспериментальных данных ММ.

На общей точности ММ также могло сказаться влияние радиуса при вершине резца  $r$ , которое было скомпенсировано введением эмпирического коэффициента. Чтобы уточнить влияние данного параметра на шероховатость обработанной поверхности стеллита, следует провести дополнительное исследование с варьированием четырех характеристик: скорости резания  $v$ , подачи  $s$ , глубины резания  $t$ , радиуса вершины резца  $r$ .

### Выводы

1. В ходе работы ММ была доработана – требовалось введение коэффициента, компенсирующего влияние радиуса при вершине резца в формуле. Теперь формула имеет следующий вид:

$$Ra_{\text{ст}} = K_r \cdot 10^{0.155} \cdot v^{-0.0639} \cdot t^{0.0803} \cdot s^{0.1875},$$

где  $K_r = \frac{Ra_1}{Ra_2} = \frac{r_2}{r_1}$

2. Исследование точности модели дало удовлетворительные результаты, возможность применения модели по назначению подтверждена.

3. Намечены возможные варианты доработки модели: расширение охватываемого диапазона исходных данных, уточнение влияния радиуса при вершине резца на шероховатость поверхностного слоя стеллита.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kunarev, E.A., Makarova, T.A. & Lyubomudrov, S.A. Influence of Cutting Conditions on the Temperature, Local Stress, and Surface Roughness of Stellite // Russ. Engin. Res.41, 175-179 (2021). <https://doi.org/10.3103/S1068798X21020118>

2. Yingfei, G., de Escalona, P.M. & Galloway, A. Influence of Cutting Parameters and Tool Wear on the Surface Integrity of Cobalt-Based Stellite 6 Alloy When Machined Under a Dry Cutting Environment // J. of Materi Eng and Perform 26, 312-326 (2017). <https://doi.org/10.1007/s11665-016-2438-0>

3. Monkova, Katarina & Monka, Peter & Cesanek, Jiri & Matejka, Jan & Duchek, Vladimir. (2017). Surface roughness evaluation after machining wear resistant hard coats // MATEC Web of Conferences. 137. 03008. 10.1051/mateconf/201713703008

4. Hasan, Shahanur & Mazid, Abdul & Clegg, Richard. (2010). Optimisation of the Machining of Stellite 6 PTA Hardfacing Using Surface Roughness // Key Engineering Materials. 443. 227-231. 10.4028/www.scientific.net/KEM.443.227

5. Hasan, Shahanur & Mazid, Abdul & Clegg, Richard. (2016). The Basics of Stellites in Machining Perspective // International Journal of Engineering Materials and Manufacture. 1. 35-50. 10.26776/ijemm.01.02.2016.01

6. Шифрин, Абрам Шмерович. Обработка резанием коррозионностойких, жаропрочных и титановых сталей и сплавов [Текст] / А.Ш. Шифрин, Л.М. Резницкий; Под ред. канд. техн. наук Л. М. Резницкого. - Москва; Ленинград : Машиностроение. [Ленингр. отд-ние], 1964. - 447 с.: ил.; 21 см.

7. Жуков Э.Л. и др. Технология машиностроения. Часть 1. Основы технологии машиностроения. В 3-х ч. Учеб. пособие /Под ред С.Л.Мурашкина. СПб.: Изд-во СПбГТУ, 1999. 190 с.: ил.

8. Хикс, Ч. Р. Основные принципы планирования эксперимента / Ч. Р. Хикс. – М. : Мир, 1967. – 406 с

9. Математические модели в транспортных системах : учеб.-метод. пособие / В. Н. Галушко ; М-во трансп. и коммуникаций Респ.Беларусь, Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель : БелГУТ, 2015. – 154 с.

10. Розенберг Г.С., Шитиков В.К., Брусиловский П.М. Экологическое прогнозирование (Функциональные предикторы временных рядов). - Тольятти, 1994. - 182 с.

11. Анализ и прогнозирование финансовых процессов: Учеб.пособие для студентов, обучающихся по специальностям «Бухгалтерский учет, анализ и аудит» и «Финансы и кредит». - Тула: Левша, 2009. - 265 с.



Е.А. Кунарев, Т.А. Макарова  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Санкт-Петербург, Россия

## **ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОБРАБОТКИ СТЕЛЛИТОВОГО СПЛАВА ЗА СЧЕТ ПРИМЕНЕНИЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА В ПРОГРАММЕ "DEFORM-3D"**

### **Аннотация**

Данная работа представляет собой исследование взаимосвязи между входными параметрами режима резания (скорость резания, глубина резания и подача) и выходными параметрами процесса (шероховатость поверхности, температура и напряжение в поверхностном слое) при токарной обработке стеллитовых сплавов. Зависимости между названными параметрами по результатам исследования сведены в математическую модель, даны практические рекомендации для обработки стеллита.

*Ключевые слова:* стеллит, наплавка, режимы резания, режущий инструмент, математическая модель, шероховатость.

### **Введение**

Актуальность темы исследования обусловлена необходимостью оптимизации технологических процессов обработки стеллитов, широко используемых в таких областях машиностроения, как судостроение, военная промышленность, и их адаптации современным условиям производства. Лезвийная обработка стеллита является более производительным методом обработки, чем шлифование, но также связана с более высоким риском возникновения брака из-за высоких температур и напряжений в зоне резания. Воздействие комбинации температур выше 720°C и напряжений, превышающих 66 кгс/мм<sup>2</sup> в поверхностных слоях материала, приводит к образованию трещин и задиоров на поверхности наплавки.

Цель исследования: Выявление зависимостей между режимами резания и температурной и напряжением в поверхностных слоях стеллитовой наплавки при чистовой обработке.

Задачи:

1. Разработать методику проведения моделирования процесса резания;
2. Разработать модель испытаний для вычислительного эксперимента;
3. Провести вычислительный эксперимент;
4. Выявить зависимости между режимами резания и описанными в п.1 характеристиками процесса резания.

В качестве исследуемого материала выбран стеллит ВЗК, состав и характеристики которого приведены в таблицах 1 и 2 [1-3].

Эксперименты по выявлению данных зависимостей проведены с использованием программного комплекса «Deform-3D», позволяющего производить имитацию процесса резания с помощью встроенного приложения «Machining 3D». В качестве режущего инструмента выступает твердосплавная пластина SandvickCoromantTPGW110304S01020F 7015, условия обработки-чистовое резание с применением СОЖ.

Таблица 1 – Химический состав стеллита ВЗК

Тип элек трод а	Мар ка	Химический состав наплавки, %							Твердос ть, РС	Область применения
		C	Si	W	Cr	Co	Fe	Ni		
ЦН- 2	ВЗК	1.7-2.0	2.0- 2.5	4-5	28- 32	59- 66	3.5	–	45-53	Уплотняющие поверхности арматуры

Таблица 2 – Механические свойства стеллита ВЗК

$\sigma_b$ , кгс/мм <sup>3</sup>	Температура плавления $T$ , °C	Твердость HRC
60-70	1275	40...45

На количество теплоты, выделяющейся в процессе обработки, влияют многие технологические факторы. В рамках данного исследования произведена оценка влияния таких параметров, как глубина резания  $t$ , величина подачи  $s$  и скорость резания  $v$ .

В ходе проведения вычислительного эксперимента были получены результаты, представленные в таблицах 3–5.

Таблица 3 – Температура резания при глубине резания  $t = 0.1$  мм

Температура $T, ^\circ\text{C}$		Скорость резания, $v$ , м/мин				
		20	30	40	50	60
Подача, $s$ , мм/об	0.1	261	351	424	486	515
	0.2	311	401	461	536	601
	0.3	342	437	501	623	662

Таблица 4 – Температура резания при глубине резания  $t = 0.15$  мм

Температура $T, ^\circ\text{C}$		Скорость резания, $v$ , м/мин				
		20	30	40	50	60
Подача, $s$ , мм/об	0.1	359	444	505	553	553
	0.2	425	521	598	637	653
	0.3	475	554	658	712	720

Таблица 5 – Температура резания при глубине резания  $t = 0.25$  мм

Температура $T, ^\circ\text{C}$		Скорость резания, $v$ , м/мин				
		20	30	40	50	60
Подача, $s$ , мм/об	0.1	312	363	474	534	580
	0.2	361	445	550	621	666
	0.3	391	498	598	687	737

Данные, полученные в результате вычислительных экспериментов, были аппроксимированы методом планирования эксперимента при трех параметрах, в результате чего была получена следующая линейная функция:

$$T = 10^{2.0325} \cdot v^{0.5866} \cdot t^{0.146} \cdot s^{0.222} \quad (1)$$

В таблицах 6-8 приведены результаты аналогичных экспериментов по выявлению зависимости между напряжениями в наплавке и режимами резания.

Таблица 6 – Напряжение в наплавке при глубине резания  $t = 0.1$  мм

Напряжение $\sigma$ , МПа		Скорость резания, $v$ , м/мин				
		20	30	40	50	60
Подача, $s$ , мм/об	0.1	443	483	506	517	533
	0.2	469	504	521	545	554
	0.3	485	515	534	553	576

Таблица 7 – Напряжение в наплавке при глубине резания  $t = 0.15$  мм

Напряжение $\sigma$ , МПа		Скорость резания, $v$ , м/мин				
		20	30	40	50	60
Подача, $s$ , мм/об	0.1	465	502	516	542	550
	0.2	485	520	538	563	578
	0.3	504	528	552	576	592

Таблица 8 – Напряжение в наплавке при глубине резания  $t = 0.25$  мм

Напряжение $\sigma$ , МПа		Скорость резания, $v$ , м/мин				
		20	30	40	50	60
Подача, $s$ , мм/об	0.1	484	523	540	565	572
	0.2	508	539	563	586	598
	0.3	520	557	581	596	611

По результатам обработки данных, полученных в ходе эксперимента, была получена следующая линейная функция

$$\sigma = 10^{2.5962} \cdot v^{0.155} \cdot t^{0.078} \cdot s^{0.0691} \quad (2)$$

В ходе проведения исследования сделаны следующие выводы:

1. На температуру  $T$  в наплавке существенное влияние оказывает скорость резания, в меньшей степени влияет значение подачи и глубины резания. Критический уровень температуры в  $T = 720$  °C в ходе экспериментов был достигнут при комбинировании  $v \geq 50$  м/мин;  $s = 0.3$  мм/об;  $t \geq 0.15$  мм;

2. На напряжение  $\sigma$  в наплавке наибольшее влияние оказывает скорость резания, в меньшей степени влияет значение подачи и глубины резания. Критический напряжения  $\sigma_{\text{в}} = 647.2$  МПа в ходе экспериментов был достигнут не был;

3. Полученные в ходе исследования уравнения (1, 2) будут использованы как теоретическая основа для проведения экспериментов по обработке стеллитов с использованием станочного оборудования.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Matweb.com Material property data. [Электронный ресурс] <http://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?matguid=bcefe3581fad480fa0c0c33f12ca76cc&sk=1> (Дата обращения 17.04.2018)

2. Арматэк. Материалы для изготовления трубопроводной арматуры. [Электронный ресурс]. [http://armatek.ru/about/truboprovodnaya\\_armatura/materialy](http://armatek.ru/about/truboprovodnaya_armatura/materialy) (Дата обращения 01.02.2019).

3. Гемпел К.А. Справочник по редким металлам [Текст]. Пер. с англ. - М.: Мир, 1965. - 946 с., ил.

4. Переплётчиков Е.Ф. Механизированная наплавка кобальтовых сплавов в арматуростроении [Текст] / Е.Ф. Переплётчиков // Технологии обработки поверхности. - 201. - № 15. - С. 64-67.

5. Резание материалов. Режущий инструмент в 2 ч. Часть 1: учебник для академического бакалавриата / С. Н. Григорьев [и др.]; под общей редакцией Н. А. Чемборисова. - Москва: Издательство Юрайт, 2018. - 263 с. - (Бакалавр. Академический курс). - ISBN 978-5-534-00115-0. - [Текст]: электронный // ЭБС Юрайт [сайт]. - URL: <https://biblio-online.ru/bcode/420912> (дата обращения: 13.03.2019).

6. Шифрин, Абрам Шмерович. Обработка резанием коррозионностойких, жаропрочных и титановых сталей и сплавов [Текст] / А. Ш. Шифрин, Л. М. Резницкий; под ред. канд. техн. наук Л. М. Резницкого. - Москва; Ленинград: Машиностроение. [Ленингр. отд-ние], 1964. - 447 с. : ил.; 21 см.

А.А. Стрельникова, М.М. Радкевич  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Санкт-Петербург, Россия, Strelnikova.angelina@bk.ru

## **ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ БИОЛОГИЧЕСКИХ СМАЗОЧНЫХ СРЕД НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ПАРЫ ТРЕНИЯ «ТИТАНОВЫЙ СПЛАВ ЗМ – СТАЛЬ»**

### **Аннотация**

В работе приведены результаты влияния биологических смазочных сред на износ пары трения «сталь – титановый сплав». Испытания проводились при вдавливании (царапании) поверхностного слоя титанового сплава на длине 2 мм в условиях постоянного увеличения нагрузки с 0,03 Н до 10 Н на приборе MicroIndentationTesterCSM. Исследования проводили при сухом трении и с использованием минерального масла. Установлено, что смазочные среды биологического происхождения создают приграничные смазочные слои на поверхностях трения и обеспечивают заметное уменьшение изнашивания. В работе установлено влияние вида трения и исходной шероховатости поверхностей пары трения на величину износа.

*Ключевые слова:* титановый сплав ЗМ, шероховатость поверхности, степень деформации, сухое трение, жидкостное трение.

### **Введение**

Использование титановых сплавов при изготовлении деталей машин и оборудования, является общемировой тенденцией. Титановые сплавы широко применяются в самолётостроении, кораблестроении, в атомной энергетике. Из них производят полуфабрикаты теплообменного оборудования, корпусное оборудование атомных энергетических установок и турбинные лопатки. Необходимо отметить, что для изготовления указанных деталей важно знать не только механические свойства применяемых материалов, но и эксплуатационные свойства. Это связано с необходимостью принятия решений на этапе опытно-конструкторской разработки деталей и узлов различных машин [1 - 10]. Учет указанных свойств особенно актуален для деталей, работающих в условиях трения. Проблеме изучения трибологических свойств титановых сплавов посвящен ряд исследований [11 - 14]. Результаты отмеченных данных исследований не являются достаточными, а поэтому требуют проведения дополнительных исследований и уточнений, в том числе, проведения экспериментальных работ.

Целью работы является выявление зависимости влияния вида трения на параметр шероховатость при разной степени горячей деформации. Для этого нами проведены эксперименты по определению глубины царапания специальным индентором поверхностного слоя титанового сплава на определенной длине.

В данной работе приведены результаты экспериментального исследования пары трения «титановый сплав ЗМ – сталь» в зависимости от полученной шероховатости образцов, полученных протяжкой при разных степенях деформации.

## Методы и результаты исследований

В работе использовались горячедеформированные образцы титанового сплава ЗМ со степенью деформации 80 %, 90 %, 93 %. Деформирование осуществлялось ковкой при протяжке исходных заготовок до достижения заданной степени деформации. После деформирования образцы подвергались отжигу при температуре 870 °С.

Процесс износа при трении между образцами титанового сплава и шарика диаметром 6,35 мм из стали ШХ 15 изучали с помощью прибора CSM. При этом исследования проводили в условиях сухого трения и жидкого с использованием рапсового масла с присадками при постоянном вдавливании шарика на длине 2 мм с увеличением нагрузки от 0,030 Н в начале процесса и до 10 Н в конце процесса. Количество проходов стального шарика вдоль всего пути трения составляло 20 раз.

Общий вид царапин, полученных в результате опыта, представлен на рисунке 1.

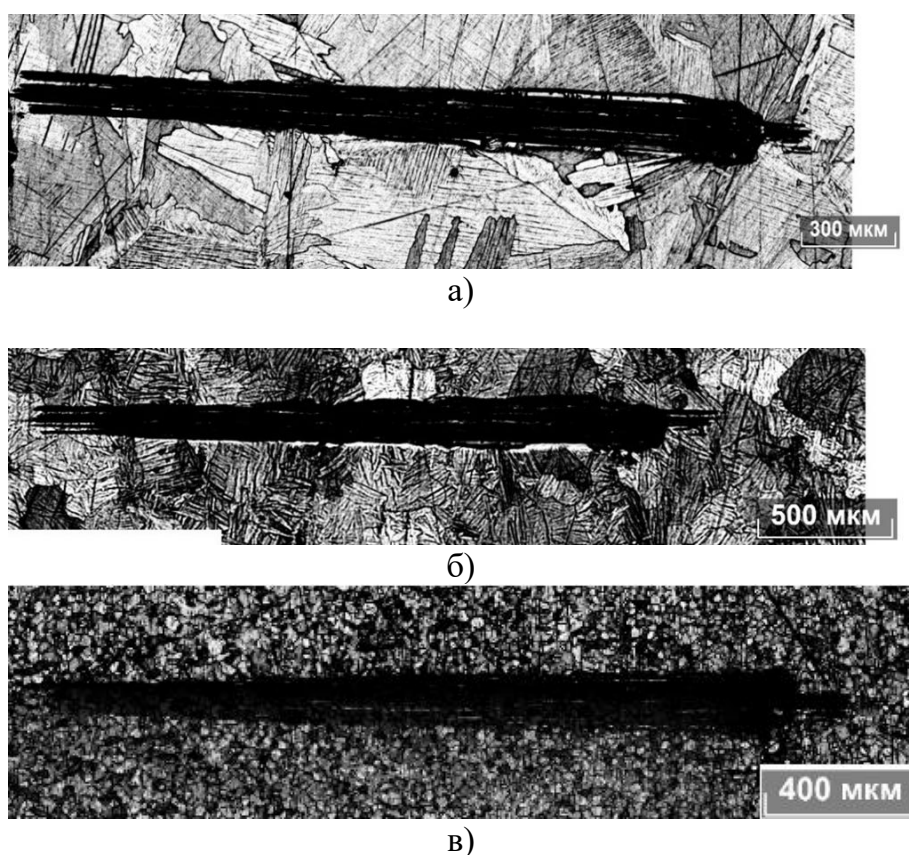


Рисунок 1 – Общий вид царапин, полученных на образцах титанового сплава с разной степенью деформации: а – 80 %, б – 86 %, в – 93 %

Далее, на каждой полученной царапине измерялся параметр шероховатости поверхности ( $R_z$ ) с помощью профилометра МАНР. Измерения проводились по ГОСТ Р ИСО 4287-2014 [4].

Для получения наиболее полных и достоверных результатов вся длина каждой царапины была разделена на четыре участка, которые были получены при нагрузке 0,030 Н, 3,33 Н, 7 Н и 10 Н соответственно. На выделенных участках измерили параметр шероховатости ( $R_z$ ).

Было произведено по 6 измерений на каждом участке. Затем рассчитали среднее значение шероховатости  $R_z$ , которые округлили до 4-х знаков после запятой.

Средние значения параметра шероховатости поверхности царапин в зависимости от вида трения представлены в таблице.

Из приведенных в таблице данных видно, что шероховатость поверхностного слоя титанового сплава 3М при нагрузке 0,030 Н изменяется при сухом трении в пределах 0,3093- 0,7840 мкм, а при жидком 0,6040 - 0,7409 мкм. При нагрузке 3,33 Н параметр шероховатости изменяется в пределах 1,7987-2,6178 мкм при сухом трении, а при жидком 1,3795 - 1,6173 мкм. При нагрузке 7 Н параметр шероховатости изменяется в пределах 2,7478 - 2,4718 мкм при сухом трении, а при жидком 2,0767 - 1,9436 мкм. При нагрузке 10 Н параметр шероховатости изменяется в пределах 3,2446 - 2,1109 мкм при сухом трении, а при жидком 1,6399 - 2,5312 мкм.

Таблица – Результаты значений параметра шероховатости Rz

Степень деформации	Вид трения	Средние значения параметра шероховатости Rz, мкм при нагрузке			
		0,030 Н	3,33 Н	7 Н	10 Н
80 %	сухое	0,3093	2,1326	2,7280	3,2446
	жидкое	0,6040	1,3795	1,9325	1,6399
86 %	сухое	0,4637	2,6178	2,7478	2,1109
	жидкое	0,7409	1,3851	2,0767	2,5312
93 %	сухое	0,7840	1,7987	2,4718	3,1855
	жидкое	0,7254	1,6173	1,9436	1,9568

Исходная шероховатость поверхности исследуемых образцов 0,15-0,20 мкм.

Таким образом, в результате проведенных исследований параметр шероховатости Rz, с увеличением нагрузки вдавливания индентора в зависимости от нагрузки увеличивается для образцов со степенью деформации 80 % при сухом трении в 10 раз, при жидком трении - 2,7 раза, для образцов со степенью деформации 86 % при сухом трении в 4,6 раз, при жидком трении – 3,4 раза, для образцов со степенью деформации 93% при сухом трении в 4 раза, при жидком трении – 2,7 раза.

### **Заключение**

Выполнена оценка влияния вида трения на эксплуатационные свойства пары трения «титановый сплав 3М – сталь».

Установлено, что увеличение степени деформации с 80% до 93% с ростом нагрузки вдавливания индентора приводит к изменению параметра шероховатости. Так, для сухого трения параметр шероховатости Rz снижается на 2%, а для жидкого трения увеличивается на 19 %.

Следует отметить, что при наличии смазочного слоя в паре трения «титановый сплав 3М – сталь» интенсивность внедрения индентора снижается на 15%. Это обусловлено высокой несущей способностью смазки, по сравнению с сухим трением.

### **Благодарности**

Исследование поведено в рамках гранта по программе Erasmus на обучение в весеннем семестре 2020 года. Авторы выражают благодарность сотрудникам Университета Витаутаса Великого за помощь в проведении эксперимента.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федотова А.М., Гасюк Д.П. Анализ рисков возникновения проблем с качеством технологической подготовки производства и разработка мероприятий по их снижению в условиях АО "НИИЭФА" // *Металлообработка*. 2021. № 1 (121). С. 50-54.
2. Косова В.А., Гасюк Д.П. К вопросу анализа условий разработки технологических процессов машиностроительных предприятий // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2021. № 2. С. 655-658.
3. Гасюк Д.П., Филатов И.Н. Информационное обеспечение процесса обоснования требований к уровню унификации продукции // *Труды международного симпозиума "Надежность и качество"*. 2007. Т. 1. С. 15-18.
4. Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г. Формальная структура задач стандартизации и унификации при управлении развитием сложных технических систем // *Защита и безопасность*. 2004. № 4 (31). С. 26-31.
5. Гасюк Д.П., Филатов И.Н. Основные принципы унификации образцов вооружения и военной техники // *Труды международного симпозиума "Надежность и качество"*. 2008. Т. 2. С. 317-318.
6. Глухов В.В., Гасюк Д.П. *Управление качеством*. - Санкт-Петербург, 2013. 399 с.
7. Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г., Быстров А.Г., Лобас Е.В. Метод оценивания обоснованности управленческих решений // *Вестник Российской таможенной академии*. 2008. № 2. С. 103-106.
8. Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г., Мартыщенко Л.А., Шатохин Д.В. Методы оперативного статистического анализа результатов выборочного контроля качества промышленной продукции.- Санкт-Петербург, Тула : Международная академия информатизации, 2001. - 72 с.
9. Авдеев М.М. Информационно-статистические методы в управлении микроэкономическими системами / М.М. Авдеев [и др.]. - Санкт-Петербург; Тула. 2001.- 139 с.
10. Тебекин А.В. Методический подход к моделированию процессов формирования планов инновационного развития предприятий / А.В. Тебекин, Т.Н. Сауренко [и др.] // *Журнал исследований по управлению*. 2019. Т. 5. № 1. С. 65-72.
11. Чертовских С.В. Триботехнические характеристики ультрамелкозернистого титана и его сплавов: автореф. дис. канд. техн. наук. – М., 2008.
12. В.М. Савостиков, А.И. Потекаев, А.Н. Табаченко, Е.Ф. Дударев, И.А. Шулёпов, Физико-механические и трибологические свойства титановых сплавов с градиентным антифрикционным покрытием Ti–C–Mo–S, *Известия высших учебных заведений. Физика*, т. 55, № 9, 2012, с 71-77.
13. Табенкин, А.Н. Текстура поверхности и ее измерение. Шероховатость, волнистость, профиль, топография / А.Н. Табенкин, С.Б. Тарасов, С.Н. Степанов; под редакцией Н.А. Табачниковой; Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. — Санкт-Петербург: Изд-во Политехн. ун-та, 2018 (Санкт-Петербург, 2021).
14. ГОСТ Р ИСО 4287-2014. Геометрические характеристики изделий (GPS). Структура поверхности. Профильный метод. Термины, определения и параметры структуры поверхности: нац. стандарт Рос. Федерации / Подготовлен ООО "ЦИТОпроект". - Введ. впервые / Введ. 2016-01-01. - Москва: Стандартинформ, 2015. - II, 17 с.; 29 см.



Д.С. Фомин<sup>1</sup>, А.И. Попов<sup>1</sup>, А.С. Фумин<sup>1</sup>, С.В. Беляков<sup>2</sup>, М.М. Радкевич<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Санкт-Петербург, Россия, [bbbabygoal@yandex.ru](mailto:bbbabygoal@yandex.ru)

<sup>2</sup>Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана,  
Москва, Россия, [gidravlik2013@ya.ru](mailto:gidravlik2013@ya.ru)

## **АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ОБРАБОТКИ ТУРБИНЫХ ЛОПАТОК СТРУЙНЫМ ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННЫМ МЕТОДОМ**

### **Аннотация**

В работе рассмотрено влияние параметров струйной электролитно-плазменной обработки на удельный съем металла. Построение регрессионной модели помогает лучше понять, какие процессы происходят при струйной электролитно-плазменной обработке и что влияет на них. Проведен четырехфакторный эксперимент для оценки влияния напряжения, межэлектродного промежутка, объемного расхода электролита и его концентрации на удельный съем металла при воздействии на нее струйной электролитной плазмы. Выполнен анализ морфологии поверхности после обработки методами фотограмметрии и лазерного сканирования, построен цифровой двойник зоны обработки.

*Ключевые слова:* полный факторный эксперимент, отклик, токоподвод, межэлектронный зазор, фотограмметрия, облако точек, цифровой двойник.

### **Введение**

В настоящее время актуальна проблема обработки поверхностей лопаток турбин. Так как эти изделия используются в ответственных устройствах, качество поверхности должно бы наилучшим, насколько это возможно. Из-за сложной криволинейной поверхности и труднодоступных мест, лопатки обрабатываются вручную. О точной повторяемости результата в этом случае не может идти и речи. Способ струйной электролитно-плазменной обработки можно рассматривать, как один из вариантов решения этой проблемы.

### **Методы**

В процессе работы использовалась установка струйной электролитно - плазменной обработки, разработанная в Высшей школе машиностроения СПбПУ [1].

Для достижения поставленной цели были использованы методические указания для построения линейной регрессионной модели отклика. В работе использовано лазерное сканирование поверхности, а также метод фотограмметрии. Для построения зоны электролитно-плазменной обработки нами было использовано программное обеспечение 3DBuilder и SolidWorks.

### **Результаты и обсуждение**

Метод электролитно-плазменной обработки требует настройки многих параметров, напряжения, тока разряда межэлектронного промежутка, концентрации электролита [1, 2]. Как правило, для каждого сложного места нужна разработка

особой конструкции токоподвода [3 - 6]. В работе нами исследовался полый токоподвод.

Цель работы: оценить влияние значимых факторов, которые влияют на удельный съем материала.

Из самых значимых параметров на данный момент было выявлено 4 фактора:

z1: межэлектронный зазор (3 – 6, мм); z; 2: напряжение (100 – 300, В); z3: объем электролита (22,5 – 40, л/ч); z4: концентрация электролита (20 – 40, г/л).

Для данных четырех факторов, где каждый фактор имеет 2 уровня, был разработан и проведен эксперимент. Фактор z1 практически перестает иметь значение, если увеличить его до 30-40 мм. Фактор z2 подвергает опасности экспериментаторов если поднять значение выше 350 В. Фактор z3 может принимать только 2 значения. Связанно это с включением насоса. Фактор z4 может принимать любое значение.

### Обозначения и сокращения

$\bar{y}_j$  – среднее значение отклика;

$x_1, x_2, x_3, x_4$  – закодированные переменные факторов;

$x_1x_2, x_1x_3, x_1x_4, x_2x_3, x_2x_4, x_3x_4$  – двухстороннее взаимодействие;

$x_1x_2x_3, x_1x_2x_4, x_1x_3x_4, x_2x_3x_4$  – трехстороннее взаимодействие;

$x_1x_2x_3x_4$  – четырехстороннее взаимодействие;

+1/-1 – верхняя и нижняя установки.

Таблица 1 – Матрица планирования для обработки результатов

№	Факторы				Взаимодействия											$\bar{y}_j$
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_1x_2$	$x_1x_3$	$x_1x_4$	$x_2x_3$	$x_2x_4$	$x_3x_4$	$x_1x_2x_3$	$x_1x_2x_4$	$x_1x_3x_4$	$x_2x_3x_4$	$x_1x_2x_3x_4$	
1	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	+	51,2
2	+	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	-	-	4,2
3	-	+	-	-	-	+	+	-	-	+	+	+	-	+	-	88,3
4	+	+	-	-	+	-	-	-	-	+	-	-	+	+	+	38,4
5	-	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	+	-	23,6
6	+	+	+	-	-	+	-	-	+	-	-	+	-	+	+	19,7
7	-	+	+	-	-	-	+	+	-	-	-	+	+	-	+	77,3
8	+	+	+	-	+	+	-	+	-	-	+	-	-	-	-	21,6
9	-	-	-	+	+	+	-	+	-	-	-	+	+	+	-	50,7
10	+	-	-	+	-	-	+	+	-	-	+	-	-	+	+	16,5
11	-	+	-	+	-	+	-	-	+	-	-	+	-	-	+	80,3
12	+	+	-	+	+	-	+	-	+	-	-	+	-	-	-	89,1
13	-	-	+	+	+	-	-	-	-	+	+	+	-	-	+	32,8
14	+	-	+	+	-	+	+	-	-	+	-	-	+	-	-	17,7
15	-	+	+	+	-	-	-	+	+	+	-	-	-	+	-	135,9
16	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	86,5

Работу выполняем в следующем порядке:

1. Кодировать переменные;
  2. Достаиваем матрицу планирования в кодированных переменных с учетом парных взаимодействий и дополняем столбцом средних значений отклика;
  3. Вычисляем коэффициенты уравнения регрессии;
  4. Проверяем вычисленные коэффициенты на значимость, предварительно определив дисперсию воспроизводимости, и получаем уравнение регрессии в кодированных переменных;
  5. Проверяем полученное уравнение на адекватность;
  6. Проводим интерпретацию полученной модели;
  7. Выписываем уравнение регрессии в натуральных переменных.
- Проверив уравнение на значимость коэффициентов по критерию Стьюдента

[7 - 9], отбрасываются коэффициенты, стоящие перед фактором  $z_3$ ,  $z_{13}$ , так как они не являются значимыми (фактор  $z_3$  не является значимым только в данном опыте, так при других условиях при увеличении объемного расхода электролита – повышается и скорость съема, и количество снятого материала). Уравнение было проверено по критерию Фишера [10 - 12] на адекватность.

Далее был проведен анализ коэффициентов перед факторами и их взаимодействиями. По уравнению видно, что наиболее сильное влияние оказывает фактор  $z_1$  – межэлектронный зазор, так как он имеет наибольший по абсолютной величине коэффициент. Так как перед коэффициентом стоит знак «-», то при уменьшении этого фактора, его значение на отклик будет возрастать и наоборот. [13]

$$y = 222,6 - 15,56z_1 - 0,774z_2 + 1,678z_4 - 0,013z_{12} + 0,31z_{14} + 0,002z_{23} - 0,04z_{24} + 0,023z_{34} - 0,003z_{123} + 0,006z_{124} - 0,02z_{134} + 0,001z_{234} - 0,0001z_{1234}$$

Оценка влияния струйной электролитной плазмы на поверхность стали 08X12H9T изучалось методом фотограмметрии. Результаты, в виде 3D модели поверхности после обработки, получены в программе 3DBuilder (Рис.1.).

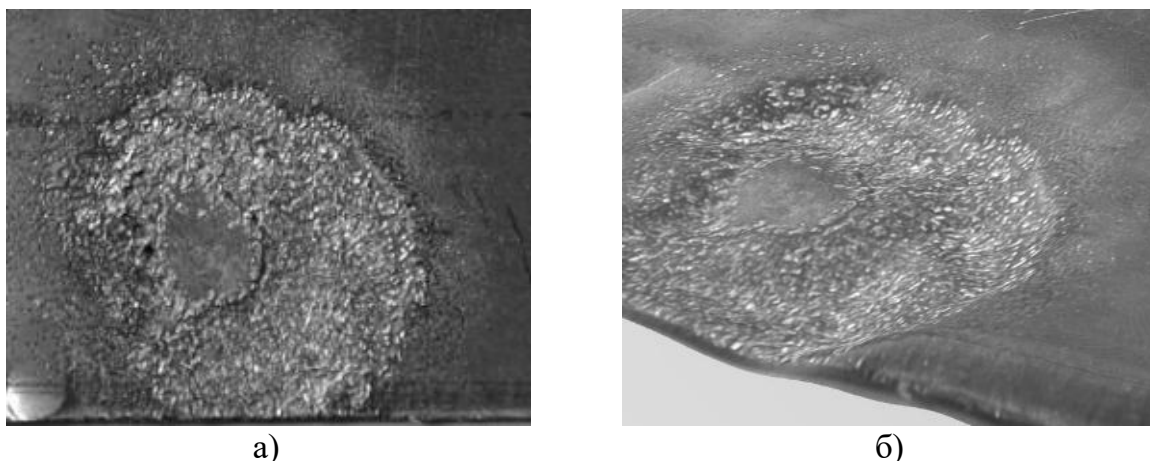


Рисунок 1 – Обработанная поверхность образца: а) фотография поверхности; б) трехмерная модель поверхности в программе 3DBuilder

Программа 3dBuilder позволяет построить 3д модель поверхности по фотографии из микроскопа. На рисунке 2 показана обработанная поверхность ближе.

На рисунке 3 показаны результаты лазерного сканирования поверхности, и преобразование полученных данных облака точек в трехмерную модель поверхности. Для открытия 3D моделей формата STL была использована программа SolidWorks.

Способ фотограмметрии отличается своей доступностью, но обладает недостатком – недостаточной точностью поверхности. Для более точной морфологии необходимо использовать дополнительное оборудование: микроскоп, набор линз, штатив для камеры, хорошее освещение, матовый талик (блестящие поверхности сложно распознать программе, чтобы построить качественное облако точек).

Способ лазерного сканирования наиболее точно строит облако точек и все изгибы поверхности, но способ является дорогостоящим, что доступно не каждому.

### **Заключение**

Уравнение линейной регрессии, выведенное в данной работе, поможет приблизиться к лучшему пониманию процессов, происходящих при струйной

электролитно-плазменной обработке. Показано, что в заданном диапазоне параметров наибольшее влияние на удельный съем по степени убывания оказывают межэлектронный зазор, концентрация электролита, напряжение электролитно-плазменного разряда.

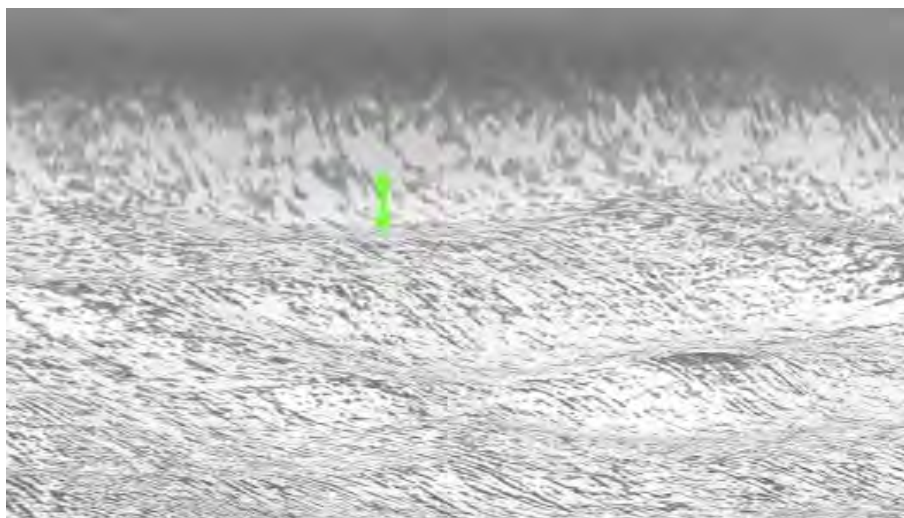


Рисунок 2 – 3D модель обработанной поверхности после лазерного сканирования в программе 3DBuilder

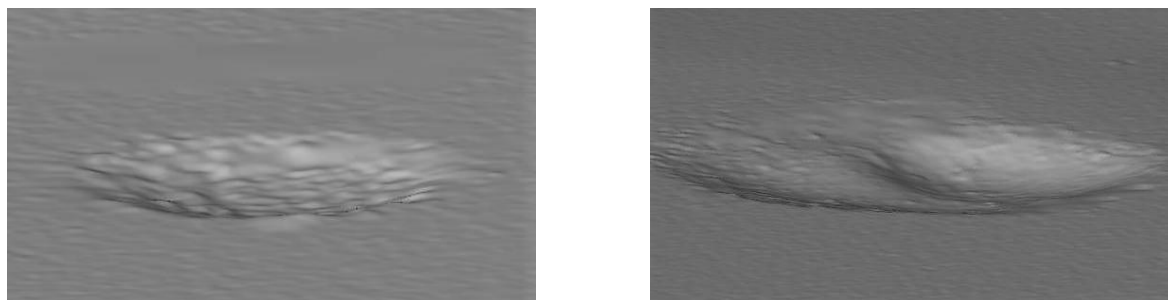


Рисунок 3 – 3D модель обработанной поверхности после лазерного сканирования в программе Solid Works

Использование программ 3D моделирования на основе фотограмметрии и лазерного сканирования поверхности позволяет построить зону обработки поверхности после воздействия на нее струйным электролитно-плазменным разрядом.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пат. 2 623 555 С1 Российская федерация, МПК С25F 7/00. Установка для электролитно-плазменной обработки турбинных лопаток/ Попов А. И. и др. Патентообладатель: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (ФГАОУ ВО «СПбПУ») (RU) - 2016120180, 24.05.2016; опубл. 27.06.2017 бюл. №18;

2. Куликов И. С. Электролитно-плазменная обработка материалов / И. С. Куликов, С. В. Ващенко, А. Я. Каменев. - Минск: Беларус. навука, 2010. - 232 с. - ISBN 978-985-08-1215-5.

3. Kireev K.V., Ermakov V.V., Kikkas K., Shcheglova A.E., Gasyuk D.P., Rodionova U. Mathematical modeling of arc extinction process in devices with liquid-metal contact //

Всборнике: Reliability, Infocom Technologies and Optimization (Trends and Future Directions). 6th International Conference ICRITO. 2017. С. 271-275.

4. Косова В.А., Гасюк Д.П. К вопросу анализа условий разработки технологических процессов машиностроительных предприятий // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2021. № 2. С. 655-658.

5. Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г., Черныш А.Я., Мельник Д.А. Модель поддержки принятия решений при формировании программ инновационного развития предприятий электротехнической отрасли машиностроения // Вестник Российского экономического университета имени Г.В. Плеханова. 2021. Т. 18. № 4 (118). С. 140-151.

6. Федотова А.М., Гасюк Д.П. Анализ рисков возникновения проблем с качеством технологической подготовки производства и разработка мероприятий по их снижению в условиях АО "НИИЭФА" // Металлообработка. 2021. № 1 (121). С. 50-54.

7. Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г., Липатова Н.Г., Черныш А.Я. Применение математических методов при проведении диссертационных исследований.- Москва: Российская таможенная академия, 2011.- 514 с.

8. Авдеев М.М. Информационно-статистические методы в управлении микроэкономическими системами / М.М. Авдеев [и др.]- Санкт-Петербург; Тула. 2001. 139 с.

9. Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г., Мартыщенко Л.А., Шатохин Д.В. Методы оперативного статистического анализа результатов выборочного контроля качества промышленной продукции.- Санкт-Петербург, Тула : Международная академия информатизации, 2001.- 72 с.

10. Коханова Н.М., Малькова А.Л. Выбор структуры производственных функций на основе синтеза безальтернативных статистических гипотез // Вестник Российской таможенной академии. 2008. № 4. С. 74-79.

11. Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г., Бажин Д.А., Барабанов В.В., Филиппов А.А. Модели организации и проведения испытаний элементов системы информационного обеспечения применения высокоточных средств // Труды Военно-космической академии им. А.Ф. Можайского. 2015. № 648. С. 6-12.

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

13. Соколовская И. Ю. Полный факторный эксперимент / И. Ю. Соколовская // Методические указания для самостоятельной работы студентов. - Новосибирск: НГАВТ, 2010. - 36 с.

Е.А. Хлопков<sup>1,2</sup>, С.В. Виноградов<sup>3</sup>, Д.П. Гасюк<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия, [hlopkovelisey@mail.ru](mailto:hlopkovelisey@mail.ru)

<sup>2</sup>ООО «ОПТИМИКСТ ЛТД», Санкт-Петербург, Россия

<sup>3</sup>АО «Завод «Универсалмаш», Санкт-Петербург, Россия

## **РАБОТА КОЛЬЦЕВЫХ СИЛОВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗ НИКЕЛИДА ТИТАНА В ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ ПРОЦЕССЕ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ИЗДЕЛИЙ ИЗ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

### **Аннотация**

В работе приводится применение кольцевых силовых элементов из никелида титана в качестве приводов прессов, действующих с помощью реализации эффекта памяти формы и предназначенных для создания постоянно действующего усилия в технологической операции.

*Ключевые слова:* эффект памяти формы, кольцевые силовые пучковые элементы, приводы, никелид титана.

### **Введение**

В настоящее время существует актуальная проблема защиты от вибрации работников предприятий и операторов систем. Данную проблему можно решать за счет применения средств индивидуальной защиты (СИЗ) от вибрации [1]. Технология изготовления наиболее эффективных средств защиты комбинированного типа является достаточно трудоемкой [2]. Одна из самых трудоемких операций – это соединение основы СИЗ и вибропоглощающей пленки ВПС-2,5 толщиной 0,5 мм.

Обеспечение качества технологического процесса требует оценки нескольких показателей, среди них постоянно действующее давление на пакет заготовок и температурный режим в течение времени. Ключевым аспектом в технологии является фактор давления на пакет заготовок в технологической операции.

Каким образом можно обеспечить давление внутри печи? Во-первых, применение гидравлического пресса позволит решить данную задачу, но в условиях единичного производства покупка пресса является очень дорогим приобретением. В том числе, большими будут затраты на введение в эксплуатацию, содержание и ремонт. Во-вторых, можно реализовать стационарное давление грузом на пакет заготовок (рис. 1). Недостатком технологического приема является снижение объема загрузки печи заготовками в 2 раза и сложностью эксплуатации.

Для решения данной проблемы применили новый физический принцип на основе функциональных материалов. В качестве такого материала выбран сплав TiNi, обладающий уникальными физико-механическими свойствами эффектов памяти формы (ЭПФ), пластичности превращения, обратимой памяти формы и другими.

На основе этих принципов работает кольцевой силовой пучковый элемент (КСПЭ), состоящий из бухты проволоки сплава TiNi из нескольких витков, имеющий заданную замкнутую круговую форму (рис. 2 и рис. 3а). Перед работой в технологическом оборудовании кольцевой элемент деформируется в одном из направлений (рис. 3б). В процессе нагрева через температурный интервал обратного

мартенситного превращения овал стремится вернуть первоначальную круговую форму в результате развития ЭПФ (рис. 3в).

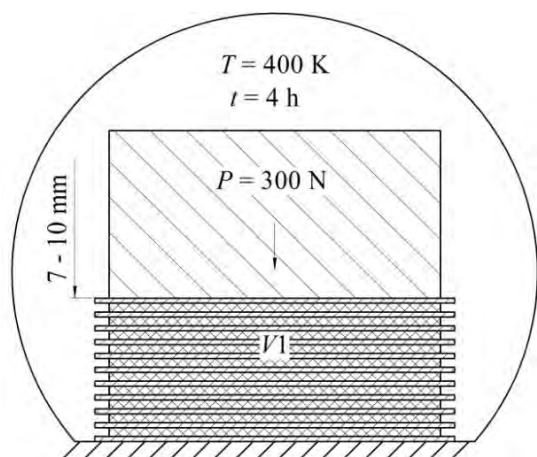


Рисунок 1 – Технологическая операция спекания пакета заготовок стационарным грузом



Рисунок 2 – Кольцевой силовой пучковый элемент (КСПЭ)

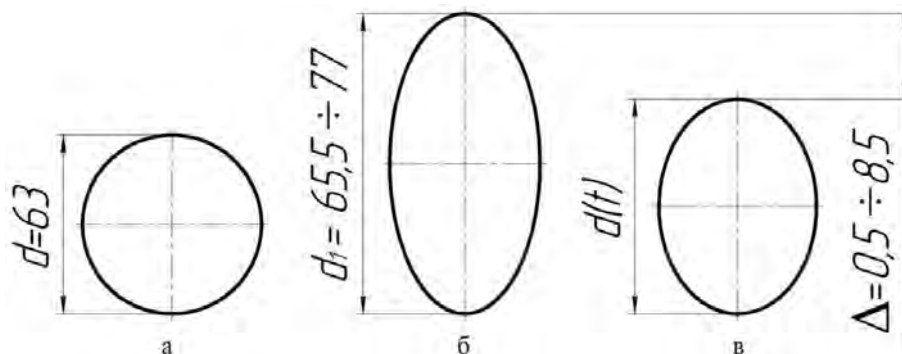


Рисунок 3 – Формы КСПЭ при работе: а – исходная, б – после начального деформирования, в – в процессе ЭПФ

Данные кольцевые приводы применили в разработке миниатюрных прессов для изготовления средств защиты от вибрации (рис. 4). Таким образом, объемные грузы удалось заменить парой приводов общей массой 60 г, способных создавать усилия до 1200 Н, что позволило повысить объем загрузки печи заготовками вдвое.

В ходе наблюдений за технологической операцией отметили деформационный эффект, подробно описанный в работах [3, 4]. Наличие такого формоизменения при изготовлении заготовок может повлиять на их качество [5 - 8]. Для исследования причин возникновения указанных деформационных процессов и определения силовых характеристик кольцевых силовых элементов был изготовлен специальный динамометр «ЛИНД», который описан в статьях [9, 10].

С помощью динамометра были проведены экспериментальные работы по исследованию влияния силового воздействия и температурных режимов, геометрии сечения силовых элементов на их деформационные и силовые характеристики [11 - 13]. Однако, при наблюдениях за технологической операцией отметили значительное снижение силового взаимодействия с пакетом заготовок на стадии соединения антивибрационного слоя и основы средств защиты. В динамометре при нагреве силовое взаимодействие «металлических мышц» с контртелом в основном нарастает.

В связи с этим оценивали деформационные характеристики КСПЭ при работе в технологическом оборудовании. Также следили за качеством выпускаемых заготовок.

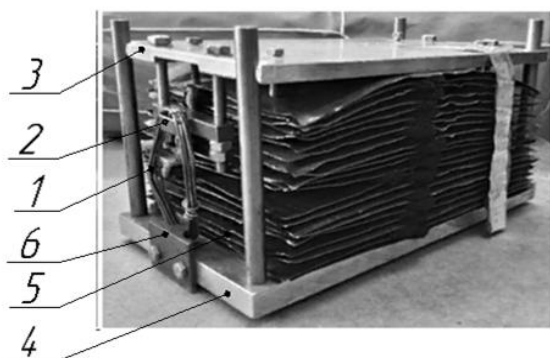


Рисунок 4 – Технологическая установка – пресс «ШеР», работающая на ЭПФ:  
1 – КСПЭ, 2 – захват, 3 – подвижная плита, 4 – основание, 5 – пакет заготовок, 6 – захват

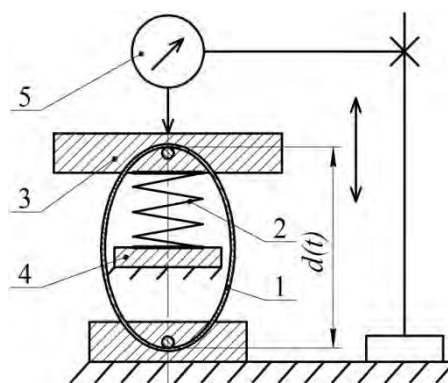


Рисунок 5 – Схема нагружения КСПЭ в динамометре: 1 – КСПЭ, 2 – контртело, 3 – подвижная плита, 4 – регулирующая фиксируемая плита, 5 – измерительная система,  $d(t)$  – характеристический размер КСПЭ

### Материалы и методы

Для исследований выбрана пара КСПЭ из сплава Ti-Ni 50,45 ат. %. Силовые элементы состояли из 5 витков проволоки диаметром 2 мм. В исходном состоянии «металлические мышцы» имеют форму правильной окружности диаметром  $\sim 63$  мм.

КСПЭ деформировали в одном из направлений в мартенситном состоянии при  $T = 271$  К. Затем силовые элементы устанавливали в захваты прессы «ШеР» и приводили во силовое взаимодействие с пакетом заготовок. Эволюцию деформационных процессов при нагреве до 403 К в камере термостата определяли как расстояние  $\Delta$  между подвижной плитой и основанием.

### Результаты и обсуждение

На рисунке 6 показано формоизменение КСПЭ в технологической операции изготовления изделий из композитных материалов.

Рост параметра  $\Delta$  начинался на 3 мин при 297 К, а его значение достигло 1,5 мм. С начала технологической операции до 22 мин деформационные характеристики увеличились лишь до 2 мм. Температура при этом поднялась до 337 К. После чего до 150 мин с начала нагрева значение  $\Delta$  возрастало интенсивнее, а его рост был практически линейным. Формоизменение «металлических мышц» составило 14 мм при достижении температуры 399 К. Дальнейший процесс происходил при более низких темпах нагрева. Последующие 20 мин проходили при повышении температуры лишь на 3 К. Деформационные параметры КСПЭ практически не менялись. При последующем нагреве снова отметили эволюцию деформационных характеристик. С ростом температуры до 407 К формоизменение «металлических мышц» составило еще  $\sim 2$  мм.

Таким образом, отмечена стадийность деформационных процессов, связанная с постепенным прогревом заготовок и термопластичной пленки от краев к центру пакета. Все изделия при контроле качества соответствовали образцу-этalonу.



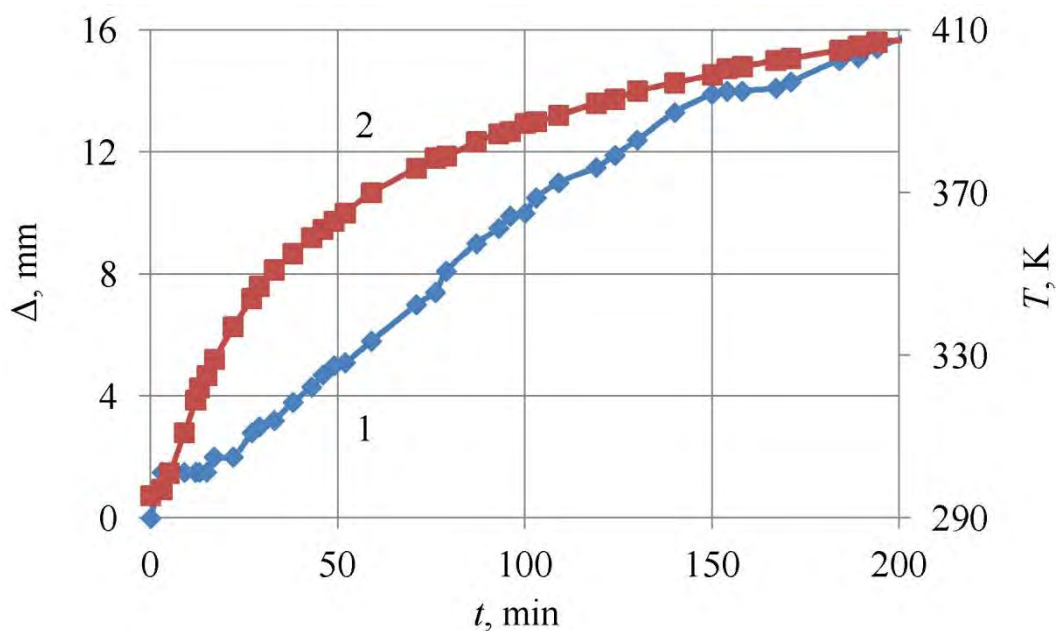


Рисунок 6 – Формоизменение КСПЭ (1) в технологической операции при нагреве (2)

### Заключение

Для оптимизации технологического процесса и обеспечения постоянного силового воздействия кольцевых силовых элементов из никелида титана на пакет заготовок необходима модернизация прессов, действие которых основано на использовании эффекта памяти формы. Первое решение данной задачи представлено в [14].

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Смирнов, В.В. Управление антивибрационной защитой на производстве / В.В. Смирнов, А.И. Сятковский, Т.Б. Скуратова, Е.А. Хлопков, С.И. Муравьев, Ю.Н. Вьюненко // Перспективные материалы и технологии: материалы международного симпозиума, Минск, 23 - 27 августа 2021 г. / под. ред. В.В. Рубаника - Минск: Белорусский государственный институт стандартизации и сертификации», 2021. - С. 398-401.
2. Смирнов, В.В. Об эффективности индивидуальных средств защиты рук от вибрации / В.В. Смирнов, А.И. Сятковский, С.И. Муравьев, Е.А. Хлопков, Ю.Н. Вьюненко // Техническая акустика: разработки, проблемы, перспективы: материалы международной научной конференции, Витебск, 25-28 мая 2021 г. - Витебск: УО «ВГТУ», 2021. - С. 62-65.
3. Тихомиров, А.А. Эффект памяти формы и деформационное поведение кольцевых силовых пучковых элементов / А.А. Тихомиров, И.В. Артемьев, Ю.Н. Вьюненко // XXI Петербургские чтения по проблемам прочности: сб. материалов. - СПб.: Соло, 2014. - С. 248-250.
4. Вьюненко, Ю.Н. Особенности деформационно-силового поведения «металлических мышц» из сплава TiNi / Ю.Н. Вьюненко // Вестник Тамбовского ун-та. Серия: Естественные и технические науки. - Тамбов: ТГУ, 2016. - Т. 21. - №. 3. - С. 791-794.
5. Глухов, В.В. Управление качеством. Учеб.пособие / В.В. Глухов, Д.П. Гасюк. - Санкт-Петербург: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. - 399 с.

6. Косова, В.А. К вопросу анализа условий разработки технологических процессов машиностроительных предприятий / В.А. Косова, Д.П. Гасюк // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. - 2021. - № 2. - С. 655-658.

7. Федотова, А.М. Анализ рисков возникновения проблем с качеством технологической подготовки производства и разработка мероприятий по их снижению в условиях АО "НИИЭФА" / А.М. Федотова, Д.П. Гасюк // Металлообработка. - 2021. - № 1 (121). - С. 50-54.

8. Гасюк, Д.П. О содержании сущности качества менеджмента, качества продукции и их гармонизации / Д.П. Гасюк // В сборнике: Управление качеством в интересах устойчивого развития. Сборник материалов межвузовской научно-практической конференции. - 2019. - С. 31-36.

9. Выюненко, Ю.Н. Механические свойства «металлических мышц» из материалов с эффектом памяти формы / Ю.Н. Выюненко, Е.А. Хлопков, Г.А. Волков // Перспективные материалы и технологии: монография. В 2-х т. / В.А. Андреев [и др.]; под ред. В.В. Клубовича. - Витебск: УО «ВГТУ», 2017. - Т.1. - С. 412-429

10. Хлопков, Е.А. Совершенствование динамометра для исследования деформационно-силовых характеристик «металлических мышц», действующих на эффекте памяти формы / Е.А. Хлопков, Т.А. Макарова, М.В. Янченко, А.С. Турзаков, С.В. Осипенко // Современное машиностроение: Наука и образование: материалы 7-й Международной научно-практической конференции. / Под ред. А.Н. Евграфова и А.А. Поповича. - СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2018. - С. 526-535.

11. Выюненко, Ю.Н. Управление деформационно-силовыми свойствами «металлических мышц» из сплава TiNi / Ю.Н. Выюненко, А.С. Турзаков, Е.А. Хлопков, Г.А. Волков // Физика и техника высоких давлений. - 2017. - Т.27. - №4. - С. 65-72.

12. Выюненко, Ю.Н. Деформационно-силовые свойства равномассовых кольцевых силовых пучковых элементов / Ю.Н. Выюненко, Е.А. Хлопков, А.С. Турзаков // Физика и техника высоких давлений. - 2020. - Т. 30. - № 4. - С. 65-69.

13. Выюненко, Ю.Н. Деформационно-силовые свойства кольцевых силовых ленточных элементов из сплава TiNi / Ю.Н. Выюненко, А.С. Турзаков, Е.А. Хлопков, Г.А. Волков // Перспективные материалы и технологии: материалы международного симпозиума (22-26 мая 2017 года, Витебск, Беларусь). В 2-х ч. Ч.1. / под ред. В.В. Рубаника - Витебск: УО «ВГТУ», 2017. - С. 36-38.

14. Помыткин, С.П. Эволюция силовых параметров кольцевых приводов в технологическом процессе получения слоистых материалов / С.П. Помыткин, Ю.Н. Выюненко // Актуальные проблемы прочности: материалы международной научной конференции, Витебск, 23-27 мая 2022 года / под ред. В.В. Рубаника. - Минск: УП «ИВЦ Минфина», 2022. - С. 127-129.

Х. Арслан, М.Т. Коротких  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Санкт-Петербург, Россия, [hazemarslan92@gmail.com](mailto:hazemarslan92@gmail.com)

## ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИЕ ЗАЖИМНЫЕ УСТРОЙСТВА ДЛЯ СТАНОЧНЫХ ПРИСПОСОБЛЕНИЙ

### Аннотация

Статья посвящена определению характеристик термомеханических зажимных устройств с применением материалов из сплава с памятью формы (СПФ). Рассмотрены силовые зажимные элементы, которые могут быть использованы в станочной оснастке. В результате проделанной работы, разработан привод, который позволяет закрепление и раскрепление заготовок производить дистанционно в условиях автоматизированного производства. Такой привод может быть использован в различных малогабаритных устройствах, способных развивать большие усилия.

*Ключевые слова:* зажимное устройство, память формы, термомеханический силовой привод, станочные приспособления.

### Введение

В настоящее время при автоматизации машиностроительных производств на основе использования станков с ЧПУ определенной проблемой является автоматизация установки, закрепления и снятия заготовок в станочных приспособлениях.

Силовые приводы, работающие с пневматическими, гидравлическими и механическими системами, могут быть заменены приводом для закрепления заготовок с приводами из СПФ из-за их небольшого веса и высокой мощности. Кроме того, они проще, с меньшим количеством деталей и, как правило, просты в обслуживании и проверке [1-5].

В классе патентов МПК F03G7/06 представлен широкий спектр таких устройств. Известны такие устройства, в которых изготовленные элементы из СПФ, расположены параллельно с пружиной сжатия, а пружина деформируется за счет воздействия нагрева элементов с памятью формы, например, WO 2019/043599 A1. Недостатком таких устройств являются увеличенные габариты и инерционность срабатывания, благодаря большой массе нагреваемых элементов [6].

В данной статье рассматривается разработка термомеханических зажимных устройств для станочных приспособлений, отличающихся компактностью при высоких силовых характеристиках.

### Методы

Предлагаемый привод зажимного устройства [7] состоит из упругого элемента, например, пружины сжатия и элемента из материала с памятью формы, отличающийся тем, что термомеханический силовой привод снабжен фланцами из изоляционного материала, расположенными на торцах пружины, а элемент из СПФ выполнен в виде тороидальной катушки, намотанной вокруг фланцев и пружины.

При нагреве предварительно пластически растянутых элементов из СПФ до критической температуры они могут укорачиваться на длину, определяемую

допустимой относительной пластической деформацией. Например, для сплава «нитинол» она достигает  $\delta = 5\%$ , что позволяет использовать его для большого количества рабочих циклов.

При этом возникающие в этом материале напряжения  $\sigma$  могут достигать 800 МПа. В то же время при растяжении этого сплава при температуре ниже критической его предел прочности при переходе в псевдопластическое состояние  $\sigma_T$  не велик и составляет не более 200 МПа [8].

На рисунке 1 представлено термомеханическое зажимное устройство, в котором пружина сжатия 1 находится между фланцами 2 из изоляционного материала (капролон) вокруг которых намотана тороидальная катушка из проволоки 3 из материала с памятью формы (нитинол), причем намотка осуществлена при сжатой пружине.

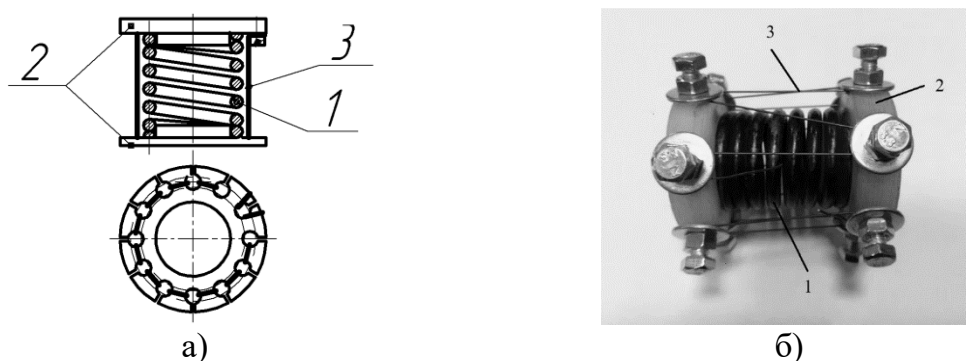


Рисунок 1 – Термомеханическое зажимное устройство: а) 1 – силовой элемент из пружины сжатия, 2 – фланцы из изоляционного материала (капролон), 3 – проволоки из металла с эффектом памяти формы (нитинол); б) модель зажимного устройства

На рисунке 2 показана последовательность создания и работы зажимного элемента. Пружина в свободном состоянии длиной  $L_0$  (рисунок 2, а) сжата до предела упругости на длину  $L_1$  и в сжатом состоянии между изолирующими фланцами на торцах пружины катушку наматывают без предварительного натяжения, (рисунок 2, б). Сила сжатия пружины снимается, и она расправляется на длину  $L_2$ , растягивая проволоку из СПФ на заданную величину, не превышающую порога пластической деформации, восстанавливаемой при фазовом переходе (рисунок 2, в).

При нагреве проволоки до температуры фазового перехода, например, при пропускании через нее электрического тока, она укорачивается и сжимает пружину до размера  $L_1$ , что может быть использовано для освобождения зажатого объекта (рисунок 2, г). А при остывании проволоки пружина стремится удлинить до размера  $L_2$ , что и используется для зажима объекта крепления. Определить силу закрепления заготовки можно по диаграмме сжатия пружины с установленными на ней элементами СПФ (рисунок 2, д). В этом случае характеристика такого зажимного элемента будет определяться ходом  $L_2-L_1$  с максимальным усилием  $P_2$ .

Учитывая, что предельное удлинение элементов из памяти формы не может превышать 5%, можно определить допустимую силу растяжения элементов:

$$P_{5\%} = P_{max} \left( 1 - \frac{0,05 \cdot L_1}{L_0 - L_1} \right) \quad (1)$$

где  $L_0$  – свободная длина пружины,  $L_1$  – длина пружины при сжатии до предела упругости с силой  $P_{max}$ . Тогда суммарная площадь поперечного сечения элементов из СПФ:

$$S = \frac{P_{5\%}}{\sigma_T} \quad (2)$$

где  $\sigma_T$  – предел текучести СПФ при его квазипластической деформации,  $P_{5\%}$  – сила, воспринимаемая проволоками из СПФ. А длина пружины после растяжения установленных элементов составит:

$$L_2 = 1,05 \cdot L_1 \quad (3)$$

Если задаться, что ход при раскреплении:

$$X = \frac{0,05 \cdot L_1}{2} \quad (4)$$

то сила закрепления будет:

$$P_{fix} = \frac{P_{max}}{2} \quad (5)$$

Рабочий ход такого зажимного устройства составит  $0,05L_1$ , что довольно незначительно, но для раскрепления заготовки и простого ее снятия, и установки в приспособлениях освобождение ее на  $0,7...2$  мм достаточно.

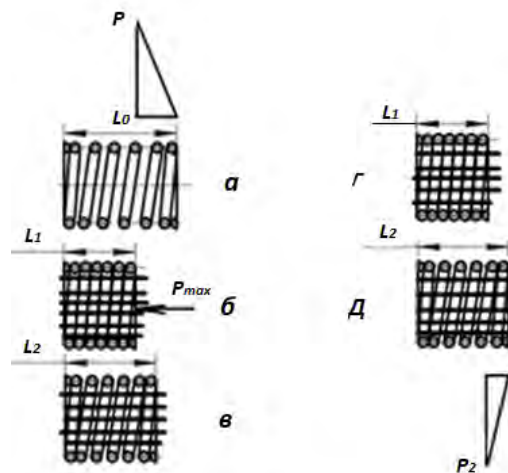


Рисунок 2 – Последовательность создания и работы зажимного элемента

### Результаты и обсуждение

Задача расчета этого зажимного устройства имеет несколько решений, учитывая, что в качестве пружины могут быть использованы как винтовые пружины, так и тарельчатые пружины, а также прорезные пружины. Расчеты показали, что даже зажимные элементы с винтовыми пружинами сжатия могут быть более компактными по сравнению с пневматическими (см. табл. 1).

Таблица 1 – Характеристики зажимных элементов с применением СПФ

Вариант	d, мм	D, мм	L <sub>0</sub> , мм	L <sub>1</sub> , мм	L <sub>2</sub> , мм	N	K, Н/мм	P <sub>fix</sub> , Н	S, мм <sup>2</sup>	d <sub>n</sub> , мм	n
1	4	25	52	32	33,6	5,5	29,23	292,3	2,15	0,5	5
2	5	34,5	57,5	32	33,6	4,5	33,19	423,2	2,97	0,5	7
3	5,5	36,5	52	33	34,6	4	46,16	438,5	3,2	0,5	8

где  $d$  – диаметр проволоки пружины,  $D$  – средний диаметр пружины,  $L_0$  – длина пружины в свободном состоянии,  $L_1$  – длина полностью загруженной пружины при  $P_{max}$ ,  $L_2$  – длина пружины с установленными после ее сжатия элементами из СПФ,  $N$  – количество рабочих витков пружины,  $K$  – жесткость пружины,  $P_{fix}$  – сила закрепления с рабочим ходом 0,8 мм,  $S$  – суммарная площадь поперечного сечения проволоки нитинола,  $d_n$  – диаметр проволоки нитинола,  $n$  – число ветвей проволоки нитинола.

На рисунке 3 показана модель экспериментального привода, в котором нагрев элементов из СПФ осуществлялся пропусканием электрического тока от источника напряжением 5В.

В простейшем случае предлагаемое зажимное устройство может быть использован в автоматизированных прихватах (рисунок 4), в которых заготовка освобождается при нагреве элементов из СПФ электрическим током.

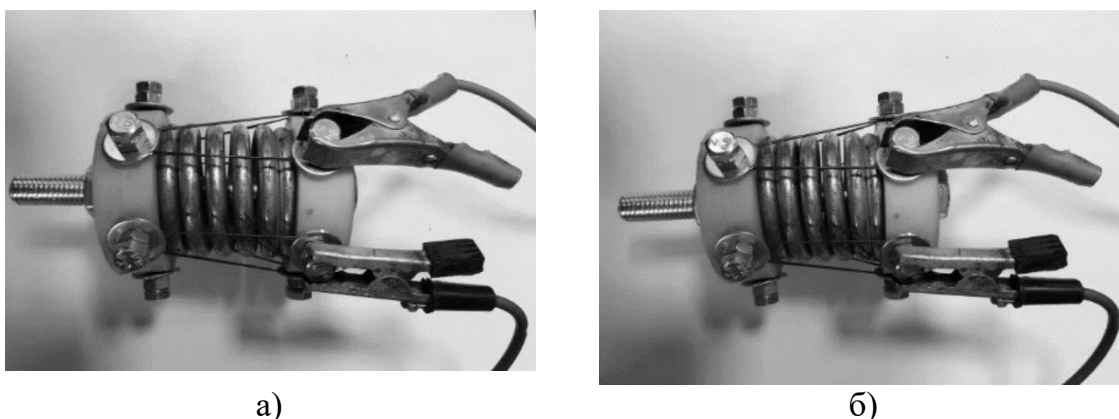


Рисунок 3 – Экспериментальный привод: а) при холодных элементах из СПФ б) при нагреве элементов из СПФ

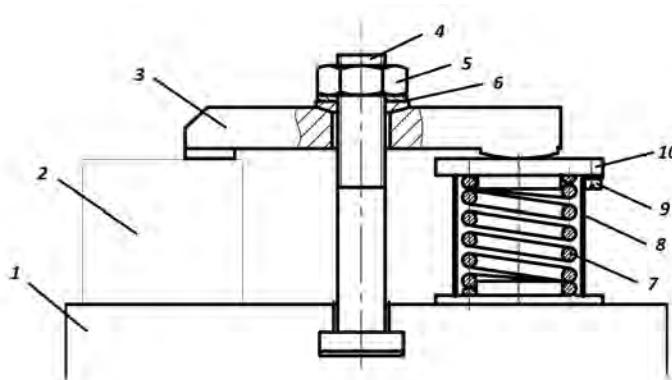


Рисунок 4 – Автоматизированный прихват: 1 – основание, 2 – заготовка, 3 – прижимная планка, 4 – шпилька, 5 – гайка, 6 – шайба, 7 – пружина, 8 – проволока из материала с эффектом памяти формы, 9 – клеммы для подвода электрического тока, 10 – фланец из изоляционного материала

## **Заключение**

Разработанная и представленная в данной статье новая конструкция зажимного устройства на основе материала с памятью формы может быть использована в станочных приспособлениях для станков с ЧПУ и обеспечивает надежное закрепление заготовок при отсутствии подвода энергии.

## **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Hirose, S. Development of shape-memory alloy actuators. Performance assessment and introduction of a new composing approach / S. Hirose, K. Ikuta, Y. Umetani. // *Adv. Robot.* - 1988. - V. 3. - № 1. - P. 3-16.
2. Ma, J. High temperature shape memory alloys / J. Ma, I. Karaman, R.D. Noebe. // *International Materials Reviews.* - 2010. - V. 55. - № 5. - P. 257-315.
3. Nespoli, A. The high potential of shape memory alloys in developing miniature mechanical devices: a review on shape memory alloy mini-actuators / A. Nespoli, S. Besseghini, S. Pittaccio, E. Villa, S. Viscuso. // *Sensor Actuator Phys.* - 2010. - V. 158. - № 1. - P. 149-160.
4. Jani, J.M. A review of shape memory alloy research, applications and opportunities / J.M. Jani, M. Leary, A. Subic, M.A. Gibson. // *Materials and Design.* - 2014. - V. 56. - P. 1078-1113.
5. Глушечков, В.А. Многозвенные силоприводы из материала с памятью формы и их характеристики / В.А. Глушечков, В.К. Алехина // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук.* - 2017. - С. 483-488.
6. Патентный фонд: [сайт]. – Москва - . - URL: <http://www.fips.ru> (дата обращения: 22.04.2022). - Текст: электронный.
7. Arslan, H. Electromechanical clamping device using shape memory materials / H. Arslan, M.T. Korotkih. // *Advances in Mechanical Engineering, LNME.* - 2022. - P. 150-158.
8. Бледнова, Ж.М. Роль сплавов с эффектом памяти формы в современном машиностроении / Ж.М. Бледнова, М.А. Степаненко. - Краснодар: 2012. - 69 с.

## ПРОБЛЕМЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ТОРЦОВЫХ ФАСОК НА ЗУБОЗАКРУГЛЯЮЩИХ СТАНКАХ

### Аннотация

Для повышения плавности переключения зубчатых колес в механизмах коробок скоростей и коробок переключения передач производят закругление торцов зубьев зубчатых колес. Профиль закругления зависит от условий работы колеса. Проведена работа по модернизации зубозакругляющего станка 5Н582 для изготовления на нем нестандартного профиля торца зуба - фаски 120 градусов. Описан алгоритм профилирования кулачка с примерами расчета координат случайно взятой точки на профиле кулачка. После модернизации станок переходит в класс полуавтоматов с обозначением КСМ-5530. Стабильные характеристики выпускаемой продукции позволили внедрить полуавтомат КСМ-5530 для обработки торцов колес в оборонной промышленности страны для безопасной и безотказной эксплуатации военной техники.

*Ключевые слова:* Зубчатые колеса, модернизация, зубозакругляющий станок, кулачок, кулачковый механизм, траектория перемещения инструмента.

### Введение

В настоящее время используют множество механизмов, в работе которых зубчатые колеса переключаются путем осевого перемещения без остановки его работы. [1, 2]. В момент переключения передачи колеса испытывают нагрузки, влияющие на плавность работы механизма и ресурс самих колес, что представляет собой одну из главных проблем работоспособности передачи. Для облегчения ввода зубьев во впадины сопряженных колес, а также для устранения ударов и выкрашивания кромок на торце зуба колеса производят закругление, которое выполняют на зубозакругляющих станках [3].

После операции на зубозакругляющем станке изготовленные профили торца зуба не позволили зубчатым колесам плавно входить в зацепления на требуемых высоких оборотах механизма. Имеющееся на производстве оборудование позволяет получать радиус на торце зуба, что в корне не удовлетворяет условиям эксплуатации механизмов. Такая форма зуба, в частном случае, не позволяет входить в зацепление зубчатым колесам на высоких оборотах. При соударении торцов колес происходит утыкание, что ведет к заклиниванию передачи. Определено, что для успешной работы конкретного механизма на торце зуба необходимо получить фаску под углом 120 градусов.

### Методы

Как показал анализ технологических возможностей зубозакругляющего оборудования, оптимальным решением проблемы является модернизация отечественного станка 5Н582 с возможностью расширения его технологических



задач. После модернизации, станок должен иметь возможность обработки торцов зубьев зубчатых колес под углом 120 градусов, иметь класс точности не ниже «Н» по ГОСТ 8-82, а также перейти в класс «полуавтомат».

### **Результаты и обсуждение**

В исходной конструкции станка 5Н582 предусмотрен кулачковый механизм, задающий траекторию движения инструмента в процессе обработки. Его геометрия является основным параметром получаемого профиля зуба [4].

В связи с этим одной из основных задач является проектирование и изготовление кулачка для кулачкового механизма с новым профилем, позволяющем получать фаску в 120 градусов на торцах зубьев зубчатых колес разной конфигурации (модуля, диаметра и числа зубьев).

Исходя из конструкции станка, для достижения поставленной цели необходима замена некоторых узлов станка, таких как кулачковый механизм, привод подвода стойки и механизм подвода инструмента и его вывода из рабочей зоны. В связи с описанной выше целью работы, имеющимися техническими характеристиками станка, а также недостатками базовой модели станка и требуемым результатом можно сформулировать решаемые задачи:

Проектирование профиля кулачка для получения фаски в 120 градусов на торце зуба заготовки.

Модернизация механизма подвода суппортной стойки в рабочую зону путем замены ее на шарико-винтовую пару.

Модернизация кинематической схемы станка путем установки электродвигателей, позволяющих использовать систему ЧПУ.

Разработка механизма вывода инструмента из рабочей зоны станка после окончания обработки.

Исходя из Технического задания, предъявленного заказчиком, была спроектирована траектория движения обрабатывающего инструмента - фрезы (рисунок 1, поз.1.). В момент начала обработки фреза находится над вершиной обрабатываемого зуба. Далее, за первую половину оборота кулачка, фреза 1 опускается во впадину между двумя соседними зубьями в положение 3, тем самым обрабатывая одну из сторон зуба. Вторая половина оборота кулачка поднимает фрезу над вершиной соседнего зуба, что приводит к обработке одной его стороны. Для закругления всех зубьев кулачку необходимо сделать количество оборотов, равное количеству зубьев зубчатого колеса.

В качестве примера, на рисунке 1, б приведена схема построения массива перепадов высоты при обработке шлицевого венца с количеством зубьев  $z = 23$  и модулем  $m = 5$ . На схеме так же указан шаг зацепления  $P_t$ .

Необходимыми данными при проектировании траектории являются: модуль зубчатого (шлицевого) венца; диаметр инструмента; количество интервалов, на которые разбивается траектория движения фрезы (чем больше интервалов – тем выше точность).

Так же важным является диаметр исходной заготовки для кулачка. Это не влияет напрямую на точность итогового механизма или на процесс проектирования, но отразится на наладках станка на конкретную деталь. Чем меньше диаметр исходной заготовки под кулачок – тем выше частота циклов обработки. Т.к. за один оборот кулачка происходит обработка двух разноименных сторон одного зуба (шлица) – за один оборот кулачка заготовка так же поворачивается на один шаг, что

влечет за собой увеличения частоты оборотов шпинделя изделия. Другими словами, уменьшение диаметра исходной заготовки кулачка увеличивает производительность станка, но уменьшает его ресурс, что не всегда приемлемо.

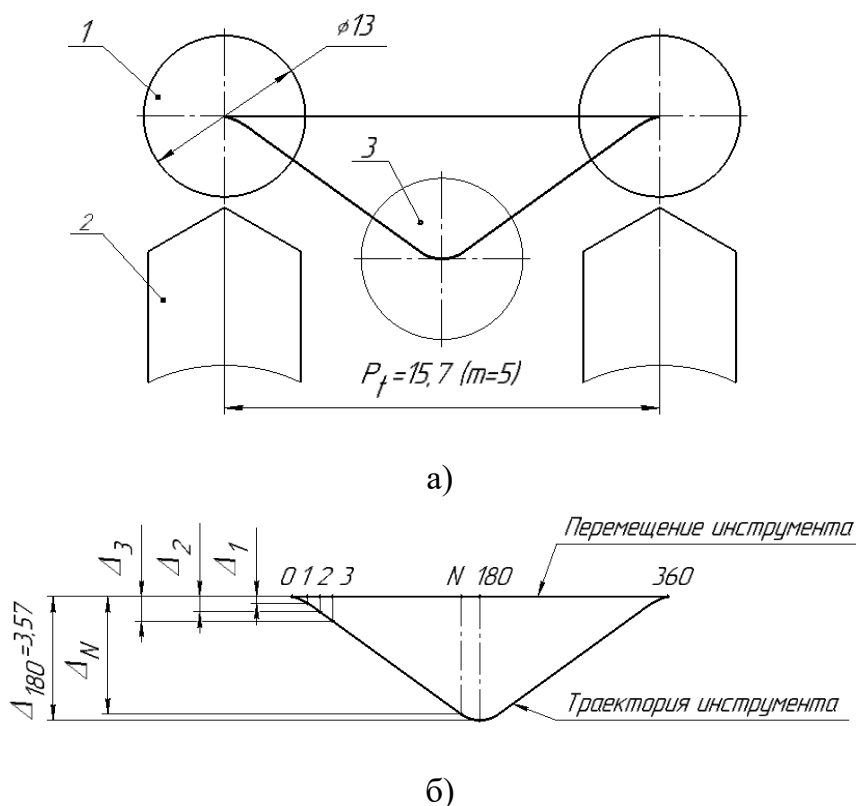


Рисунок 1 – Схема траектории движения фрезы:

а) схема перемещения фрезы, б) схема построения массива перепадов высоты

Далее, полученная траектория перемещения инструмента разбивалось на 360 равных отрезков. После этого строились проекции каждой полученной точки на траекторию движения инструмента. Вычислялся перепад высоты  $\Delta$  в каждой точке, а результат заносился в таблицу Excel для дальнейших расчетов. Исходя из построенной траектории, максимальный перепад высоты  $\Delta_{180} = 3,57$  мм.

Расчетные формулы нахождения координат вершин кулачка представлены ниже:

$$X = \cos\left(\alpha \cdot \frac{\pi}{180}\right) \cdot (R - \Delta) \quad (1)$$

$$Y = \sin\left(\alpha \cdot \frac{\pi}{180}\right) \cdot (R - \Delta) \quad (2)$$

На рисунке 2 приведен эскиз разработанного кулачка с указанием получившихся значений координат  $X$  и  $Y$  при взятом значении угла  $\alpha = 83^\circ$ .

В процессе модернизации стало ясно, что кинематическая схема имеющегося станка не позволяет обеспечить необходимые требования по нормам точности самого станка и получаемых на нем изделий [5-8]. Поэтому пришлось отказаться от перемещения суппортной стойки при помощи гидроцилиндра и прибегнуть к

использованию шарико-винтовых передач (ШВП), что, в свою очередь, потребовало полной замены гидравлической и эклектической схем станка. [9].

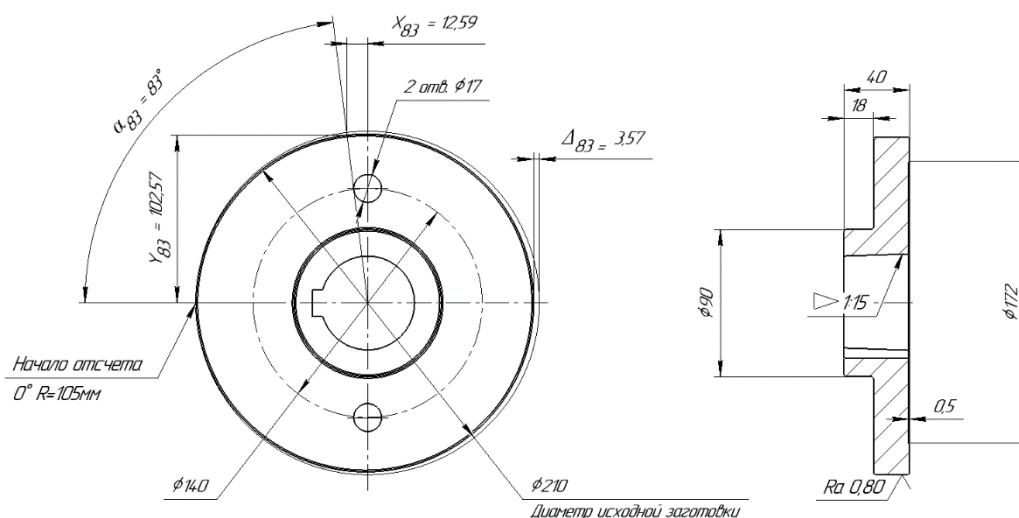
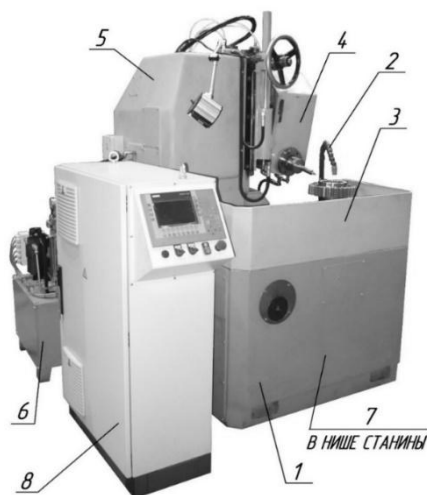


Рисунок 2 – Эскиз разработанного кулачка

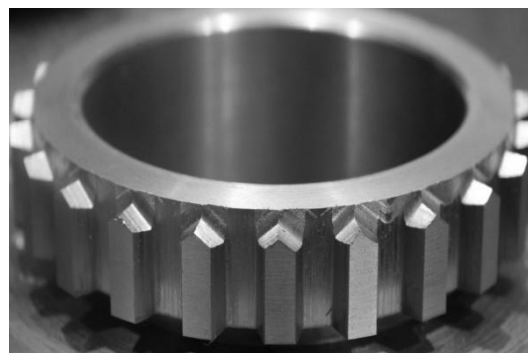
Применение ШВП дало возможность устанавливать на станки данной модели систему ЧПУ, что в свою очередь, привело к повышенной точности обработки и лучшему контролю работы станка [10,11]. Так же была подвергнута модернизации система смазки.

После модернизации станок 5Н530 переходит в класс полуавтоматов и получает номер КСМ-5530 [12].

На рисунке 3, а приведен общий вид станка и расположение его составных частей, на рис. 3, б - пример обработки венца после модернизации станка.



а)



б)

Рисунок 3 – а) общий вид станка КСМ-5530; б) пример обработки венца после его модернизации: 1 – станина, 2 – охлаждение, 3 – ограждение, 4 – суппорт, 5 – стойка, 6 – гидростанция, 7 – станция смазки, 8 – электрошкаф

Станок модели КСМ-5530 предназначен для закругления торцов зубьев прямозубых и косозубых цилиндрических колес наружного зацепления с числом зубьев  $Z=10...120$ , модулем от 3 до 8 мм и диаметром от 100 до 500 мм, а также

прямозубых колес внутреннего зацепления с числом зубьев  $Z=15\dots70$ , модулем от 3 до 5 мм и внутренним диаметром зубчатого колеса от 80 до 200 мм [12].

### **Заключение**

Результаты обработки торцов зубьев колес на модернизированном оборудовании показала стабильные характеристики выпускаемой продукции, что позволило внедрить полуавтомат КСМ-5530 для обработки торцов колес в оборонной промышленности страны для безопасной и безотказной эксплуатации военной техники.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. В.В. Осепчугов, А. К. Фрумкин. Автомобиль. Анализ конструкций, элементы расчета. М.: Машиностроение. 1989, с.66
2. Способ и устройство переключения зубчатых передач в многоступенчатой коробке передач [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://findpatent.ru/patent/226/2268162.html> © , 2012-2020.
3. Обработка зубчатых колес: учебн. пособие/ Пегашкин В.Ф.; М-во образования и науки РФ: ФГАОУ ВО «УрФУ им. первого Президента России Б.Н. Ельцина», Нижнетагил. технол. ин-т (фил.). – Нижний Тагил: НТИ (филиал) УрФУ, 2016. – 132 с.
4. ГОСТ 8-82. Станки металлорежущие. Общие требования к испытаниям на точность.
5. ГОСТ 19166-73 Станки зубозакругляющие. Нормы точности.
6. ГОСТ 22267-76. Станки металлорежущие. Схемы и способы измерений геометрических параметров.
7. ГОСТ 27. 410-87. Надежность в технике. Методы контроля показателей надежности и планы контрольных испытаний на надежность.
8. Савинов З.С., Макарова Т.А., Козарь И.И. Модернизация зубозакругляющих станков в целях расширения их технологических возможностей // СТИН. – 2022. - № 1. С 9-12.
9. Металлорежущие станки и автоматы. Учебник для ВУЗов. Под ред. А.С. Проникова — М.: Машиностроение. 1981г. – 482 с.
10. Гаврилин А.Н. Инновационная разработка в области повышения производительности и точности на станках с ЧПУ / А.Н. Гаврилин, О.О. Ангаткина, П. С. Рожков // Контроль. Диагностика. - 2011. - № 2. - С. 52-55.
11. Руководство по эксплуатации станка КСМ-5530 — ООО «КСМ СПб», 2020. - 64 с.

## РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА АВТОМАТИЧЕСКОГО ВЫБОРА ФРЕЗ ДЛЯ САМ СИСТЕМ

### **Аннотация**

В современном производстве широко используются автоматизированные системы подготовки производства такие как САМ системы. В ходе проектирования технологического процесса все проектные решения, связанные с назначением стратегий обработки, выбора оборудования, режущего инструмента, станочных приспособлений и т.д. принимаются технологом на основании его субъективного опыта. Одной из главных задач является обоснованный выбор режущего инструмента, который должен обеспечивать максимальную производительность обработки, наибольшую стойкость и минимальные затраты.

В данной статье произведен анализ отечественных и зарубежных публикаций, связанных с разработкой алгоритмов, теоретическим исследованиям по реализации автоматического выбора режущего инструмента с использованием автоматизированных средств подготовки производства.

*Ключевые слова:* автоматический выбор инструмента, автоматический выбор фрез, САМ системы, автоматизированная подготовка производства.

### **Введение**

В настоящее время наблюдается тенденция развития современного машиностроения путем автоматизации производственных процессов с целью повышения скорости принятия инженерных решений и снижении влияния на них субъективного опыта технолога. САМ системы для автоматизированной подготовки производства заняли ведущее место в проектировании технологических процессов, создания управляющих программ для станков с ЧПУ, оформления технологической документации, что позволило значительно сократить время технологической подготовки производства [1 - 14].

На сегодняшний день существует множество САМ систем интегрирующие в себе онлайн каталоги производителей фрез, на основании которых можно произвести автоматизированный выбор режущего инструмента под определенный вид обработки. Однако окончательный выбор режущего инструмента осуществляется на основе субъективного опыта технолога и не учитывает такие критерии, как показатели стоимости основного и вспомогательного инструмента, стойкость, мощность станка и пр., а, следовательно, и их влияние на себестоимость обработки. В связи с этим разработка экономически обоснованного выбора режущего инструмента с последующей алгоритмизацией и созданием модуля САМ систем для автоматического выбора режущего инструмента и, следовательно, снижения времени и трудоемкости технологической подготовки производства является актуальной задачей.

## Основная часть

В работе авторов Смирновой Д.А. и Рычкова Д.А. [15] представлен метод автоматизации технологической подготовки производства, включая расчет режимов резания и выбор оптимального режущего инструмента. Предложен алгоритм, на основе которого разработано специализированное программное обеспечение, позволяющего создание базы данных режущих инструментов, обрабатываемых материалов, при расчетах учитывать параметры режущей части инструмента, критерии работоспособности инструмента, качества поверхности, производительности и экономичности. Однако в работа имеет декларативный характер и не раскрыты основные критерии по выбору режущего инструмента, обоснованность их выбора и практическое подтверждение работоспособности данного программного обеспечения.

В публикации авторов Голод И.А. и Мурашко В.С. [16] представлена база данных, содержащая всю необходимую информацию об инструментах, а также о быстросменных непоретачиваемых пластинах для них и рекомендуемых режимах резания. База данных выполнена на основе каталога MitsubishiCarbide. Разработано приложение на языке программирования C# для удобства работы с базой данных и быстрого получения необходимой информации в виде таблицы. Был описан алгоритм работы приложения. Однако из выводов по работе не ясно, какой уровень автоматизации данной системы, основные критерии выбора режущего инструмента и его экономическое обоснование, а также возможность интеграции данного приложения в САМ системы.

В работе авторов Nicolas de Lima, Rossini Severino, Rodrigo Berretta Käsemödel, Adriano Fagalide Souza [17] представлен алгоритм, который распознает топографию детали и определяет наилучший набор диаметров инструмента для фрезерования полости, так как относительно большой диаметр инструмента сокращает время фрезерования, но не может охватить все углы, с другой стороны, небольшой инструмент, который может охватить все углы, требует больше времени для фрезерования. В результате данный алгоритм показал сокращение примерно на 17% времени для черновой обработки заготовки. Кроме того, алгоритм экономит время, затрачиваемое на анализ геометрии и принятие решения о том, какие инструменты следует использовать.

Однако в работе не приведено экономическое обоснование выбора режущего инструмента и технологические критерии его выбора.

В публикации авторов Баташова М.М. и Щербакова Н.П. [18] было выполнено:

- изучение существующих методик и алгоритмов выбора зуборезного инструмента;
- математическое моделирование процесса выбора зуборезного инструмента;
- создание прототипа модуля для автоматизированного выбора зуборезного инструмента в среде Microsoft Office Excel;
- разработка методических указаний по использованию прототипа автоматизированного выбора зуборезного инструмента.

В данной работе не продемонстрирован ни один результат, проведенного исследования, основные критерии выбора режущего инструмента и его экономическое обоснование.

В работе автора Лукиной С.В. [19] представлена автоматизация выбора структурных компоновок сборных режущих инструментов, которая была реализована с помощью линейных математических и разработанных аналитических моделей, и

инструментальных средств персональных компьютеров (Microsoft Office Excel). Также для наглядной работы математической модели были составлены сетевые графы.

Новизна работы заключается в создании математической модели автоматического выбора режущего инструмента и её интегрировании в Microsoft Office Excel. Однако не указаны основные критерии выбора режущего инструмента и его экономическое обоснование.

В работе авторов Guanghai Zhou, Xiongjun Yang, Chao Zhang, Zhi Li, Zhong dong Xiao [20] был предложен подход автоматического выбора специального режущего инструмента для обработки сложных поверхностей, на основе 2D чертежа. Данный подход был реализован созданием программы с использованием самообучающейся сети (ResNet), которая способна, из имеющейся базы данных чертежей сложных поверхностей, выбирать инструмент (Рисунок 1). Также был представлен принцип работы разработанного программного обеспечения.

Новизна работы является появление нового метода автоматического выбора режущего инструмента, а также создание программного обеспечения с использованием самообучающейся сети. Она значительно повышает эффективность подготовки производства и облегчает работу технолога. Однако решение об окончательном выборе режущего инструмента остается за технологом, а также не указаны основные критерии выбора режущего инструмента и экономическое обоснование этого выбора.

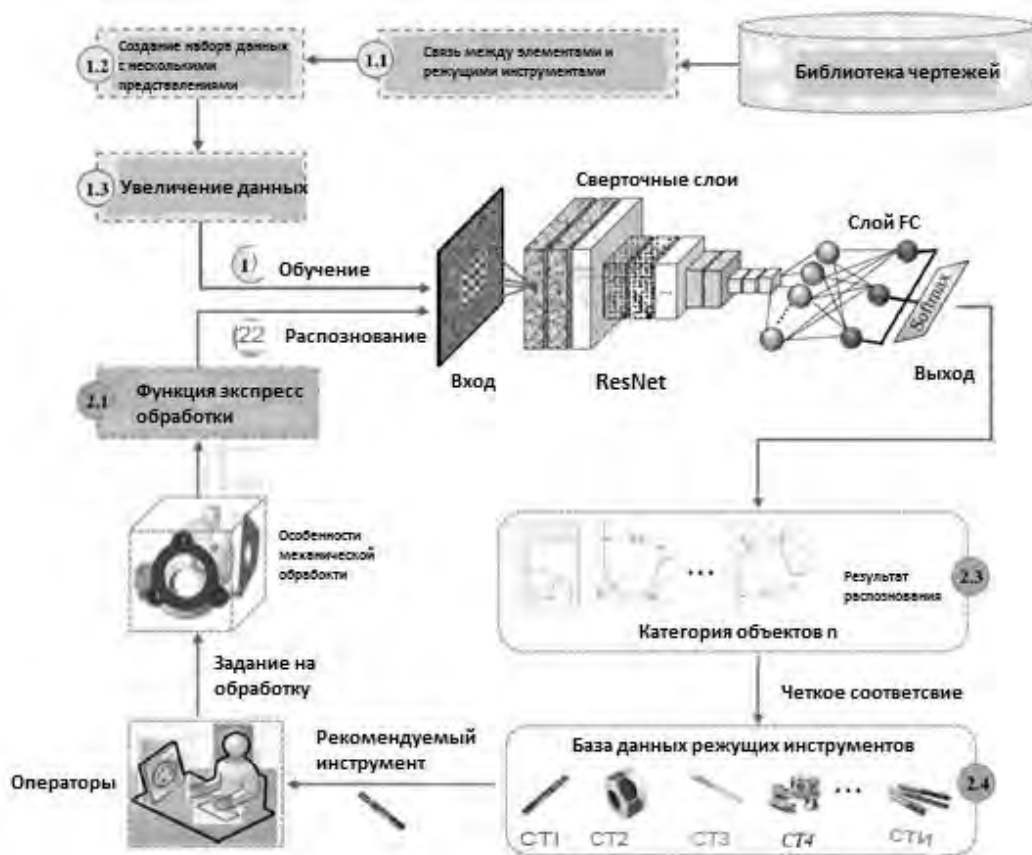


Рисунок 1 – Подход к выбору режущего инструмента, основанный на самообучении

В публикации авторов Daniel Johansson, Rebecka Lindvall, Christina Windmark, Rachid M'Saoubi, Antionette Can, Volodymyr Bushlya, Jan-Eric Ståhl [21] представлена оценка металлорежущего инструмента с использованием анализа соотношения затрат и срока службы инструмента. Была разработана методология оценки, сочетающая в себе производительность резания и производительность производства. Для проверки предложенной методологии представлено тематическое исследование, основанное на экспериментальных данных.

Новизна данной работы заключается в создании специальной методологии для проведения оценки металлорежущего инструмента на экономическую составляющую, но не ясны те критерии, по которым осуществляется его выбор, а также влияние стойкости на экономическую составляющую.

### **Заключение**

Анализ публикаций показал различные методы обеспечения автоматизированного выбора режущего инструмента, а именно: создание алгоритма с внедренной базой данных, содержащая всю необходимую информацию о режущих инструментах; внедрение в алгоритм выбора самообучающейся сети (нейросети); алгоритм автоматизированного выбора режущего инструмента по 2D чертежам; применение в алгоритмах математических моделей. Данные публикации показали, что работы в направлении автоматического выбора режущего инструмента ведутся и представляют научный и практический интерес. Но большинство работ имеет декларативный характер с отсутствием такой важной информации как: критерии выбора режущего инструмента, результаты апробации, влияние результатов выбора на себестоимость технологической операции.

Таким образом можно сделать вывод, что тема автоматического выбора режущего инструмента в системах автоматизированного производства перспективна и необходим целостный подход к ее развитию, основанный на четких технологических критериях выбора режущего инструмента, экономического обоснования данного выбора и возможность его применения в автоматизированных системах подготовки производства.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Глухов В.В., Гасюк Д.П. Управление качеством.- Санкт-Петербург, 2013. 399 с.
2. Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г., Чварков С.В. Модель и алгоритм оптимизации решений по технической подготовке предприятия к выполнению государственного оборонного заказа // Научный вестник оборонно-промышленного комплекса России. 2020. № 4. С. 5-11.
3. Косова В.А., Гасюк Д.П. К вопросу анализа условий разработки технологических процессов машиностроительных предприятий // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2021. № 2. С. 655-658.
4. Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г., Коханова Н.М., Малькова А.Л. Выбор структуры производственных функций на основе синтеза безальтернативных статистических гипотез // Вестник Российской таможенной академии. 2008. № 4. С. 74-79.
5. Гасюк Д.П. Нормативно-правовые основы создания, цели, задачи и функции группы стандартизации и каталогизации вооружения, военной и специальной



техники// В сборнике: Актуальные проблемы защиты и безопасности. труды XXII Всероссийской научно-практической конференции РАРАН. 2019. С. 370-374.

6. Федотова А.М., Гасюк Д.П. Анализ рисков возникновения проблем с качеством технологической подготовки производства и разработка мероприятий по их снижению в условиях АО "НИИЭФА" // Металлообработка. 2021. № 1 (121). С. 50-54.

7. Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г. Формальная структура задач стандартизации и унификации при управлении развитием сложных технических систем // Защита и безопасность. 2004. № 4 (31). С. 26-31.

8. Тебекин А.В. Методический подход к моделированию процессов формирования планов инновационного развития предприятий / А.В. Тебекин, Т.Н. Сауренко [и др.] // Журнал исследований по управлению. 2019. Т. 5. № 1. С. 65-72.

9. Зегжда П.Д. Модели и метод поддержки принятия решений по обеспечению информационной безопасности информационно-управляющих систем / П.Д. Зегжда [и др.] // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. 2018. № 1. С. 43-47.

10. Анисимов Е.Г., Анисимов В.Г., Солохов И.В. Проблемы научно-методического обеспечения межведомственного информационного взаимодействия // Военная мысль. 2017. № 12. С. 45-51.

11. Гасюк Д.П., Ларькин В.В. К вопросу о современном состоянии и перспективах развития системы освоения ракетного вооружения // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. 2017. № 1 (96). С. 34-40.

12. Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г., Босов Д.Б. Сетевые модели и методы ресурсно-временной оптимизации в управлении инновационными проектами.- Москва, 2006.- 117 с.

13. Гарькушев А.Ю., Курилов А.В., Супрун А.Ф., Гасюк Д.П. Методика оценки показателей качества информационных систем // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. 2019. № 3. С. 56-61.

14. Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г., Черныш А.Я., Мельник Д.А. Модель поддержки принятия решений при формировании программ инновационного развития предприятий электротехнической отрасли машиностроения // Вестник Российского экономического университета имени Г.В. Плеханова. 2021. Т. 18. № 4 (118). С. 140-151.

15. Смирнова Д.А., Рычков Д.А. «Автоматизация выбора режущего инструмента для механической обработки материалов с учетом критериев производства». Братский государственный университет, г. Братск, Россия. 255-260 с.  
Электронный источник: <https://yadi.sk/d/qRqyWqtGjBhb9w>

16. Голод И.А., Мурашко В.С. «Автоматизация выбора режущего инструмента при токарной обработке с продольной подачей». Гомельский государственный технический университет им. П.О. Сухого, Гомель, Беларусь. 32 с.  
Электронный источник: <https://yadi.sk/d/YRAFZFCBzqXaBA>

17. Nicolas de Lima, Rossini Severino, Rodrigo Berretta Käsemödel, Adriano Fagalide Souza. «New algorithm identifies the best set of cutting tools to mill cavities». 51-53с.

Электронный источник:  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827121006545>

18. Баташов М.М. – магистрант гр. 8КТМ-31, Щербаков Н.П. – к.т.н., доцент Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова (г.

Барнаул). «Автоматизация выбора режущего инструмента для обработки профиля зубьев деталей зубчатых передач». Электронный источник: [http://edu.secna.ru/media/f/tm\\_tez\\_2015\\_.pdf](http://edu.secna.ru/media/f/tm_tez_2015_.pdf).

19. С.В. Лукина. Автоматизация процедур формирования и выбора структурных компоновок сборных режущих инструментов на этапе технической подготовки производства. 241-246 с.

Электронный источник: <https://cyberleninka.ru/article/n/avtomatizatsiya-protsedur-formirovaniya-i-vybora-strukturnyh-komponovok-sbornyh-rezhushchih-instrumentov-na-etape-tehnicheskoy/viewer>.

20. Guanghui Zhou<sup>a</sup> Xiongjun Yang<sup>b</sup> Chao Zhang<sup>b</sup> Zhi Li<sup>b</sup> Zhong dong Xiao<sup>c</sup>. <sup>a</sup>State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710054, China; <sup>b</sup>School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; <sup>c</sup>School of Management, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China. «Deep learning enabled cutting tool selection for special-shaped machining features of complex products» 1-11с.

Электронный источник:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0965997819300225>.

21. Daniel Johansson<sup>1</sup>, Rebecka Lindvall<sup>1</sup>, Christina Windmark<sup>1</sup>, Rachid M'Saoubi<sup>2</sup>, Antionette Can<sup>3</sup>, Volodymyr Bushlya<sup>1</sup>, Jan-Eric Ståhl<sup>1</sup>. <sup>1</sup>Lund <sup>1</sup>University, Ole Römers väg 1, SE-221 00 Lund, Sweden; <sup>2</sup>Seco Tools AB, 737 82 Fagersta, Sweden; <sup>3</sup>Element Six Global Innovation Centre, Fermi Avenue, Harwell, Didcot, OX11 0QR, United Kingdom. «Assessment of Metal Cutting Tools using Cost Performance Ratio and Tool Life Analyses». 816-823с.

Электронный источник:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2351978920301153>.

Е.Н. Ратьков, В.В. Ваганов  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Санкт-Петербург, Россия, [radkov.egor.n@gmail.com](mailto:radkov.egor.n@gmail.com)

## УСТРОЙСТВО ЗАМЕНЫ ПЕЧАТНЫХ ФОРМ РЕВОЛЬВЕРНОГО ТИПА ДЛЯ ФЛЕКСОГРАФСКОЙ ПЕЧАТИ

### Аннотация

Данная статья посвящена разработке конструкции револьверного механизма автоматической замены печатных валов флексографских полиграфических машин.

*Ключевые слова:* флексографские печатные машины, печатные валы, автоматическая замена печатных валов, способ замены печатных валов.

### Введение

В настоящее время все производители флексографских полиграфических машин работают над технологиями автоматизации подготовительных процессов печатных машин, с целью уменьшения времени простоя ввиду вышеупомянутых операций. Одной из таких операций является смена формных валов.

Одним из решений замены формных валов в процессе работы машины можно использовать револьверную схему их расположения. Данная схема позволит существенно ускорить процесс замены формного вала, так как выбор необходимого вала с печатной формой будет производиться вращательным движением, с выбором соответствующего сектора барабана. Устройство может устанавливаться как дополнительный модуль к печатной машине, так и являться штатным механизмом.

Конструкция состоит из следующих основных узлов: барабан с направляющими, привод подачи гильз, привод поворота барабана, датчик угла поворота барабана, скользящий валик подающего устройства, поворотные шарниры с направляющими для гильз, кожух барабана, сопрягающая резинотканевая муфта, датчик положения подающего устройства (см. рис. 1).

Работа механизма осуществляется следующим образом: в барабан на направляющие поочередно загружаются гильзы с печатными формами, путем поворота шарнира на 90 градусов относительно оси барабана; затем с направляющей, находящейся напротив оси печатного вала печатной машины, в рабочую зону загружается гильза с печатной формой, путем сдвига с оси толкателем механизма загрузки; при необходимости сменить гильзу толкатель цепляется за паз гильзы под печатной формой, возвращает её на ось барабана, барабан поворачивается выставляя необходимую гильзу на против оси печатной машины, затем цикл повторяется.

Для поворота барабана используется привод, состоящий из шагового мотор-редуктора и червячной передачи с коническим зубчатым колесом. Контроль поворота барабана осуществляется за счет оптического энкодера в обеспечении точности сигнала обратной связи на блок управления.

Устройство подачи/съёма гильз состоит из привода и цепной передачи, на цепи которой зафиксирован толкатель из бакелита, который при прямом ходе толкает гильзу с формой на вал печатной машины, а при обратном вступает в зацепление с гильзой печатной формы и возвращает её на вал барабана.

Таким образом, устройство замены печатных форм барабанного типа позволит существенно сократить время замены печатных форм.

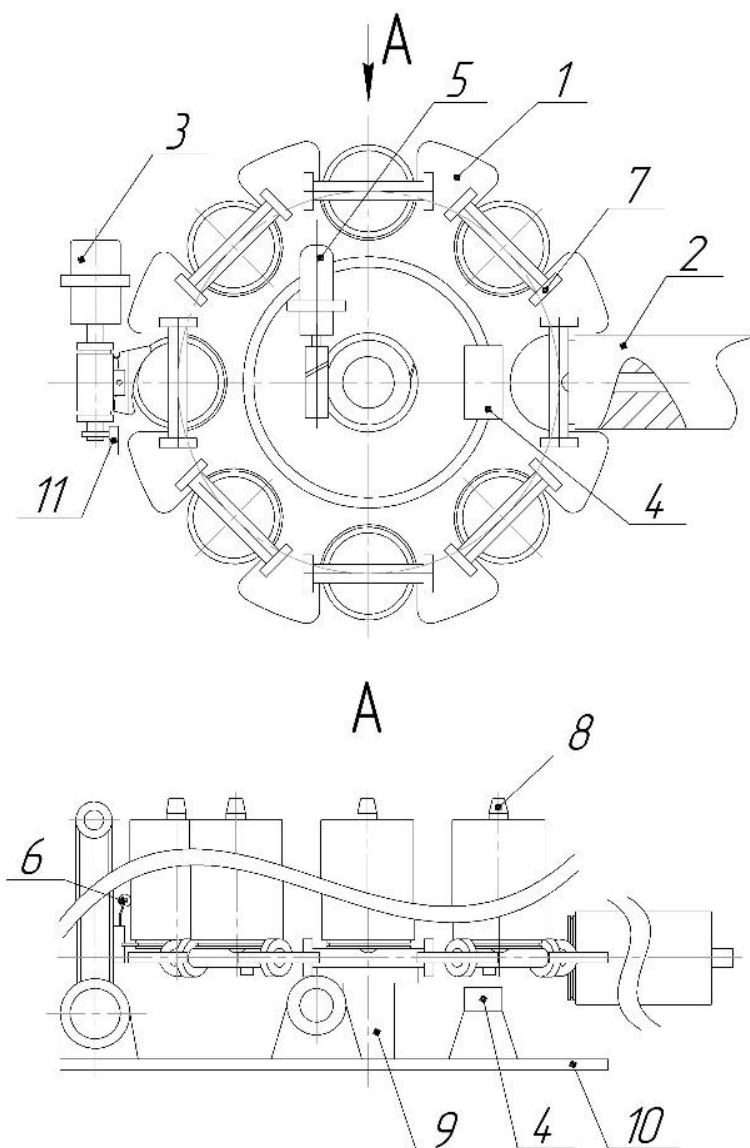


Рисунок 1 – Схема устройства револьверной замены печатных форм для флексографской печати: 1) барабан с направляющими, 2) гильза с печатной формой, 3) привод подачи гильз, 4) датчик угла поворота барабана, 5) привод поворота барабана, 6) скользящий валик подающего устройства, 7) поворотные шарниры с направляющими для гильз, 8) сопрягающая резиноканевая муфта, 9) ось барабана 10) кожух барабана, 11) датчик положения подающего устройства

### Методы

Для достижения поставленной цели использовали современные САПР программы. КОМПАС-3D — это российская система проектирования, автоматизированного проектирования, универсальная система автоматизированного проектирования, позволяющая в оперативном режиме выпускать чертежи изделий, схемы, спецификации, таблицы, инструкции, расчётно-пояснительные записки, технические условия, текстовые и прочие документы. Изначально система

ориентирована на оформления документации в соответствии с ЕСКД, ЕСТД, СПДС и международными стандартами, но этим возможности системы не ограничиваются.

### **Результаты и обсуждение**

Применение предложенного устройства для замены гильз печатных форм позволит существенно ускорить процесс замены печатных форм, сократить время технологических остановок печатной машины. Кроме того, менять печатные формы неиспользуемые в процессе печати можно менять прямо в процессе работы машины, за счет чего можно вовсе исключить остановку машины для смены печатных форм, заменив полную остановку замедлением скорости работы машины допуская кратковременный холостой прогон пленки. Предложенное устройство можно использовать, как отдельный модуль, так и штатный интегрированный.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Ваганов, В. В. Исследование критериев для выбора оптимального направления автоматизации полиграфических предприятий / В. В. Ваганов, Е. Н. Ратьков // Полиграфия: технология, оборудование, материалы : Материалы XII Международной научно-практической конференции, Омск, 17-18 мая 2021 года. - Омск: Омский государственный технический университет, 2021. - С. 23 -26.

2. Кузнецов Ю. В. Основы технологии Иллюстрационной печати. - СПб.: НП «Русская культура», 2016- 44с., ил.

3. Ваганов В. В. Оптика бумаги и оттиска /В. В. Ваганов, Е. Л. Виноградов, В. А. Тропец. - СПб.: Изд-во Политехи, ун-та, 2015. - 146с.

4. Феч, Н. С. Исследование проблем измерения значения тона для триадных и смесевых цветов печатных красок / Н. С. Феч, И. А. Ильина, В. В. Ваганов // Полиграфия: технология, оборудование, материалы : Материалы XI научно-практической конференции с международным участием, Омск, 14-15 мая 2020 года / Редколлегия: С.Н. Литунов [и др.]. - Омск: Омский государственный технический университет, 2020. - С. 136 -142.

5. Маркович, И. Е. Разработка методики и реализующего ее программного продукта для исследования качества оттисков методом цифрового сканирования / И. Е. Маркевич, В. В. Ваганов // Полиграфия: технология, оборудование, материалы : Материалы XI научно-практической конференции с международным участием, Омск, 14 -15 мая 2020 года / Редколлегия: С.Н. Литунов [и др.]. - Омск: Омский государственный технический университет, 2020. - С. 99 -105.

Л.В. Шипулин, Я.А. Яшкузина, А.А. Фролов  
Южно-Уральский государственный университет (национальный  
исследовательский университет), Челябинск, Россия, [frolovaa@susu.ru](mailto:frolovaa@susu.ru)

## **АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ ПОДГОТОВКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС В САПР «ADEM»**

### **Аннотация**

В статье представлена автоматизированная разработка технологической документации при помощи средств САПР ADEM. Представлена методика формирования технологических карт в модуле САПР ADEM. Описано создание технологических операций, операционных эскизов, технологических переходов, а также оснащение установочных и контрольных переходов.

*Ключевые слова:* САПР ТП, технологическая документация, зубчатые колеса, ADEM.

### **Введение**

Технологическое обеспечение – один из важных этапов формирования машиностроительного производства. С развитием технологий изменилась технологическая подготовка производства. Современное оборудование позволяет производить обработку с высокой точностью, снижая влияние человеческого фактора. САПР ТП открывают перспективы для уменьшения объема рутинной работы инженеров-технологов и обеспечивают возможность разработки рациональных и оптимальных технологических процессов для конкретных производств [1 - 14].

### **Формирование технологической документации для изготовления зубчатых колес с использованием САПР модуля ADEM**

Для ранее разработанной конструкторской документации зубчатых колес [15] необходимо заполнить технологическую документацию согласно требованиям ЕСТД в САПР ADEM. Работа по заполнению карт начинается с создания или открытия ранее созданного конструкторского чертежа детали в САД-модуле системы ADEM. Разработка операционных карт технологического процесса происходит в модуле «ADEM CAM/САПР». Из списка выбора «Технологический процесс» на строке режимов и настроек необходимо выбрать опцию «Механообработка» (рис. 1) [16].

Далее система создает диалоговое окно «Общие данные». На вкладке «Общие» поля «Комплект документов», «Обозначение детали/изделия/ТП», «Наименование детали/изделия» заполняются автоматически в соответствии с чертежом детали. В разделе «Формируемые документы» требуется заполнить порядковые номера документов, необходимых для формирования (рис. 2 (а)).

Во вкладке «Сортамент/материал/ТУ» система автоматически заполняет поля «Сортамент заготовки» и «Профиль» в соответствии с чертежом детали. Требуется задать длину профиля исходной заготовки, принимаем 68 мм. Определив характеристики заготовки, программа автоматически рассчитывает массу, «Норма расхода» и «КИМ» (рис. 2 (б)).

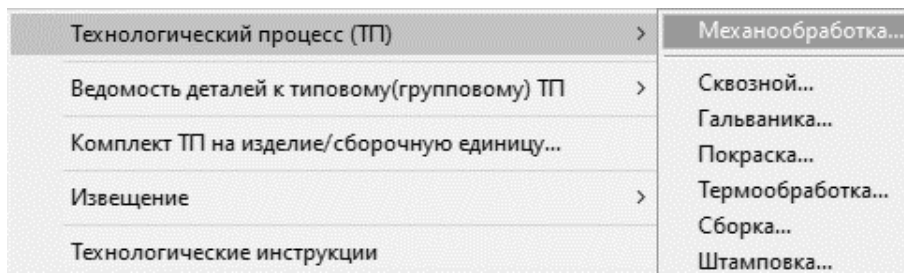
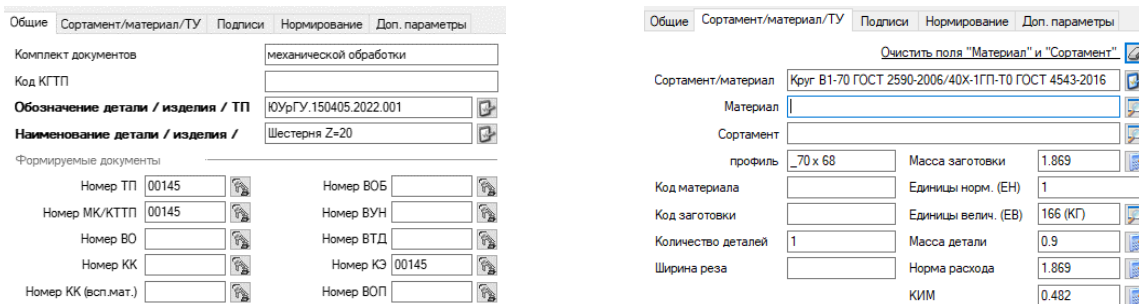


Рисунок 1 – Создание технологического процесса



а)

б)

Рисунок 2 – Диалоговое окно «Общие данные»: а) вкладка «Общие»; б) вкладка «Сортамент/материал/ТУ»

*Создание технологических операций.* Операции образуют маршрут технологического процесса. В строке режимов и настроек выбираем «Создать», затем выберем группу операций из меню (рис. 3).

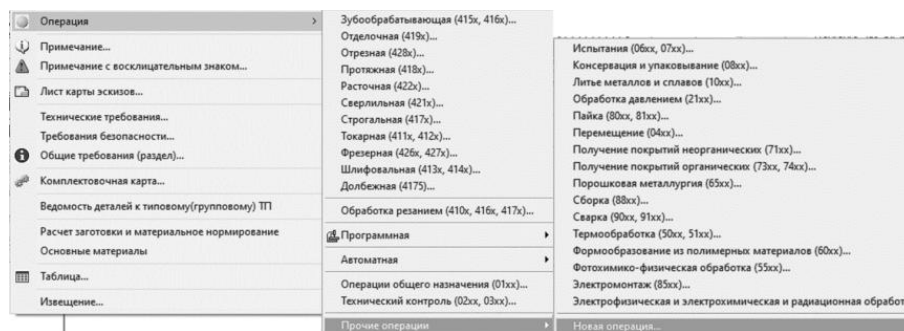


Рисунок 3 – Меню выбора операций

Далее система создает диалоговое окно «Операция». На вкладке «Общие» (рис. 4 (а)) необходимо заполнить следующие поля:

- «Номер операции» указывается порядковый номер операции;
- «Подразделение» указывается цех, или участок или рабочее место;
- «Операция» необходимо нажать «Выбрать операцию из БД» и далее автоматически присваивается код операции и обозначение ИОТ;
- «Оборудование» принимается через команду «Выбрать оборудование для выбранной операции из БД» или заполняется вручную;
- «Номер ОК» и «Номер КЭ» заполняются автоматически.

На вкладке «Нормирование» (рис. 4 (б)) необходимо заполнить поля:

- «Код профессии» и «Разряд профессии» выбирается через команду «Выбрать код, разряд профессии из БД» или вводится самостоятельно;
- «Степень механизации» указывается код рабочего по ОКПДТР;

- «Количество рабочих» заполняется в соответствии с количеством рабочих, занятых при выполнении операции;
- «Единицы нормирования» указывается количество производственных объектов или число работающих, на которое установлена норма расхода;
- «Коэффициент штучного времени» определяет затраты штучного времени при многостаночном обслуживании;
- «Код условий труда» указывается по ОКПДТР;
- «Количество одновременно изготавливаемых деталей» указывается количество изготавливаемых деталей при выполнении одной операции;
- «Объем производственной партии» указывается объем партии в штуках;
- «Норма подготовительно-заключительного времени на организационную подготовку» выбирается из базы данных через команду или вводится самостоятельно;
- «Норма подготовительно-заключительного времени на наладку» выбирается из базы данных через команду или вводится самостоятельно;
- «Подготовительно-заключительное время» рассчитывается автоматически;
- «Вспомогательное время» рассчитывается автоматически произведением переходов на операции и коэффициента серийности;
- «Основное время» указывается время, затрачиваемое рабочим на обработку заготовки;
- «Штучное время» и «Штучно-кальк.» рассчитывается автоматически.

*Создание операционных эскизов.* Для созданной операции в окне проекта создается карта эскиза. Далее система открывает модуль ADEMCAD, где в панели инструментов выбирается инструмент «Режим» и далее «Формат листа». Далее копируется предварительно созданный операционный эскиз в поле карты эскиза.

*Создание технологических переходов.* Создание технологических переходов образуют маршрут выполнения операции в следующей последовательности: установочный, основной и контрольный. Чтобы создать установочный переход выбирается команда «Установочные переходы» (рис. 5). Таким же образом создаются основной и контрольный переходы.

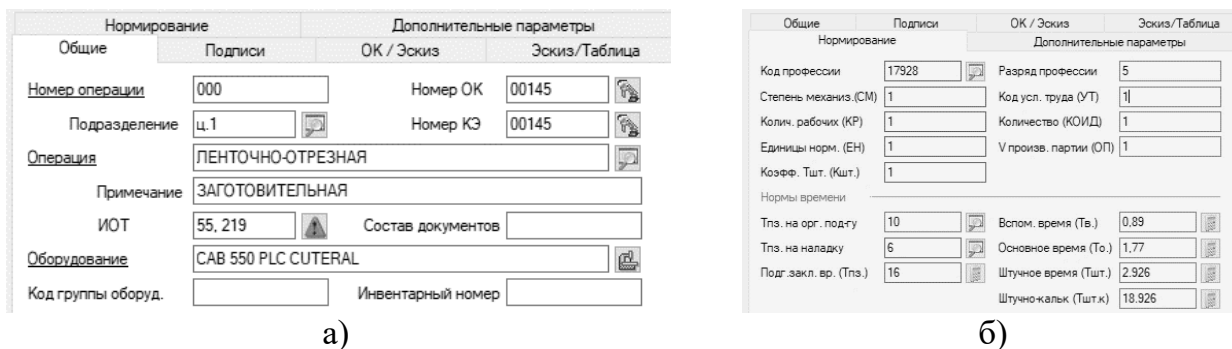


Рисунок 4 – Диалоговое окно «Операция»: а) вкладка «Общие»; б) вкладка «Нормирование»

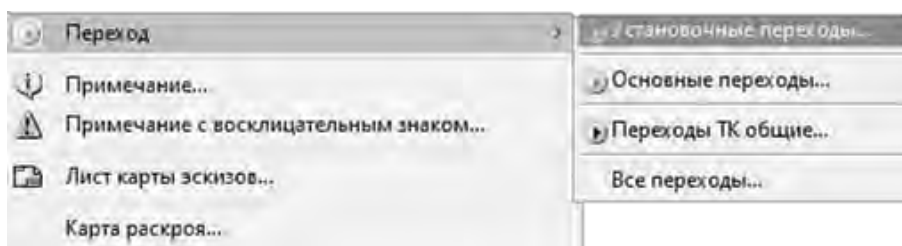


Рисунок 5 – Контекстное меню выбора переходов



Создание установочного перехода сопровождается открытием диалогового окна «Установочный переход». На вкладке «Переход» в поле «Содержание перехода» дается комментарий действия рабочего. Вкладка «Нормы времени» содержит поле для указания вспомогательного времени.

После создания основного перехода открывается диалоговое окно «Основные переходы». На вкладке «Переход» в поле «Содержание перехода» дается комментарий действия рабочего (рис. 6 (а)) с заполнением вкладки «Режимы резания» (рис. 6 (б)).

Создание и заполнение контрольного перехода происходит аналогично вышеописанным переходам.

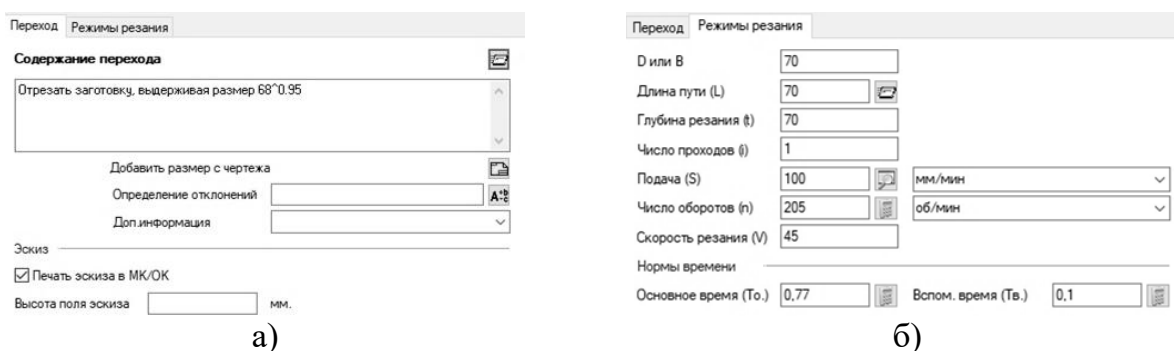


Рисунок 6 – Диалоговое окно «Основные переходы»: а) вкладка «Переход»; б) вкладка «Режимы резания»

*Оснащение установочных и контрольных переходов.* Установочные и контрольные переходы оснащаются необходимой оснасткой: приспособления, режущий и измерительный инструменты. В дереве проекта выбирается необходимый переход и из списка выбора «Оснащение» на строке режимов и настроек выбирается нужная оснастка (рис. 7).

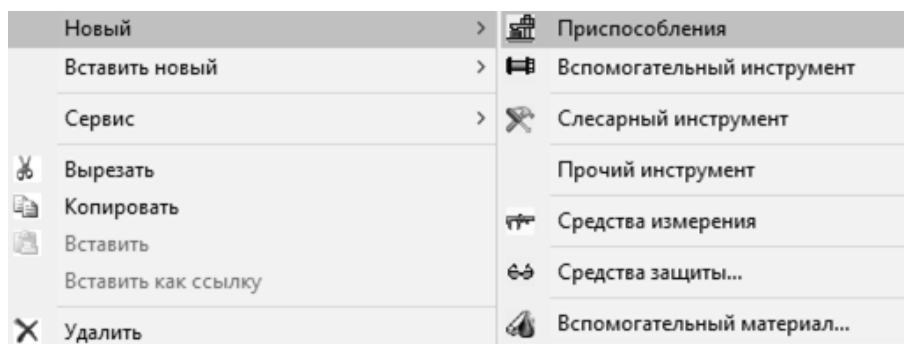


Рисунок 7 – Контекстное меню выбора оснащения

Порядок разработки технологического процесса отслеживается в дереве проекта. Конечный вид дерева проекта со всеми операциями и переходами представлен на рисунке 8.

## Заключение

Приведенная методика работы в САПР ADEM позволяет осуществлять технологическую подготовку производства в автоматизированном режиме. Использование САПР ТП позволяет сократить время инженера на соблюдение

требований ЕСТД и сконцентрироваться на заполнении основной информации, что снижает риск совершения ошибок при создании технологических карт [17].

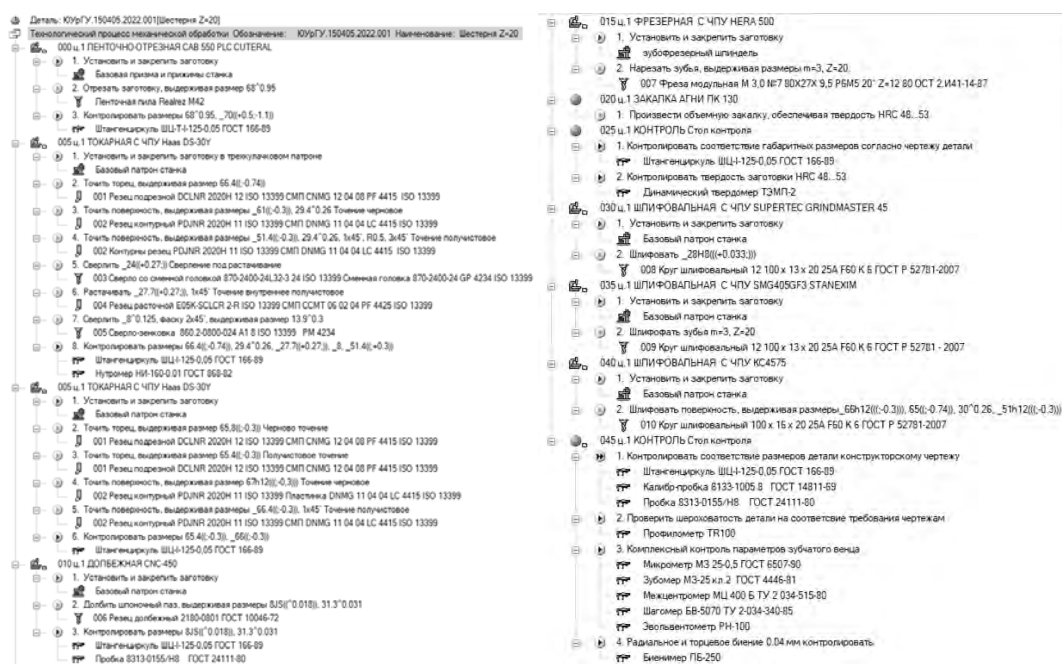


Рисунок 8 – Конечный вид технологического процесса в дереве проекта

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сауренко Т.Н., Чварков С.В. Экономическая политика в системе национальной безопасности Российской Федерации // Вестник академии военных наук. 2017. № 1 (58). С. 137-144.
2. Косова В.А., Гасюк Д.П. К вопросу анализа условий разработки технологических процессов машиностроительных предприятий // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2021. № 2. С. 655-658.
3. Тебекин А.В. Способ формирования комплексных показателей качества инновационных проектов и программ / А.В. Тебекин, Т.Н. Сауренко [и др.] // Журнал исследований по управлению. 2018. Т. 4. № 11. С. 30-38.
4. Гасюк Д.П. Нормативно-правовые основы создания, цели, задачи и функции группы стандартизации и каталогизации вооружения, военной и специальной техники // В сборнике: Актуальные проблемы защиты и безопасности. труды XXII Всероссийской научно-практической конференции РАРАН. 2019. С. 370-374.
5. Гапов М.Р., Сауренко Т.Н. Модель поддержки принятия решений при формировании товарной стратегии производственной программы предприятия // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экономика. 2016. № 2. С. 62-73.
6. Тебекин А.В. Методический подход к моделированию процессов формирования планов инновационного развития предприятий / А.В. Тебекин, Т.Н. Сауренко [и др.] // Журнал исследований по управлению. 2019. Т. 5. № 1. С. 65-72.
7. Глухов В.В., Гасюк Д.П. Управление качеством.- Санкт-Петербург, 2013. 399 с.
8. Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г., Черныш А.Я. Эффективность инвестиций. Методологические и методические основы.- Москва: Военная Ордена Ленина,

Краснознамённая, Ордена Суворова Академия Генерального штаба Вооруженных сил Российской Федерации, 2006.- 123 с.

9. Гасюк Д.П., Ларькин В.В. К вопросу о современном состоянии и перспективах развития системы освоения ракетного вооружения // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. 2017. № 1 (96). С. 34-40.

10. Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г. Формальная структура задач стандартизации и унификации при управлении развитием сложных технических систем // Защита и безопасность. 2004. № 4 (31). С. 26-31.

11. Федотова А.М., Гасюк Д.П. Анализ рисков возникновения проблем с качеством технологической подготовки производства и разработка мероприятий по их снижению в условиях АО "НИИЭФА" // Металлообработка. 2021. № 1 (121). С. 50-54.

12. Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г., Босов Д.Б. Сетевые модели и методы ресурсно-временной оптимизации в управлении инновационными проектами.- Москва, 2006.- 117 с.

13. Kireev K.V., Ermakov V.V., Kikkas K., Shcheglova A.E., Gasyuk D.P., Rodionova U. Mathematical modeling of arc extinction process in devices with liquid-metal contact // В сборнике: Reliability, Infocom Technologies and Optimization (Trends and Future Directions). 6th International Conference ICRITO. 2017. С. 271-275.

14. Гасюк Д.П., Филатов И.Н. Основные принципы унификации образцов вооружения и военной техники // Труды международного симпозиума "Надежность и качество". 2008. Т. 2. С. 317-318.

15. Шипулин, Л. В. Разработка конструкторской документации зубчатых колес, входящих в изделие «устройство для закрепления и вращения заготовки левое» / Л.В. Шипулин, Я.А. Яшкузина, А.А. Фролов // Прогрессивные технологии в машиностроении: Тематический сборник научных трудов / Министерство науки и высшего образования Российской Федерации Южно-Уральский государственный университет. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2021. – С. 39-45.

16. Чемпинский, Л. А. Компьютерное моделирование в CAD/CAM ADEM: учебное пособие для студентов вузов, обучающихся по направлениям специальностям в области техники и технологии / Л.А. Чемпинский; Л.А. Чемпинский ; Федеральное агентство по образованию, Гос. образовательное учреждение высш. проф. образования "Самарский гос. аэрокосмический ун-т им. С. П. Королева". – Самара: Изд-во СГАУ, 2010. – 222 с. – ISBN 978-5-7883-0744-2.

17. Сазонова, Н. С. Задачи совершенствования систем автоматизированного нормирования технологических процессов на базе модернизации информационного и алгоритмического обеспечения / Н. С. Сазонова // СТИН. – 2019. – № 11. – С. 22-25.

Л.В. Шипулин, А.А. Фролов  
Южно-Уральский государственный университет (национальный  
исследовательский университет), Челябинск, Россия, [frolova@susu.ru](mailto:frolova@susu.ru)

## **РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО МОДУЛЯ ИМИТАЦИИ РЕЗАНИЯ ЕДИНИЧНЫМ ЗЕРНОМ**

### **Аннотация**

В работе изложено решение задачи по разработке программного модуля имитации резания единичным зерном на языке программирования С#. Программный модуль учитывает совокупность параметров единичного зерна, режимов резания и размеров заготовки. Результатом работы программы является микрорельеф и его графическое изображение. Подведены итоги и сделаны выводы о сходимости результатов расчетов в программном модуле с результатами эксперимента по микрорезанию единичным зерном.

*Ключевые слова:* единичное абразивное зерно, программный модуль, микрорезание, моделирование.

### **Введение**

Шлифование, как операция, является финишной обработкой в технологическом процессе изготовления деталей, применяемой для достижения требуемого качества поверхности. Шлифование, как процесс, представляет собой множественное микрорезание зернами абразивного круга с разной зернистостью и плотностью распределения их в круге. Машиностроение стремительно прогрессирует в различных направлениях и необходимо постоянно поддерживать уровень развития, решая актуальные задачи производства средствами предлагаемых современных методик [1, 2, 3]. Так, актуальным направлением развития является прогнозирование параметров шероховатости при шлифовании. Это направление носит прикладной характер, так как шлифование включает в себя сложные процессы формообразования: деформацию и резание, которые невозможно отследить и зафиксировать из-за постоянно меняющихся параметров формируемой поверхности в процессе множественного резания зернами абразивного круга и износа самого инструмента.

### **Постановка задачи разработки программного модуля**

Программный модуль должен выполнять основную функцию – моделировать риски от единичного абразивного зерна на поверхности заготовки. Для достижения цели, необходимо решить ряд задач:

- создать файл, включающий в себя варьируемые исходные данных для программирования обработки;
- создать модуль считывания исходных данных и преобразования их в условия для расчета;
- создать модуль взаимодействия заготовки и единичного зерна;
- получить результаты взаимодействия в виде изображения и рельефа.

## Разработка алгоритма программного модуля и его реализация на языке программирования С#

Для структурирования процесса действий программного модуля разработан алгоритм работы программы. Реализация алгоритма (рис. 1) производится на языке программирования С#. Ниже представлено пояснение работы каждого блока и методика их реализации.

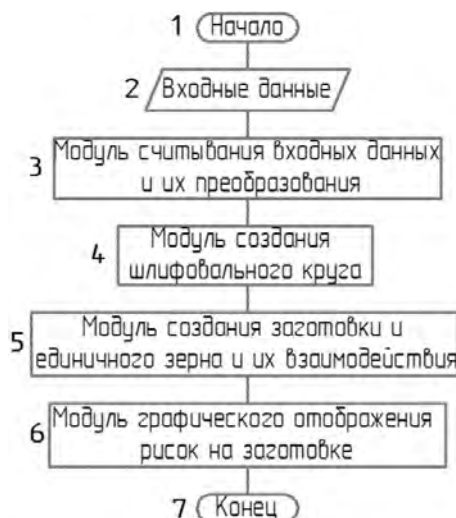


Рисунок 1 – Алгоритм программного модуля

*Блок 1 – Начало.* Под началом подразумевается подвязка необходимых библиотек и пространств имён в программном коде. Библиотеки обеспечивают работоспособность программного кода, определяют его целостность и связи с другим программным обеспечением (в нашем случае MS Excel).

*Блок 2 – Входные данные.* В качестве входных данных указывается вся необходимая для расчёта информация. Данные представлены в виде файла MS Excel, содержащего параметры шлифовального круга, характеристики заготовки и режимы резания (рис. 2).

Файл создается отдельно от программы и в процессе компиляции кода, начальные данные будут автоматически подгружаться из файла, что дает возможность менять начальные условия, не прибегая к редактированию исходного кода программы.

*Блок 3 – Модуль считывания входных данных и их преобразования.* После создания файла входных данных создается модуль, который считывает данные из файла. Предварительно необходимо скопировать файл в директиву созданным исполнителем файлом. Модуль реализован в виде матрицы, состоящей из 1 строки и 13 столбцов, с подвязкой к каждому столбцу файла входных данных соответственно.

*Блок 4 – Модуль создания шлифовального круга.* После получения геометрических характеристик шлифовального круга, необходимо создать его имитационную модель. Производится это путем построения цилиндра с присвоением имени к соответствующим величинам. Предполагается, что формирование риски происходит путем «протягивания» развертки цилиндра (имитация шлифовального круга) над заготовкой на заданной высоте, которая регулируется подачей на ход.

*Блок 5 – Модуль создания заготовки и единичного зерна и их взаимодействия.* В данном блоке создаются недостающие элементы, а именно заготовка и единичное

зерно. Путем создания имитационных моделей этих объектов технологической системы обеспечивается возможность программной реализации взаимодействия этих элементов. Путем математического описания процесса формообразования реализовано взаимодействие единичного зерна и заготовки. Результатом взаимодействия стало получение имитационной модели риски от единичного зерна.

Параметры шлифовального круга					
Диаметр	Высота	Материал	Зернистость	Твердость	Структура
268	10	A25	0,25	L	6
Режимы резания					
Припуск	Скорость круга	Скорость стола	Подача на ход		
0,01	35	10	0,01		
Характеристика заготовки					
Длина		Ширина		Материал	
6		3		40X	

Рисунок 2 – Содержание файла входных данных

*Блок 6 – Модуль графического отображения риски на заготовке.* Результатом компиляции программы является растровое изображение с использованием цветового пространства. Не маловажным этапом вывода результата является цветовая палитра, так как полученный результат в виде риски необходимо представить в виде читаемого изображения. Это реализовано в виде RGB (R – Red, G – Green, B – Blue) аддитивной цветовой модели, описывающей способ кодирования цвета с использованием только трех варьируемых каналов цветов, накладываемых на черный фон.

*Блок 7 – Расчеты.* Завершение работы над программным кодом с успешным выводом результатов.

### Анализ результатов компиляция программного модуля

Результатом компиляции программного модуля является изображение смоделированной риски. Исходными данными служили режимы резания, которые применялись в эксперименте по микрорезанию [4], поэтому целесообразно сравнить экспериментальное изображение риски и скомпилированное (рис. 3). В таблице 1 представлена сравнительная характеристика рисков с описанием параметров.

Основываясь на данных таблицы 1, скомпилированная риска отличается от экспериментальной по длине на 1,64%, по ширине на 3,85%. Погрешность вызвана тем, что в процессе формообразования абразивное зерно изнашивается по мере резания заготовки, что не учитывается программным кодом. Также не учтено влияние шероховатости заготовки на формообразование риски, так как невозможно смоделировать реальную шероховатость с поверхности экспериментальной заготовки.

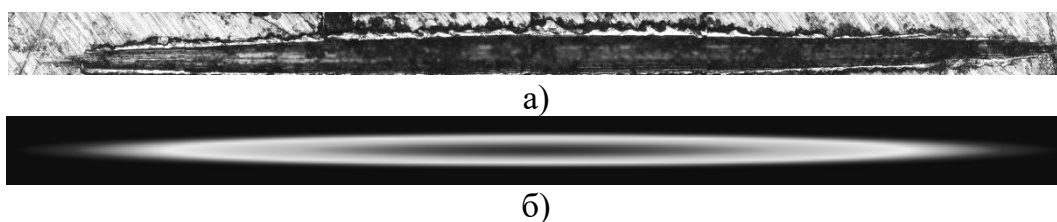


Рисунок 3 – Сравнительное изображение рисков: а) экспериментально полученная риска; б) скомпилированная риска

Таблица 1 – Сравнительная таблица полученных рисков

	Режимы обработки		Измеренные характеристики	
	Скорость круга V, м/мин	Глубина резания t, мм	Длина риски, мм	Ширина риски, мм
Экспериментальная риска	35	0,01	3,05	0,26
Скомпилированная риска	35	0,01	3	0,25

### **Заключение**

Разработанный программный модуль позволяет имитировать процесс формообразования рисков от единичного абразивного зерна. Сравнение полученного изображения с фотографией экспериментальной риски показало, что погрешность моделирования не превышает 4%. Созданный модуль является заделом к развитию тематики прогнозирования шероховатости.

### **Благодарность**

Разработка программного модуля производилась при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (грант № FENU-2020-0022).

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Дьяконов, А.А. Комплексное моделирование процесса плоского шлифования периферией круга / А.А. Дьяконов, Л.В. Шипулин // Научные технологии в машиностроении. – 2013. – №6 (24). – С. 14–18;
2. Darafon, A. 3D metal removal simulation to determine uncut chip thickness, contact length, and surface finish in grinding Abdalslam Darafon & Andrew Warkentin & Robert Bauer / A. Darafon, A. Warkentin, R. Bauer // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2013. – V. 66, Issue 9. – P. 1715–1724;
3. Salisbury, E. A three-dimensional model for the surface texture in surface grinding, part 1: surface generation model / E.J. Salisbury, K.V. Domala, K.S. Moon, M.H. Miller, J.W. Sutherland // Journal of Manufacturing Science and Engineering (Impact Factor: 1.02). – 2001. – 123(4). – P. 576–581;
4. Шипулин, Л.В. Исследование микрорельефа следа, полученного при резании единичным абразивным зерном / Л.В. Шипулин, А.А. Фролов // Прогрессивные технологии в машиностроении: Тематический сборник научных трудов / Министерство науки и высшего образования Российской Федерации Южно-Уральский государственный университет. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2021. – С. 25-32.

Т.Р. Абляз, Е.С. Шлыков, В.В. Ширяев, К.Р. Муратов, В.В. Осинников  
Пермский национальный исследовательский политехнический университет,  
Пермь, Россия, [lowrider11-13-11@mail.ru](mailto:lowrider11-13-11@mail.ru).

## **ПРОТОТИП РОБОТИЗИРОВАННОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ РОССИЙСКИХ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ**

### **Аннотация**

В работе представлен прототип роботизированного комплекса для электроэрозионной обработки российских полимерных композитных материалов нового поколения. Комплекс позволит повысить точность изготовления перспективных деталей, снизить экономические затраты на их производство и повысить конкурентоспособность продукции Российских машиностроительных предприятий на мировом рынке. С применением роботизированного комплекса проведена электроэрозионная обработка отверстий в изделии из полимерного композитного материала.

*Ключевые слова:* технология электроэрозионной обработки, композитный материал, роботизированный комплекс, перфорация отверстий

### **Введение**

Повышение технологических возможностей производства и создание новых изделий, превосходящих по своим характеристикам существующие аналоги, является актуальной задачей современного машиностроения [1 - 10]. В настоящее время при создании перспективных изделий авиационного и специального машиностроения широкое применение находят полимерные композиционные материалы [11].

В работах [11, 12] отмечено, что применение технологии электроэрозионной обработки (ЭЭО) позволяет обрабатывать сложнопрофильные изделия, выполненные из полимерных композитных материалов (ПКМ). Однако не в полной мере решена задача автоматизации процесс обработки ПКМ с применением технологии ЭЭО. Криволинейный профиль изделия, выполненного из труднообрабатываемого ПКМ с применением технологии ЭЭО требует создания комплексного оборудования, обеспечивающего сочетание многокоординатного перемещения электрода-инструмента по заданной траектории. Одним из перспективных направлений развития технологии ЭЭО является применение роботизированных комплексов в качестве органов перемещения электрода-инструмента.

На основе проведенного анализа [13- 16] установлено, что современные промышленные роботы находят широкое применение при выполнении сварочных, вспомогательных операций, а также и в механической обработке. Промышленные роботы активно используются для операций раскроя металла с помощью плазмы, лазера и гидроабразивной резки. Внедрение роботов в технологический процесс обработки изделий стало возможным прежде всего благодаря увеличению жесткости и точности современных манипуляторов. Таким образом применение роботизированного комплекса в сочетании с технологией электроэрозионной обработки позволит обрабатывать элементы фасонных поверхностей без применения



сложнопрофильных электродов-инструментов и дорогостоящей оснастки, путем применения много осевого орбитального перемещения рабочих органов системы.

Отмечается [11, 12], что так как технология ЭЭО не является контактным методом обработки, компоновка станков не требует наличия мощных приводов главного и вспомогательного движения. Основным рабочим органом электроэрозионных станков является генератор импульса, который располагается вне зоны обработки. Таким образом, становится возможным размещение и перемещение электрода-инструмента по поверхности обрабатываемой заготовки без обеспечения жесткой кинематической связи с генератором импульса.

В настоящее время проектированием гибких электрофизических модулей занимаются ведущие производители электроэрозионного оборудования Sodic (Япония), Mitsubishi Electric (Япония), а также ведущие исследовательские университеты нашей страны МГТУ им. Н.Э. Баумана, Тульский государственный университет, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого и др. Однако, не в полной мере решены конструкторские и технологические задачи по проектированию и изготовлению данного оборудования. Отсутствуют научно-обоснованные подходы к разработке систем перемещения электрод-инструмента по обрабатываемой поверхности, и кинематика не располагает необходимым комплексом эффективных управляющих воздействий на процесс обработки. В связи с этим, исследование и разработка технологии и оборудования для эффективной, управляемой электроэрозионной обработки российских композитных материалов нового поколения является актуальной научно-технической задачей.

Разработка технологии и оборудования для электроэрозионной обработки российских функциональных металлических и полимерных композитных материалов нового поколения позволит повысить точность изготовления перспективных деталей, снизить экономические затраты на их производство и повысить конкурентоспособность продукции Российских машиностроительных предприятий на мировом рынке.

## **Методы**

На базе кафедры ИТМ ФГАОУ ВО ПНИПУ спроектирован прототип комплекса для проведения электроэрозионной обработки полимерных композитных материалов.

В качестве прототипа роботизированного комплекса выбран комплект оборудования, основанный на шести координатном роботизированном комплексе и гибком электроэрозионном модуле. Схема работы модуля представлена на рисунке 1.

Проект робота манипулятора с установленной системой подачи электрода-инструмента представлен на рисунке 2.

В основании 1 робот, в составе роботизированного комплекса, способен совершать вращательные движения, угол которых составляет 340 градусов. К основанию крепиться первое плечо 2, которое может совершать относительно основания вращательные движения в 130 градусов. Второе плечо 3 вращается на 220 градусов. Третье плечо 4 относительно центра второго плеча имеет вращение в 360 градусов. Электроэрозионный патрон 5 также может вращаться относительно центра предыдущего плеча на 360 градусов. С помощью данного комплекса проведены эксперименты по ЭЭО перфорированных отверстий в ПКМ.

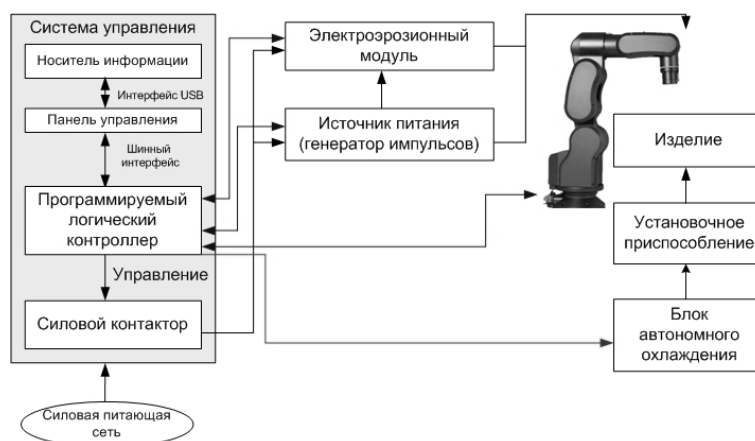
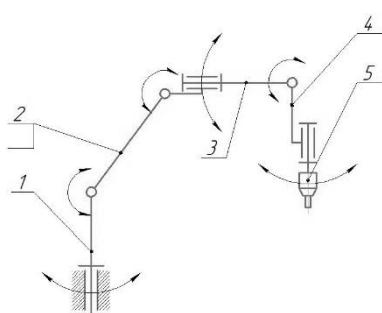


Рисунок 1 – Схема работы прототипа роботизированного комплекса



а)



б)

Рисунок 2 – Проект комплекса автоматизированного оборудования: а) кинематическая схема, где 1 - Основание; 2 - Первое плечо; 3 - Второе плечо; 4 - Третье плечо; 5 - Электроэрозионный патрон. б) прототип роботизированного комплекса

При использовании роботизированного комплекса формообразование отверстий осуществляется в результате комплексного сочетания движения всех звеньев робота и вращательного движения шпинделя с электродом-инструментом.

ЭЭО производилась двумя электродами-инструментами: цилиндрическим с диаметром 2 мм, и прямоугольным с размерами 10 на 2 мм. Режимы обработки, а также методика проведения эксперимента основана на работе [12].

### Результаты и обсуждение

На рисунке 3 показаны сквозные отверстия после перфорации цилиндрическим электродом-инструментом (а) и глухие пазы после перфорации прямоугольным электродом-инструментом (б).

Применение роботизированного комплекса позволило обеспечить заданную точность обработки отверстий в изделии из полимерного композитного материала.

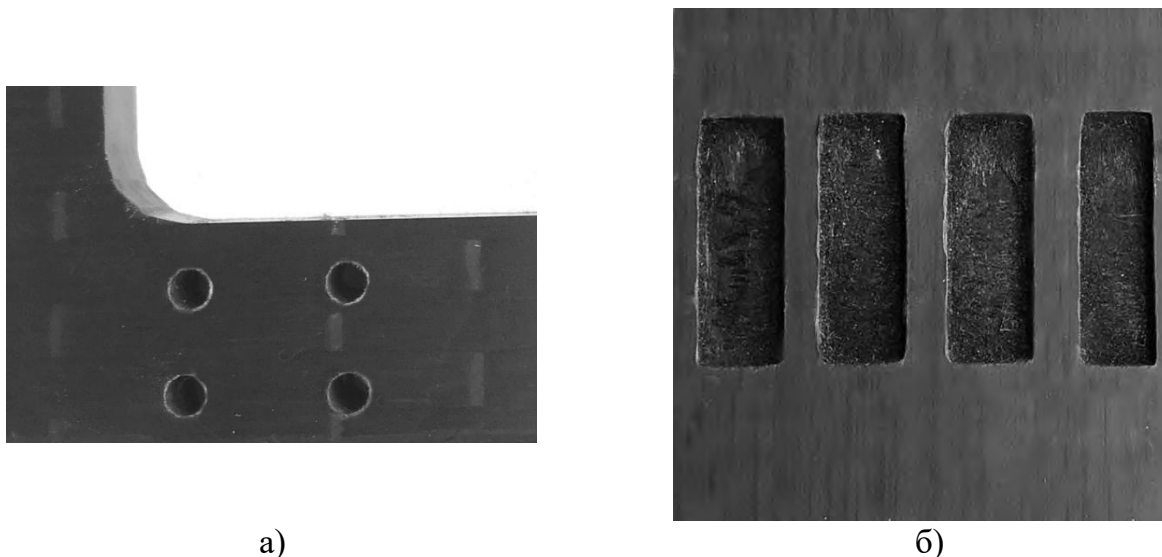


Рисунок 3 – Сквозные отверстия после перфорации а) цилиндрическим электродом-инструментом; б) глухие пазы после перфорации прямоугольным электродом-инструментом

### Заключение

В рамках проведенного исследования спроектирован прототип комплекса автоматизированного оборудования для электроэрозионной обработки российских полимерных композитных материалов нового поколения, который позволит повысить точность изготовления перспективных деталей, снизить экономические затраты на их производство и повысить конкурентоспособность продукции Российских машиностроительных предприятий на мировом рынке. Экспериментально показана эффективность применения данного комплекса для перфорации отверстий в изделиях из ПКМ.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анисимов Е.Г., Анисимов В.Г., Сауренко Т.Н., Чварков С.В. Экономическая политика в системе национальной безопасности Российской Федерации // Вестник академии военных наук. 2017. № 1 (58). С. 137-144.
2. Гарькушев А.Ю., Селиванов А.А., Чварков С.В. Сущность и проблемы управления обеспечением безопасности и обороной государства // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. 2016. № 3 (93). С. 3-10.
3. Гасюк Д.П., Хрулев В.Л. Законы и принципы развития и функционирования системы обеспечения ракетных войск и артиллерии ракетами и боеприпасами в современных условиях // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. 2015. № 2 (87). С. 20-22.
4. Косова В.А., Гасюк Д.П. К вопросу анализа условий разработки технологических процессов машиностроительных предприятий // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2021. № 2. С. 655-658.
5. Тебекин А.В. Методический подход к моделированию процессов формирования планов инновационного развития предприятий / А.В. Тебекин, Т.Н. Сауренко [и др.] // Журнал исследований по управлению. 2019. Т. 5. № 1. С. 65-72.
6. Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г. Формальная структура задач стандартизации и унификации при управлении развитием сложных технических систем // Защита и безопасность. 2004. № 4 (31). С. 26-31.

7. Федотова А.М., Гасюк Д.П. Анализ рисков возникновения проблем с качеством технологической подготовки производства и разработка мероприятий по их снижению в условиях АО "НИИЭФА" // *Металлообработка*. 2021. № 1 (121). С. 50-54.
8. Гасюк Д.П., Филатов И.Н. Основные принципы унификации образцов вооружения и военной техники // *Труды международного симпозиума "Надежность и качество"*. 2008. Т. 2. С. 317-318.
9. Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г., Черныш А.Я. Эффективность инвестиций. Методологические и методические основы.- Москва: Военная Ордена Ленина, Краснознамённая, Ордена Суворова Академия Генерального штаба Вооруженных сил Российской Федерации, 2006.- 123 с.
10. Тебекин А.В. Способ формирования комплексных показателей качества инновационных проектов и программ / А.В. Тебекин, Т.Н. Сауренко [и др.] // *Журнал исследований по управлению*. 2018. Т. 4. № 11. С. 30-38.
11. Ablyaz, T.R., Muratov, K.R., Shlykov, E.S., et al., Electric-discharge machining of polymer composites, *Russ. Eng. Res.*, 2019, vol. 39, no. 10, pp. 898-900.
12. Патент РФ № 2730321С1, 05.08.2019. Способ электроэрозионной прошивки отверстий // Патент России № 2730321С1. 2019. / Абляз Т.Р., Шлыков Е.С., Муратов К.Р. [и др.].
13. Схиртладзе А.Г., Бочкарев С.В., Лыков А.Н., Борискин В.П. (2013) Автоматизация технологических процессов. Москва, ооо «ТНТ»
14. Khatib Oussama. Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots // *The Int. J. of Robot. Res.* -1986. -Vol. 5, no. 1. -p. 90-9
15. Rubagotti M., Vedova M., Ferrara A. Time-optimal sliding-mode control of a mobile robot in a dynamic environment // *IET Control Theory and Appl.* -December 2011,pp. 2-19.
16. Водовозов В.М., Мядзель В.Н., Рассудов Л.Н. (1986) Роботы в судокорпусных производствах (Управление, обучение, алгоритмизация). Москва, Судостроение

А.Н. Стариков  
Владимирский государственный университет им. бр. А.Г. и Н.Г. Столетовых,  
Владимир, Россия, [alstars@mail.ru](mailto:alstars@mail.ru)

## ЦИЛИНДРИЧЕСКИЕ ЗУБЧАТЫЕ ПЕРЕДАЧИ

### Аннотация

В работе рассмотрен пример анализа цилиндрических зубчатых механизмов с большим углом наклона зубьев на основе применения метода разбиения на простейшие. Рассматривается механизм клиновая пара. Самоторможение моделируется на его основе. Показана универсальность метода и перспективность при разработке самотормозящихся зубчатых механизмов.

*Ключевые слова:* самоторможение, простейшие механизмы, дифференциальная клиновая пара.

### Введение

Большой интерес представляют самотормозящиеся цилиндрические зубчатые передачи. Однако, их применение сдерживается сложностью методик расчёта и моделирования. Определение надёжности самоторможения для них также является сложной задачей. Исследованием данных механизмов занимались Роано (Швейцария) [3]; Поппер (Израиль) [2], рис. 1; И.Д. Хоуэлл (США) [4], рис. 2; Мюнстер (ФРГ), Метраль, ЛеБера (Франция) [5].

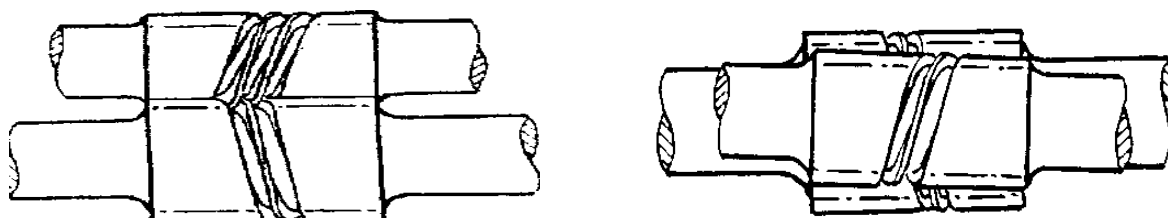


Рисунок 1 – Передача Поппера – Twinworm

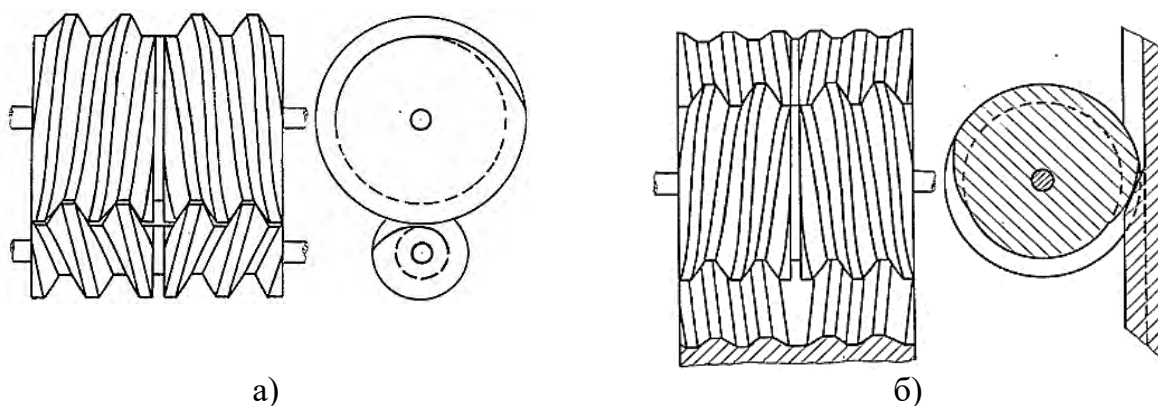


Рисунок 2 – Передачи Хоуэлла: а) цилиндрическая внешнего зацепления; б) реечная

Изучением передач с большими углами профиля зубьев занимался В. И. Панюхин [1], рис. 3.

При этом следует отметить, что в своей основе механизмы Панюхина схожи с передачами Хоуэлла. И являются шевронной разновидностью передач Twinworm, [2], предложенных И. Б. Поппером в 1961 г. Отличие от последних состоит в том, что в передаче Панюхина оси шестерён параллельны, а в передаче Поппера имеется небольшой угол между осями, рис. 1. Очевидно, что представленные передачи подобны.

### Метод

Важным является тот факт, что у всех них имеется проскальзывание звеньев в точке контакта, – наличие *простейшей передачи* с функцией редуцирования. Так, например, у передачи Панюхина (рис. 3 **Ошибка! Источник ссылки не найден.**- фото) соотношение средних диаметров составляет 2. И *передаточное число* по определению должно быть 2. При этом реальное (экспериментально полученное) значение равно 3,5.

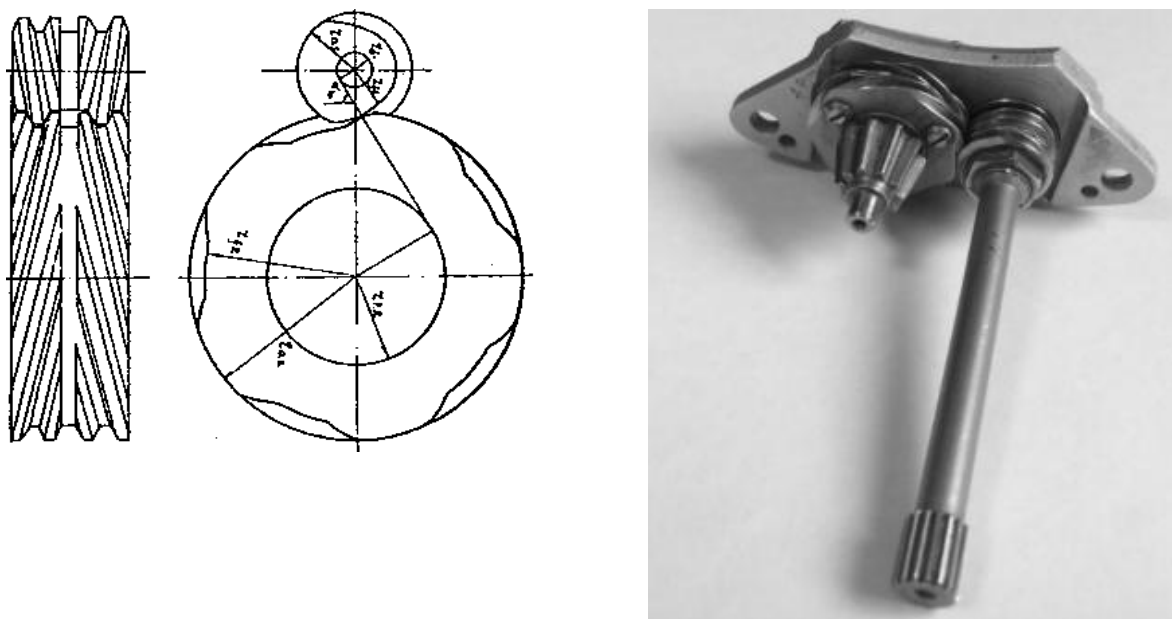


Рисунок 3 – Самотормозящиеся зубчатые цилиндрические передачи с большим углом наклона зубьев, – В.И. Панюхин, [1]

Этот момент является принципиальным при формировании свойства самоторможения. Применим метод Ассура – метод разбиения на первичные (простейшие) механизмы. Для указанной передачи, с учётом метода разложения на простейшие будет иметь место

$$i_{12} = r_1 \cdot \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} \cdot \frac{1}{r_2} \quad (1)$$

где  $i_{12}$  – общее кинематическое передаточное отношение от меньшей шестерни к большей – от 1 к 2;

$r_1$  – кинематическая передаточная функция по переводу вращательного движения в поступательное 1-ой шестерни;

$\alpha, \beta$  – углы наклона входных движений относительно плоскости взаимодействия;

$r_2$  – кинематическая передаточная функция 2-ой шестерни.

Определение углов  $\alpha$  и  $\beta$  в данном случае является наиболее сложной задачей и уходит в теорию контакта. Тем ни менее косвенным, расчётным или экспериментальным путём её решения возможно.

Имея же параметры *клиновой пары*:  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $f$  (коэффициент трения), – можно получить весь спектр параметров данной передачи, включая *надёжность самоторможения* и т.д. И если не учитывать трения в опорах, это будут параметры цилиндрической зубчатой передачи в целом.

Для передач, у которых углы  $\alpha$  и  $\beta$  равны, – КПО *клиновой передачи* равно единице. Тогда общее КПО зубчатой передачи сводиться к каноническому виду

$$i_{12} = \frac{r_1}{r_2} \quad (2)$$

Наличие *передачи относительного перемещения (клиновой передачи общего вида)* также имеет место и для прямозубых зубчатых передач, хоть и в минимальной степени. Общность схем для всех зубчатых механизмов не нарушается.

Так, на рис. 4 показана силовая схема точек контакта зубьев при переходе из доплюсного в заплюсное зацепление.

Силы  $F_1$  и  $F_2$ , участвующие в непосредственном взаимодействии, расположены на перпендикулярах образующих их радиус-векторов ( $R_1 - \text{т.А}$ ) и ( $R_2 - \text{т.А}$ ) соответственно. И создают *простейший механизм, – дифференциальную клиновую пару общего вида*. Следует отметить, что углы  $\alpha$  и  $\beta$  могут быть как острыми, так и тупыми. И расположенными как по одну сторону от нормали, так и в разные.

Направление движений в звеньях клиновой пары совпадают с направлением векторов сил, так как также основаны на перпендикулярах к соответствующему радиус-вектору.

Идеальной может считаться та зубчатая передача, у которой отсутствует относительное проскальзывание зубьев, – трение зуба о зуб. Тогда это случай, когда  $\alpha = \beta$ , рис. 4. И средний множитель в выражении (1) вырождается в единицу. Однако, технически этого достичь практически невозможно. Решение задачи профилирования зубьев как раз и носит своей целью свести данную составляющую к минимуму. Наиболее эффективные в этом смысле эвольвентные зацепления, зацепления в передачах Новикова и др.

Для доплюсного сопряжения, где  $\alpha > \beta$ , рис. 4-б имеет место кинематическая связь

$$i = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} > 1 \quad (3)$$

Т.е. выходная шестерня 2 обгоняет входную 1. Это мультипликатор.

В точке полюса создаётся условие, когда  $\alpha = \beta$ . Здесь проскальзывание отсутствует. Клиновая передача вырождена.

Для заплюсного зацепления  $\alpha < \beta$ , рис. 4 -г получим

$$i = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} < 1 \quad (4)$$

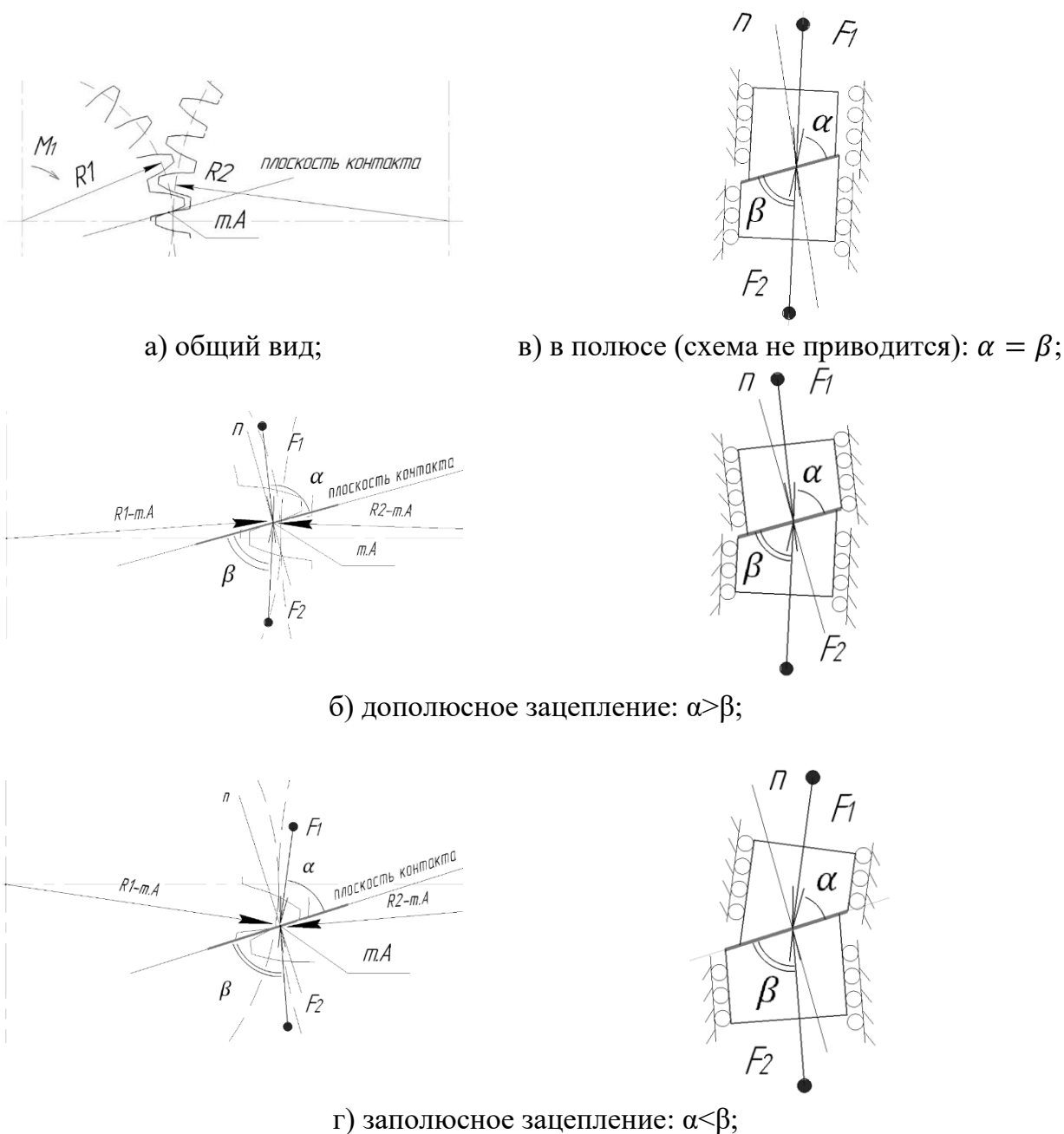


Рисунок 4 – Схема зубчатого зацепления в точке контакта:

а), б) – допюлюсное зацепление; в) в полюсе; г) заполюсное зацепление

Скорость выходной шестерни 2 меньше скорости входной 1. Это редуктор.

В данной связи следует отметить. Во-первых, наличие периодического, в рамках одного зацепления, знакопеременного значения  $i$  в итоге дают стабильную единицу. Во-вторых, при относительно больших радиусах шестерён и малых зубьях данный эффект незначителен.

Однако, смоделировать ситуацию, когда выходная шестерня имеет колебания по вращению на выходе – не сложно.

Так, для показательного примера, указанного на рис.4 где плоскость взаимодействия взята условно, а значения углов – с чертежа:  $\alpha_{\text{доп}}=80^\circ$ ,  $\beta_{\text{доп}}=71^\circ$ ;  $\alpha_{\text{зап}}=64^\circ$ ,  $\beta_{\text{зап}}=76^\circ$ , получим

$$\Delta i_{12} = \frac{\sin \alpha_{\text{зап}} \sin \beta_{\text{доп}}}{\sin \beta_{\text{зап}} \sin \alpha_{\text{доп}}} = 0,89$$



Для реальных же механизмов, имеющих эвольвентное зацепление, значения углов  $\alpha$  и  $\beta$  могут быть очень близки. И тогда, положим для  $\alpha_{\text{доп}}=94^\circ$ ,  $\beta_{\text{доп}}=97^\circ$ ;  $\alpha_{\text{зап}}=95^\circ$ ,  $\beta_{\text{зап}}=96^\circ$  будет иметь место:

$$\Delta i_{12} = \frac{\sin \alpha_{\text{зап}} \sin \beta_{\text{доп}}}{\sin \beta_{\text{зап}} \sin \alpha_{\text{доп}}} = 1,003$$

Видно, что это весьма малые значения. Кроме того, наличие нескольких зубьев в зацеплении, применение косозубых передач – существенно улучшают картину.

У косозубых зубчатых механизмов клиновая пара расположена уже не в торцевой плоскости шестерён, а в соответствии с углом наклона зубьев. Угол выходного движения  $\beta$  в этом случае уменьшается и в соответствии с *критерием самоторможения*, – критерием самоторможения для клиновых передач общего вида (с произвольными значениями углов направления действия входящих в механизм усилий) является угол выходного движения  $\beta$ , – подробнее рассмотрено в [6], оно (самоторможение) может реализоваться.

Так для передачи рис. 3 с учётом (1) имеет место

$$\begin{aligned} \frac{1}{3,5} &= 1 \cdot \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} \cdot \frac{1}{2} \quad i_{\text{клина } 12} = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = 0,571 \quad \text{– прямой} \\ i_{\text{клина } 12} &= \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = 0,571 \quad \text{– прямой ход} \\ i_{\text{клина } 21} &= \frac{\sin \beta}{\sin \alpha} = 1,75 \quad \text{– обратный} \end{aligned} \quad (5)$$

С учётом, что передача на обратном ходе обладает самоторможением получим граничное значение угла  $\alpha$  по переходу в самоторможение на обратном ходе.

Положим, что коэффициент трения  $f=0,1$ . Тогда

$$\alpha_{\text{гр}} = \arctg 0,1 = 5,71^\circ \quad (6)$$

Из (5) с учётом (6) получим  $\beta = 10,036^\circ$ .

Тогда, *клиновая пара* для данной передачи будет выглядеть следующим образом, рис. 5.

Следует отметить, что расчёт делался из предположения, что  $f=0,1$ . Для более точного его определения необходимы натурные испытания. Например, определение КПД прямого хода и вычисление из него истинного значения  $f$ .

Кроме того, схема на рис. 5 построена на предположении, что  $\alpha$  есть  $\alpha_{\text{гр}}$ , и механизм располагается на границе самоторможения (на обратном ходе). На самом деле передача находится внутри области самоторможения и обладает некоторым запасом по самоторможению. Для этого случая угол  $\alpha$ , а как следствие и угол  $\beta$  будут ещё более острыми.

### Результаты и обсуждение

Значения углов  $\alpha$  и  $\beta$  определяются величиной наклон зубьев и их профилем. Совершенствование технологии и способа производства зубьев шестерён даст возможность проектировать механизмы с повышенными, заданными, прогнозируемыми свойствами по самоторможению.

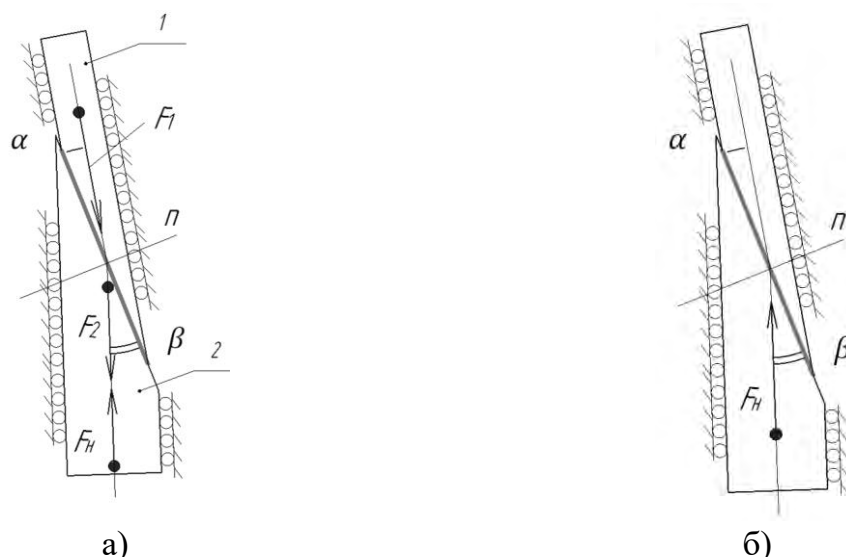


Рисунок 5 – Клиновая пара для передачи Панюхина:  
 а) режим прямого хода; б) обратный ход,  $[\alpha = \alpha]_{гр} = 5,71^\circ$   
 (реальные значения углов для наглядности увеличены в 2 раза)

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Панюхин, В.В. Исследование самоторможения механизмов и разработка методов проектирования высокоэффективных зубчатых зацеплений с тормозящими профилями : дисс. соиск. учен. степ. канд. техн. наук : спец.: 05.02.02 - Машиноведение и детали машин : 05.02.18 - Теория механизмов и машин / В. В. Панюхин ; Владимирский государственный университет (ВлГУ) – Владимир, 1999, 375 с.
2. Пат. США № 2973660, МКИ F 16 Н 55/04. Cooperating Wedges Including Mating Worms / I.V. Popper (Израиль). - № 758813; заявлено 3.09.58; опубл. 7.03.61; НКИ 74/424. – 10 с.
3. Пат. ФРГ № 1040864, МКИ F 06 Н. Zahnradgetriebe / A. Roano (Швейцария). - № 15 777; заявлено 1.03.56; опубл. 9.10.58; НКИ 47 Н 06 – 2 с.
4. Пат. США № 3481215, МКИ F 16 Н 55/04. Helical Gearing / I.D.Howell (США). - № 715753; заявлено 25.03.68; опубл. 2.12.69; НКИ 74/424.5 – 4 с.
5. Мюнстер Н.С. Определение коэффициента полезного действия зубчатых передач // Труды Ташкентского политехнического ин-та. - 1968. - Вып. 30. - с. 82-104.
6. Стариков, А.Н. Механизмы, основанные на взаимодействиях тел по плоскости // Теория механизмов и машин, СПбПУ Петра Великого, 2019. Т. 1. № 1. С. 27-39. [http://tmm.spbstu.ru/01\\_2019.html](http://tmm.spbstu.ru/01_2019.html)

Д.А. Быченко<sup>1,2</sup>, И.И. Козарь<sup>1</sup>, С.А. Любомудров<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Санкт-Петербург, Россия, [denisba97@mail.ru](mailto:denisba97@mail.ru)

<sup>2</sup>АО «Армалит», Санкт-Петербург, Россия

## СОВРЕМЕННЫЕ СПОСОБЫ БОРЬБЫ С ВИБРАЦИЯМИ ПРИ РЕЗАНИИ МЕТАЛЛОВ ПРИ ПОМОЩИ СПЕЦИАЛЬНОГО ВСПОМОГАТЕЛЬНОГО ИНСТРУМЕНТА

### Аннотация

В работе рассмотрены основные аспекты, связанные с возникновением вибраций при резании металлов, в частности обработкой глубоких отверстий. Перечислены известные на сегодняшний день теории, описывающие данный процесс. Проведен анализ используемых в настоящий момент специальных вспомогательных инструментов, способствующих гашению вибраций. Указано на необходимость выработки научно обоснованных критериев выбора подобного рода инструмента в зависимости от условий обработки и решаемых технологических задач.

*Ключевые слова:* вибрации, автоколебания, виброгасящая оправка.

### Введение

При изготовлении деталей часто приходится сталкиваться с обработкой глубоких отверстий, вообще говоря, являющихся нетехнологичными элементами конструкции. Однако использование сварных или сборных узлов, позволяющих заменить обработку глубокого глухого отверстия более простой с технологической точки зрения обработкой нескольких сквозных, не всегда возможно, исходя из требований к конструкции готового изделия. К примеру, корпус поз. 1 (рис. 1) сильфонного клапана, встраиваемого в контуры атомной электростанции, не может быть выполнен сварным, исходя из требований герметичности и коррозионной стойкости. Обработка центрального отверстия с точными посадочными поверхностями в цельном материале и требования к плавности переходов в патрубках диктуют необходимость применения в технологии чистового растачивания и контурного фрезерования (фрезами со сферической и подобной рабочей поверхностью). Таким образом, возникает необходимость работы консольно закрепленным инструментом на больших вылетах, что чревато снижением точности обработки и качества поверхностного слоя из-за упругих отжатий инструмента, снижения жесткости технологической системы и появления в ней вибраций.

Что касается первопричины возникновения вибраций в процессе механической обработки, то, несмотря на длительный период изучения данного явления, единого мнения в научной среде до сих пор нет. Изучением вибраций активно занимались А. П. Соколовский, А. И. Каширин, Л. С. Мурашкин, И. С. Амосов, В. А. Кудинов, И. Глустый, В. Л. Заковоротный и многие другие. Большинство авторов сходятся во мнении, что, вибрации при резании, в основном, носят незатухающий автоколебательный характер, то есть возбуждаются и получают энергию из самого процесса резания. Поэтому они являются и наиболее трудными с точки зрения борьбы, в отличие от вынужденных затухающих и незатухающих вибраций, причина которых зачастую имеет достаточно явный характер.

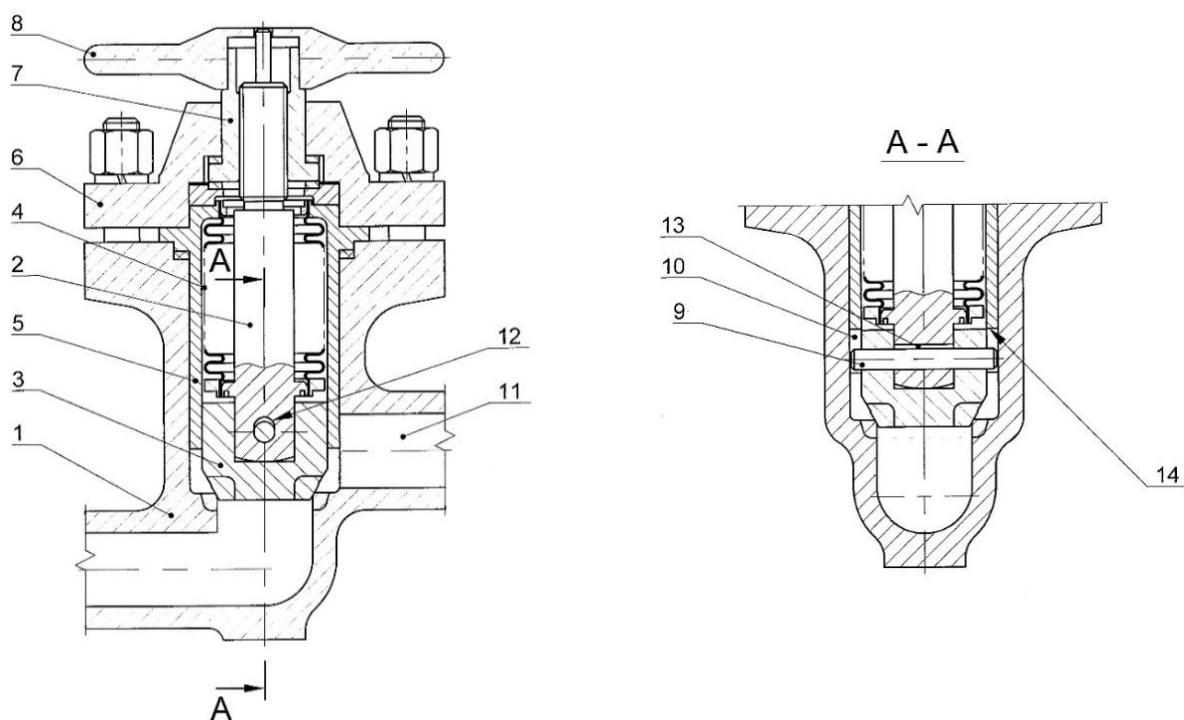


Рисунок 1 – Клапан запорный сальфонный [1]

Г.К. Корендясев предложил разделить все существующие на данный момент модели (гипотезы) автоколебаний в процессе резания на три группы [2]:

1) модели, предполагающие первопричиной автоколебаний статическую или динамическую двузначность силы резания (гипотезы А. П. Соколовского, А. И. Каширина – Л. С. Мурашкина, М. Е. Эльясберга и др.);

2) модели, где автоколебания объясняются наличием координатной связи внутри технологической системы с двумя и более степенями свободы (гипотезы В. А. Кудинова, И. Тлустого);

3) модели, основанные на идее «вторичного возбуждения» автоколебаний, к примеру, из-за точения по следу, возникновения нароста и т. д. (гипотезы И. С. Амосова, И. С. Штейнберга и др.).

Учитывая сложность физических процессов в зоне резания, Г. К. Корендясев предполагает перспективным создание единой теории, объединяющей все гипотезы, на основе разработанной им термомеханической модели, физически объясняющей падающую характеристику силы резания от скорости, с учетом принципа координатной связи и эффекта вторичного возбуждения колебаний. Та же тенденция к признанию влияния причин различной природы на автоколебательный процесс прослеживается и в трудах зарубежных авторов [3].

## Методы

Многие производители инструмента, а также исследователи в области обработки глубоких отверстий предлагают различные конструкции оправок и другого подобного вспомогательного инструмента, способствующего снижению вибраций.

Широкое распространение получают оправки Sandvik, Seco и др. производителей, принцип работы которых основан на замене одномассовой системы обычной расточной оправки двухмассовой. Внутри расточной оправки выполняется полость, куда заливается демпфирующая жидкость и с зазором помещается цилиндрическое тело, желательнее массивное, к примеру, свинцовое или

твердосплавное (рис. 2). Тело зажато между двумя резиновыми кольцами с определенным усилием, что обеспечивает необходимую чувствительность системы и, вместе с демпфирующей жидкостью, упругую связь между телом и корпусом оправки. Полученная таким образом двухмассовая система будет представлять собой динамический виброгаситель, для которого возможно найти такую частоту колебаний внутреннего тела, что корпус оправки колебаться не будет. Без учета влияния демпфирования материала самой оправки и виброгасящей жидкости эта частота будет равна собственной частоте колебаний внутреннего тела [4].

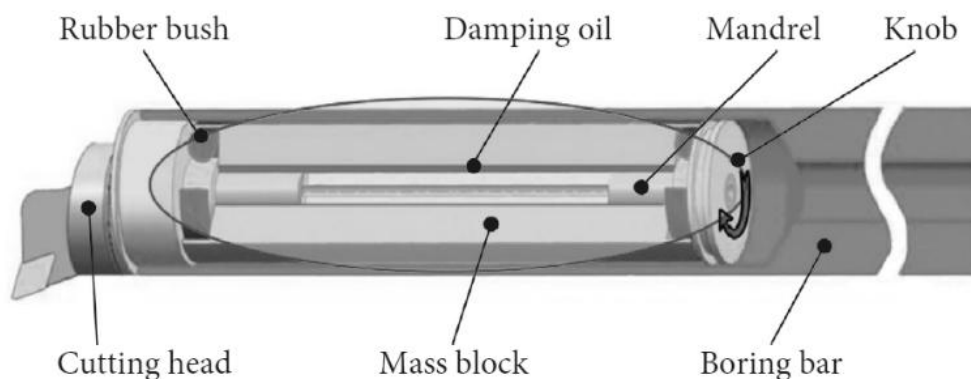


Рисунок 2– Принципиальная схема динамической виброгасящей расточной оправки [5]

Такого же плана оправки выпускаются и для насадных фрез, к примеру, группой компаний Hoffmann (рис. 3).

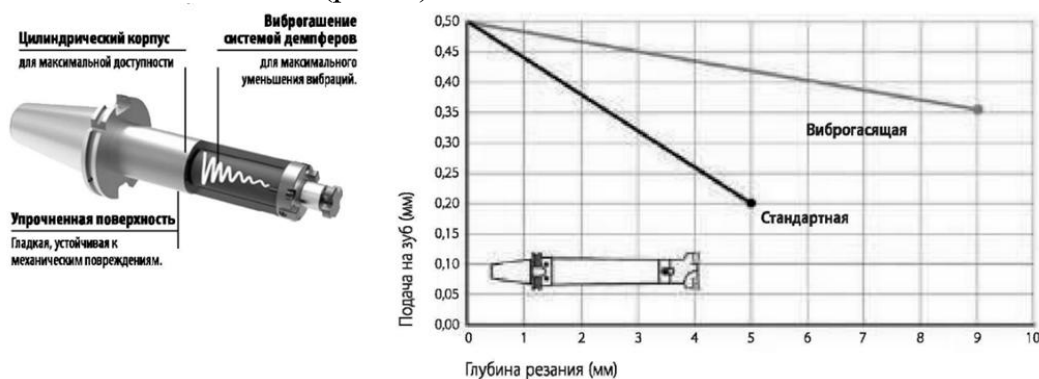


Рисунок 3– Виброгасящая оправка для насадных фрез с торцовыми шпонками

По сути, предлагаемый метод борьбы с вибрациями является дальнейшим развитием идеи ударного виброгасителя, известного еще по работам Д. И. Рыжкова 50-х гг. прошлого века [6].

В последнее время, по мере распространения инструментов из твердых сплавов и технологии их изготовления, чаще начинают применяться цельные твердосплавные державки и оправки, имеющие модуль упругости в 1,5–3 раза больше, чем стальные. Соответственно, отжатие (деформация) инструмента при том же вылете будет меньше, а статическая жесткость технологической системы – во столько же раз выше [7].

Также продолжает применяться известный способ, заключающийся в выполнении державки расточного резца полый, но содержащей внутри дробь, к

примеру, медную или свинцовую. В случае возникновения вибраций дробь, с одной стороны, активно соударяется со стенками полости, работая как ударный виброгаситель; с другой стороны, трется между собой и со стенками, переводя энергию колебаний в тепло, работая как пассивный виброгаситель. Эффективность работы такими державками может быть не ниже эффективности работы цельными твердосплавными державками, что подтверждается данными по стойкости инструмента (рис. 4). Однако стоит учесть, что эти данные относятся к максимальному вылету инструмента, при котором вибраций в системе не наблюдалось, а величина этого вылета для цельных твердосплавных державок больше, чем для державок с полостью, заполненной дробью (95 и 80 мм соответственно). Между исследователями продолжаются дискуссии на тему того, как наилучшим образом математически описать технологическую систему такого рода, что вносит большой вклад в гашение вибраций – удары дроби или трение, какова должна быть их масса, материал, количество и т. д. [7, 8, 9].

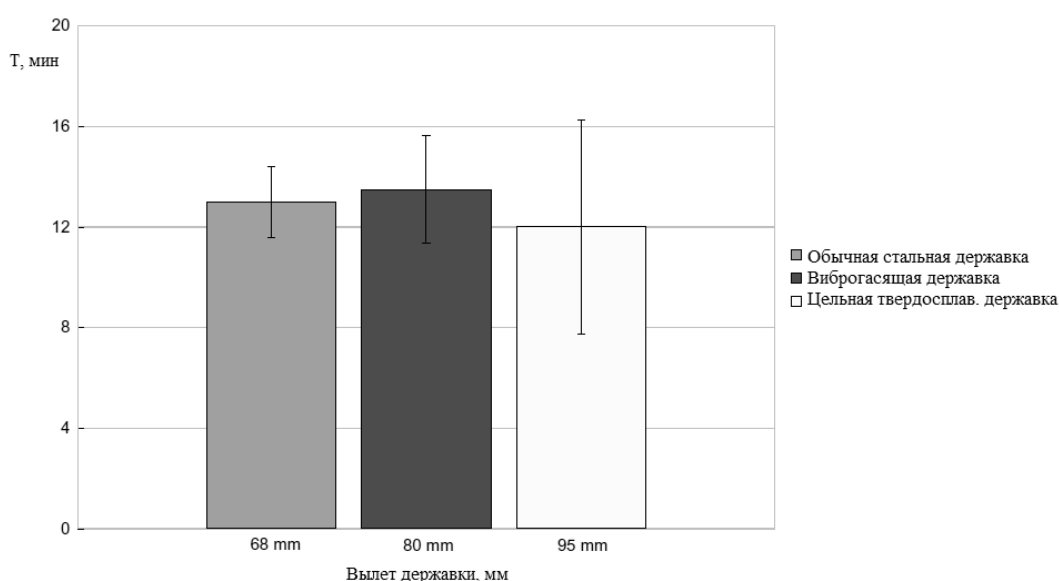


Рисунок 4 – Результаты экспериментов по стойкости расточных резцов с разными державками [7]

Другими авторами предлагается использование инструментов с различными прокладками, прослойками из виброгасящих и композитных материалов; инструментов переменной массы [8]; инструментов с настраиваемым напряженно-деформируемым состоянием, физически подобных натянутой струне, чью собственную частоту колебаний можно регулировать, меняя степень натяжения [10].

### Результаты и обсуждение

Как видно из вышесказанного, известные конструкторско-технологические решения проблемы возникновения вибраций при резании металлов не в полной мере удовлетворяют требованиям универсальности, гибкости для работы на обрабатывающих центрах с ЧПУ. Сложность и, соответственно, высокая стоимость оснастки, содержащей твердосплавные элементы, заставляет искать сравнительно более простые и доступные методы борьбы с вибрациями.

Также в настоящий момент нет единого понимания по вопросу природы возникновения автоколебаний, как нет и достаточно полных математических

моделей, описывающих как сам процесс колебаний, так и работу виброгасящих инструментальных систем. Многие авторы, особенно зарубежные, рассматривают только устойчивость технологической системы, не затрагивая само колебательное движение ее частей, которое описывается системами нелинейных дифференциальных уравнений.

Таким образом, в настоящий момент актуальным является вопрос разграничения сфер применения активных и пассивных виброгасящих систем; выработки критериев выбора того или иного конструкторско-технологического решения в зависимости от вида оборудования, желаемой точности обработки и параметров колебательного процесса. Перспективным также видится разработка математической модели, описывающей устойчивость технологической системы с учетом некоторых ее степеней свободы. Данные проблемы выбраны авторами в качестве целей дальнейших исследований.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пат. 2250404 Российская Федерация, МПК F 16 K 1/50, 1/48. Клапан сифонный / Ю. А. Онохов; патентообладатель ПКТИ «Атомармпроект». № 2004114483/06; заявл. 13.05.2004; опубл. 20.04.2005, Бюл. №11.
2. Корендяев, Г. К. О физических моделях возбуждения автоколебаний при резании / Г. К. Корендяев // Вестник научно-технического развития. - 2013. - № 7(71). - С. 15-25.
3. Sørby, Knut. Development and Optimization of Vibration-Damped Tool Holders for High Length-to-Diameter Boring Operations // High Speed Machining. - 2016. - Vol. 2. - P. 51-58. - DOI 10.1515/hsm-2016-0005
4. Левитская, О. Н. Курс теории механизмов и машин: учеб.пособие для мех. спец. вузов. - 2-е изд., перераб. и доп. / О. Н. Левитская, Н. И. Левитский. - М.: Высшая школа, 1985. - 279 с.
5. Lie, Li, Beibei, Sun, Haitao, Hua. Analysis of the Vibration Characteristics of a Boring Bar with a Variable Stiffness Dynamic Vibration Absorber // Shock and Vibration. - 2019. - Vol. 2019. - Article ID 5284194. - DOI 10.1155/2019/5284194
6. А. с. 95192 (СССР-USSR), МКИ 47а, 20. Виброгаситель ударного действия. / Д. И. Рыжков. № 1263/445398; заявл. 14.05.52; опубл. 1953, Бюл. №3.
7. Suyama, D.I., Diniz, A.E., Pederiva, R. The use of carbide and particle-damped bars to increase tool overhang in the internal turning of hardened steel // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. - 2016. - Vol. 86. - P. 2083-2092. - DOI 10.1007/s00170-015-8328-z
8. Alammari, Y., Sanati, M., Freiheit, T., Park, S.S. Investigation of Boring Bar Dynamics for Chatter Suppression // Procedia Manufacturing. - 2015. - Vol.1. - P. 768-778. - DOI 10.1016/j.promfg.2015.09.059
9. Marhadi, Kun S., Kinra, Vikram K. Particle impact damping: effect of mass ratio, material, and shape // Journal of Sound and Vibration. - 2005. - Vol. 283, Iss. 1-2. - P. 433-448. - DOI 10.1016/j.jsv.2004.04.013
10. Осминко, Д. А. Совершенствование технологии изготовления внутренних цилиндрических поверхностей сварных деталей из разнородных сталей: специальность 05.02.08 «Технология машиностроения»: дис. ... канд. тех. наук / Осминко Дмитрий Александрович; Санкт-Петербургский горный университет. - Санкт-Петербург, 2019. - 182 с.

А.А. Котик<sup>1</sup>, А.Е. Овчинников<sup>2</sup>, Е.В. Овчинников<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Гродненский государственный университет им. Янки Купалы,  
г. Гродно, Беларусь, ovchin@grsu.by

<sup>2</sup>Средняя школа № 28, г. Гродно, Беларусь, ovchin@grsu.by

## СВЕРХТВЕРДЫЕ АДДИТИВНЫЕ ПОКРЫТИЯ ДЛЯ МЕТАЛЛООБРАБАТЫВАЮЩЕГО ИНСТРУМЕНТА

### Аннотация

В статье представлены результаты исследований структуры, морфологии и физико-химических характеристик наноконпозиционных покрытий, полученных по аддитивным технологиям путем совмещения методов электродуговой наплавки и электроискрового легирования. Для всех исследуемых типов покрытий наблюдается образование нанодисперсных систем в структуре покрытия. Применение данного технологического подхода приводит к улучшению физико-механических характеристики модифицируемых стальных субстратов. Установлено, что формирование на поверхности покрытия аддитивных покрытий с оптимальными триботехническими характеристиками.

*Ключевые слова:* дуговой разряд, электроискровое легирование, покрытия, триботехнические свойства, твердость.

### Введение

Применение различных электрофизических методов повышения эксплуатационных характеристик изделий, деталей машин и механизмов, в том числе применяемых в автомобильной промышленности являются достаточно распространёнными технологиями. Так метод электродуговой наплавки позволяет восстанавливать различные конструкционные изделия двигателей автомобиля, в частности коленчатые и распределительные валы, шестерни и т.п. Данная технология позволяет существенно снизить себестоимость проводимого ремонта различных узлов автотракторной техники. Наплавка – это процесс восстановления изношенных деталей машин. Поверхность детали, поврежденной в процессе эксплуатации, покрывается слоем нового материала. Материал подается на поверхность изделия в расплавленном виде. При наплавке основной материал частично плавится, поэтому образуется переходная зона, в которой наплавляемый материал перемешивается с материалом изделия. Процентное содержание материала основы в данной зоне может составлять до 60%, более высокая концентрация нежелательна, так как может приводить к снижению значений физико-механических характеристик наплавляемого материала. Существует несколько способов наплавки: газовая наплавка, дуговая наплавка, наплавка под флюсом, электрошлаковая наплавка, дуговая наплавка с вольфрамовым электродом в защитной атмосфере инертного газа, аргонодуговая сварка вольфрамовым электродом с присадочным прутком (GTA), газовая дуговая сварка металлическим электродом (GMA), наплавка с использованием самозащитных порошковых проволок (SSA), плазменная наплавка (PTA), лазерная наплавка и другие методы [3–4]. Для придания дополнительных физико-механических характеристик наплавленным материалам возможно использование других электрофизических методов, формирования покрытий. В частности, в данном случае подходит



технология электроискрового легирования (ЭИЛ). Электроискровое легирование - стандартная технология модифицирования проводящих поверхностей твердых тел, которая характеризуется высокой плотностью энергии и низким тепловыделением в процессе нанесения покрытия. Данный метод нашел широкое применение для создания упрочненных поверхностей изделий, путем формирования модифицированных упрочняющих покрытий. Применение импульсного разряда высокой энергии между вибрирующим электродом и металлической подложкой позволяет инициировать микрометаллургические процессы, что обеспечивает высокую адгезионную прочность между покрытием и подложкой.

### Методика эксперимента

В ходе проведенных исследований для формирования покрытий необходимой толщины применяли следующие методы электродуговой наплавки: дуговая наплавка (I), дуговая наплавка с неплавящимся электродом в защитной атмосфере защитного газа (II), аргонодуговая наплавка с неплавящимся электродом (III). В качестве легирующих материалов применяли электродную проволоку ОЗС-12 для метода (I), проволоку Св-08Г2С для метода (II), проволоку СВ-08А для метода (III). Химический состав применяемых проволок приведены в таблицах 3.1–3.3

Для оценки химического состава формирующихся покрытий на стальной подложке из стали 45 применяли метод рентгеновской флуоресцентной спектроскопии. Исследования проведены на приборе МАКС-G. Наплавленные образцы подвергались предварительной обработке путем шлифования до 9–10 класса чистоты.

### Результаты исследований

Результаты исследований по определению химического состава наплавленных покрытий приведены на рисунке 1.

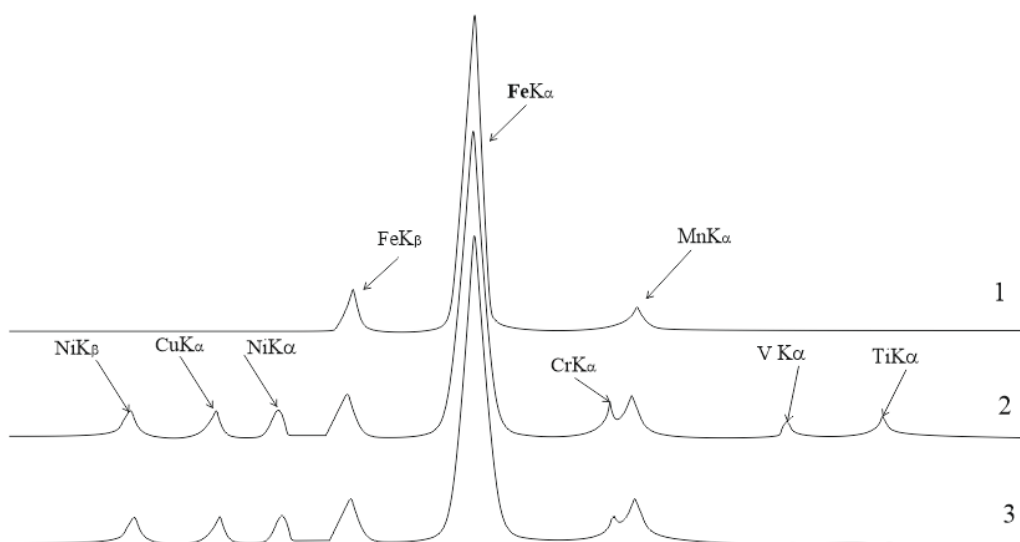


Рисунок 1 – Спектры РФА металлических покрытий, сформированных на стали 45 методом электродуговой наплавки: 1 – покрытие полученное по методу 1, 2 - покрытие полученное по методу 2, 3 – покрытие полученное по методу 3

Согласно полученных данных химический состав осаждаемых покрытий фактически не отличается химического состава электродных проволок, применяемых для формирования защитных слоев. В связи с этим возможно, предположить, что механические характеристики восстановленных металлических поверхностей будут соответствовать свойствам материалов, применяемых для напыления (рисунок 2). Твердость наплавленных образцов определяли методом Либа (динамическое индентирование). Результаты исследований приведены на рисунке 2.

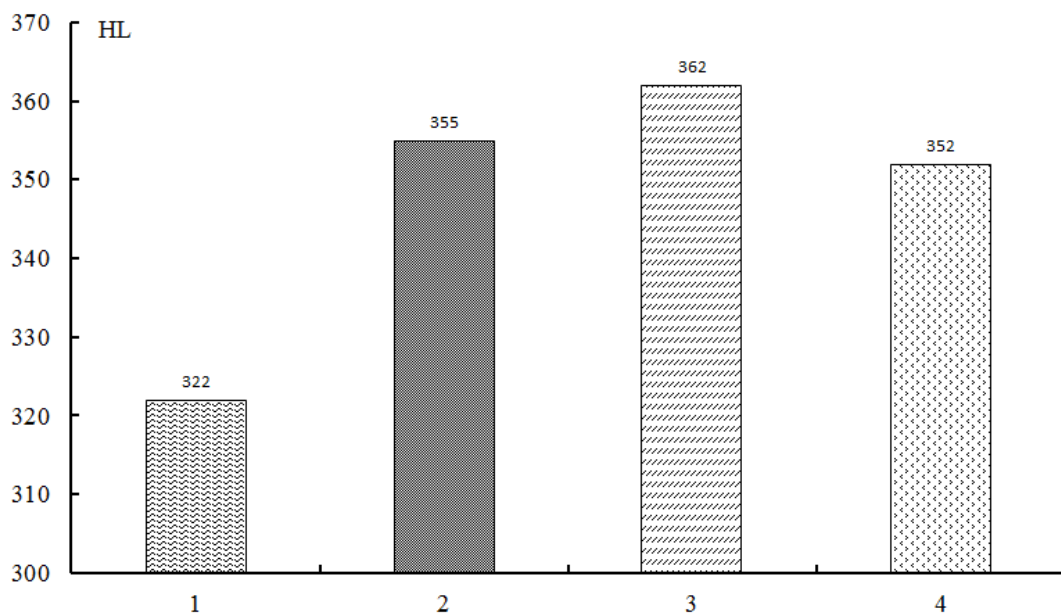


Рисунок 2 – Твердость по Либу металлических покрытий сформированных на стали 45 методом электродуговой наплавки: 1 – покрытие полученное по методу 1, 2 – покрытие полученное по методу 2, 3 – покрытие полученное по методу 3, 4 – исходная сталь 45

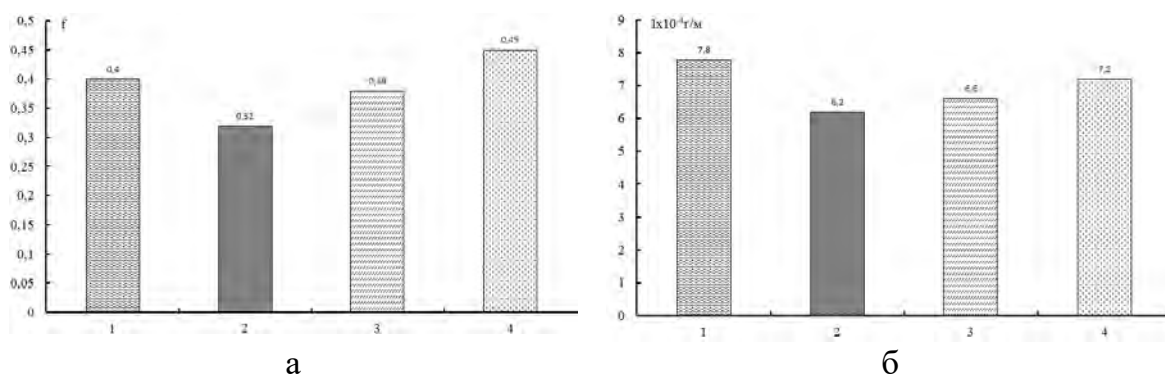


Рисунок 3 – Триботехнические характеристики покрытий, сформированных на стали 45 методом электродуговой наплавки: а- коэффициент трения металлических покрытий, сформированных на стали 45 методом электродуговой наплавки: 1 – покрытие полученное по методу 1, 2 - покрытие полученное по методу 2, 3 – покрытие полученное по методу 3, 4 – исходная сталь 45; б – массовая интенсивность изнашивания металлических покрытий сформированных на стали 45 методом электродуговой наплавки: 1 – покрытие полученное по методу 1, 2 - покрытие полученное по методу 2, 3 – покрытие полученное по методу 3, 4 – исходная сталь 45

Проведенные исследования по сравнению данных динамического определения физико-механических характеристик с статическим индентированием показывает хорошую корреляцию. Данная зависимость прочностных характеристик от метода получения покрытий должна оказывать существенное влияние на триботехнические характеристики, сформированных защитных металлических слоев. Согласно полученным данным триботехнических испытаний, проведенных на трибометре FT-2, установлено, что наиболее оптимальными характеристиками обладает покрытие, полученное по методу 2 (рисунок 3).

Согласно исследованиям морфологии покрытий, проведенных методом оптической микроскопии видно, что наблюдается выглаживание исходного рельефа при трении по стали ШХ15 по наплавленным металлам. Наиболее сглаженный рельеф наблюдается у образца, полученного по методу II. Образование сглаженного рельефа объясняет снижение значений коэффициента трения и интенсивности изнашивания покрытий, получаемых по методу II.

Для повышения эксплуатационных характеристик базовых наплавленных материалов применяли метод электроискрового легирования. Использовался метод послойного формирования защитных покрытий, что существенно удешевляет процесс формирования защитных слоев. В таблице 1 приведены составы покрытий.

Таблица 1 – Технологические параметры формирования покрытий ЭИЛ и состав электродов

Образец	Параметры формирования покрытий		
	режим формирования покрытия, Дж	субстрат	состав электрода
№1	0,9	покрытие, полученное по методу 1	Ti+Al+C
№2	3	покрытие, полученное по методу 2	Ti+Al+C
№3	0,9	покрытие, полученное по методу 3	Ti+Si+C
№4	3	исходная сталь 45	Ti+Si+C

Исходя из полученных данных видно, что в результате электроискрового получения покрытий структура исходных материалов претерпевает существенные изменения. Образуются многокомпонентные покрытия, причем режимы формирования оказывают существенное влияние на структуру получаемых покрытий.

Изучение морфологии электроискровых покрытий методом растровой электронной микроскопии показало наличие нанодисперсных фаз, независимо от режимов и химического состава покрытий (рисунок 4).

Изменения в структуре, морфологии покрытий должны отражаться на физико-механических характеристиках покрытий. Проведенный анализ механических свойств электроискровых слоев, сформированных на титановом субстрате ВТ6 подтвердил данные предположения. Микротвердость исследуемых ЭИЛ покрытий в 1,5 – 3 раза выше, чем у электродуговых покрытий, используемых в качестве субстратов.

Методом рентгеноструктурного анализа изучена структура, сформированных ЭИЛ покрытий.

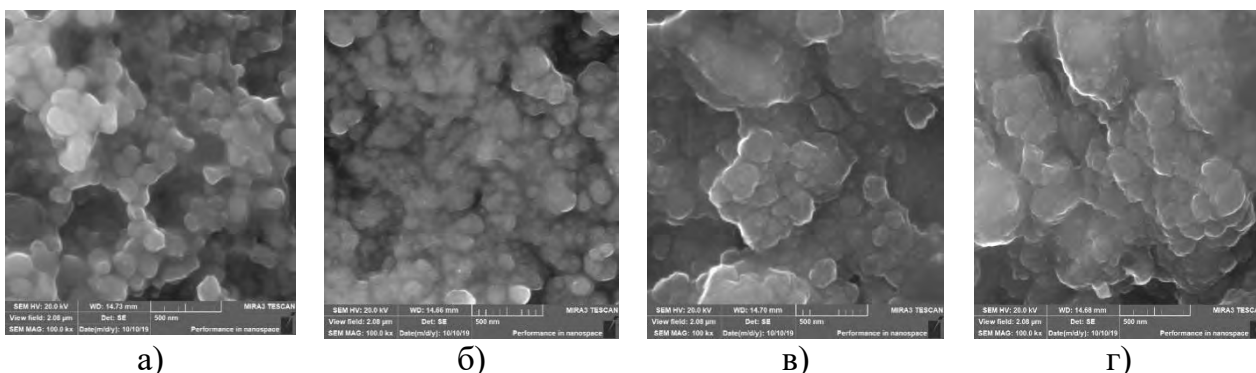


Рисунок 4 – Морфология электроискровых покрытий. а – образец №1, б – образец №2, в – образец №3, г – образец №4. Снимки получены методом растровой электронной микроскопии

Таким образом, показано, что условия формирования электроискровых покрытий оказывает существенное влияние на структуру получаемых защитных слоев. Структура покрытий также существенно зависит от химического состава электродов. Наблюдается возможность формирования МАХ-фаз в исследуемых покрытиях. Установлено изменение зависимости значений удельной поверхностной энергии от состава покрытия и технологических режимов формирования. Для всех исследуемых типов покрытий наблюдается образование нанодисперсных систем в структуре покрытия. Изменения в структуре, физических параметрах получаемых покрытий положительно сказывается на прочностных характеристиках, что выражается в увеличении значений микротвердости изучаемых покрытий в 1,5 – 3 раза.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Михайлов, В.В. Электроискровое легирование титана и его сплавов, физико-технологические аспекты и возможность практического использования. Краткий обзор. Часть I. Особенности массопереноса, структурные и фазовые превращения в поверхностных слоях, их износо- и жаростойкость / Михайлов В.В. [и др.] // Электронная обработка материалов. -2013. – Т.49. - №5 – С.21-44.
2. Михайлов, В.В. Особенности электроискрового легирования алюминия и его сплавов / В.В. Михайлов, А.П. Абрамчук // Электронная обработка материалов. – 1986. – №2. – С. 36-41.
3. Овчинников, Е.В. Структурные особенности нанокomпозиционных покрытий, получаемых методом электроискрового легирования / Овчинников Е.В. [и др.] // Горная механика и машиностроение. - 2020. - № 1. -С. 93-100.
4. Wang R.J., Qian Y.Y., Liu J. Structural and interfacial analysis of WC92–Co8 coating deposited on titanium alloy by electrospark deposition // Applied Surface Science. – 2004. – Vol. 228 (1). – p. 405 – 409.

## **МОДЕРНИЗАЦИЯ ВЫШКИ 40В6М(40В6МД) ДЛЯ БЕЗОПАСНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ И РЕМОНТА ПРИ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ**

### **Аннотация**

Актуальность выбранной темы обусловлена необходимостью обеспечения безопасной работы военного расчёта в связи с обстановкой при выполнении боевых задач. В работе предложена новая конструкция подъемного механизма для проведения ремонта, защищающая от стрельбы и погодных условий. Конструкция подъема разработана с учётом расчёта на прочность и построения эпюр.

*Ключевые слова:* технология машиностроения, подъемное устройство, стали, сплавы, защита, безопасность.

### **Введение**

В настоящее время становятся актуальны задачи работы в экстремальных условиях. В бою техника обнаружения может выходить из строя. Ставятся задачи обезопасить работу военных и сохранить жизнь [1 - 4]. Надёжный механизм подъема с защитой может решить данную проблему [5 - 7].

### **Методы**

Для достижения поставленной цели был сконструирован подъёмная система и выполнен расчёт на прочность.

### **Назначение**

Вышка 40В6М предназначена для установки и крепления на неё изделия Ф5М и обеспечения работы этого устройства в любое время года и суток на высоте 25 метров, при температуре окружающей среды от -50°C до +50°C, при относительной влажности до 98% (при t° +35°C) на высоте до 3000 метров над уровнем и при ветре до 25 м/с. Базирование Ф5М производится на плоскость фиксирующими приспособлениями (см. рисунок 1). 40В6М может использоваться для работы с другими изделиями, как Ф1С.

Устойчивость обеспечивается при ветре до 50 м/с: при установке ветровых контргрузов на 40В6М, 40В6МД при креплении её к анкерным частям площадки. Разворачивание вышки происходит на неподвижной площадке с углом наклона не более 2 градусов; либо на площадке, оборудованной специальными анкерными узлами. Эти данные необходимо учитывать для дальнейшей модернизации конструкции и для установки дополнительных элементов.

В походном положении вышка может передвигаться по дорогам 1-5 категории. Скорость по асфальту не должна превышать 55 км/ч, по грунтовым-20 км/ч. Минимальный радиус поворота равен 20 метрам, ширина коридора проходимости 10 метров. Технические характеристики сведены в таблицу 1.

Таблица 1 – ТХ вышки 40В6

Технические характеристики вышки 40В6М	
Пункт 1. Габаритные размеры в походном положении	
1.1 Длина вышки с тягачом	26120 мм
1.2 Ширина	3200 мм
1.3 Высота	3950 мм
1.4 Высота в рабочем положении (расстояние от плоскости стыковки изделия до земли)	19000 мм
1.5 Ширина при развёрнутых аутригерах	17400 мм
Пункт 2. Технические характеристики	
1.6 Масса вышки с тягачом МА3-537 без тягача	74360 кг 52360 кг
1.7 Размер площадки для развёртывания вышки	20x20 метров
1.8 Допускаемый наклон площадки	2°
1.9 Привод механизма вышки	Гидравлически
1.10 Скорость ветра максимальная при развёртывании вышки; при работе с изделием Ф5М; при вертикальной стреле с установленными контргрузами;	до 15 м/с до 30 м/с до 50 м/с
1.11 Отклонение фланца при ветре 30 м/с	8'
1.12 Путь торможения вышки при 30 км/ч	18 метров

### Устройство и работа механических частей вышки

Рама-база, на которой закреплены все основные части и механизмы вышки. В состав входят левый и правый аутригеры, стояночные опоры, гидровинтовые опоры, поддерживающая опора, ходовая часть с тормозной системой, центральная плита, передние опорные плиты, ящики, площадка, брусковые уровни, блок счетчиков моточасов, комплект стяжек, лестницы, ящики ЗИП, шанцевый инструмент, воротки.

### Модернизация вышки 40В6

При минусовых температурах обслуживание вышки 40В6 и проведение регламентных работ становится опасным для выполнения: обледенение металлоконструкций, что может привести к несчастным случаям; обморожение конечностей и тела военного. Для безопасной работы есть возможность усовершенствовать конструкцию, представленную на рисунке 2.

Усовершенствование, которое придаст безопасности, будет включать в себя: кабину, электротельфер, крюк и стальной трос (Ø12мм ГОСТ 2688-80 6,5т разрывная нагрузка).

За основу модернизации следует взять базовую лестницу с направляющими швеллерами, убрав заграждения безопасности. Швеллер — стандартный профиль конструктивных элементов из чёрного проката, имеющий П-образное сечение. Используется в качестве опорной конструкции в строительстве и машиностроении. По его поверхности будет ездить ответный механизм с роликами кабины. (см. рисунок 2).

В кабине предусмотрены 2 выхода с противоположных сторон и запасной люк снизу на случай блокировки или остановки кабины. Человек спуститься по лестнице

вниз. Кабина подъемного механизма будет выполнена из пулестойкой брони С-500 по ГОСТ Р 50744-95. В местах военных действий может работать снайперская группа со снайперским оружием. Из проката толщиной 10 мм вес кабины с габаритами 2100x1500мм получается равным примерно 820 кг.

Сравнительный анализ полезных свойств военной брони А3 и пулестойкой износостойкой стали С500 показывает, что пулестойкая сталь С-500 превосходит бронесталь А-3 по параметрам: свариваемость, живучесть, износостойкость при одинаковой твердости. Что касается параметра "Пулестойкость": Противопульная броня С500 и А3 имеет одинаковый класс защиты Бр4, Бр2, БР3 при схожей толщине. По классу защиты БР5 и Бр6 сертифицируется только пулестойкая сталь С-500. Технологичность при производстве С500 намного выше, что позволяет производить толщину до 40мм. Раскрой закаленного слоя у брони С500 имеет размеры 2000\*6000мм. Свариваемость С500 обусловлена более низким количеством углерода в диапазоне 0, 19-0, 26

Главные военные параметры стали: износостойкость, работа на трение, износоустойчивость к трению, защита от трения и износа.

Толщина (мм)3.0 - 80.0; твердость (НВW)480 - 540Мин. работа удара для типовых поперечных образцов Шарпи 10x10 мм<sup>2</sup> =32 Дж / -400С, предел текучести Rp0.2 (min МПа) = 1250, предел прочности Rm(МПа)=1450 – 1750, относительное удлинение А5 (мин. %)= 8, электротельфер серии Т10532 3,2 тонны длина троса 24 м масса 600 кг.

Управление приводом электродвигателя тельфера осуществляется через проводной пульт, так как дистанционное и беспроводное управление в различной помеховой обстановке может не функционировать.

Скорость движения кабины = 0,71 м/с. Имеется ограничитель скорости: при движении кабины со скоростью выше допустимой он сработает и приведёт в действие ловители на П-образных швеллерах. Центробежная сила на грузах двигателя выше допустимой, следовательно, преодолев усилие пружины, стопоры зажмутся, механизм остановится и зафиксируется (см. рисунок 2).

Электротельфер фиксируется болтами М20 на уголке (консоли). Общая нагрузка вместе с человеком и доп оборудованием М=1700 кг. Следовательно, выбор произведён с двойным запасом прочности, 3,2 тонны.

Произведём расчёт консоли на нагрузку с исходными данными l=2 м, F=14.7 Кн. Расчёт уравнения статического равновесия произведем по формуле 1.

$$\sum F_y = F - Y_A = 0; \sum M_A = F \cdot 1.7\text{м} - M_A = 0; \quad (1)$$

Отсюда находим  $Y_A = 14.7$  кН;  $M_A = 24.99$  кН·м.

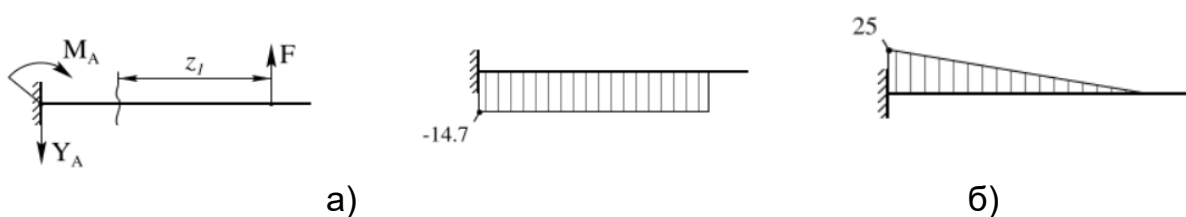


Рисунок 2 – Эпюры реакций: а) схема реакций(слева) и эпюра Qy,(справа) поперечная.сила кН, б) эпюра Mx, кН·м (изгибающий момент)

Построение эпюр внутренних силовых факторов для схемы: участок 1 ( $0 \leq z_1 \leq 1.7\text{м}$ )  $Q_Y = -F = -14.7 \text{ кН}$ ;  $M_x = F \cdot z_1$ ; при  $z_1 = 1.7\text{м}$ ;  $M_x = 24.99 \text{ кН} \cdot \text{м}$ .

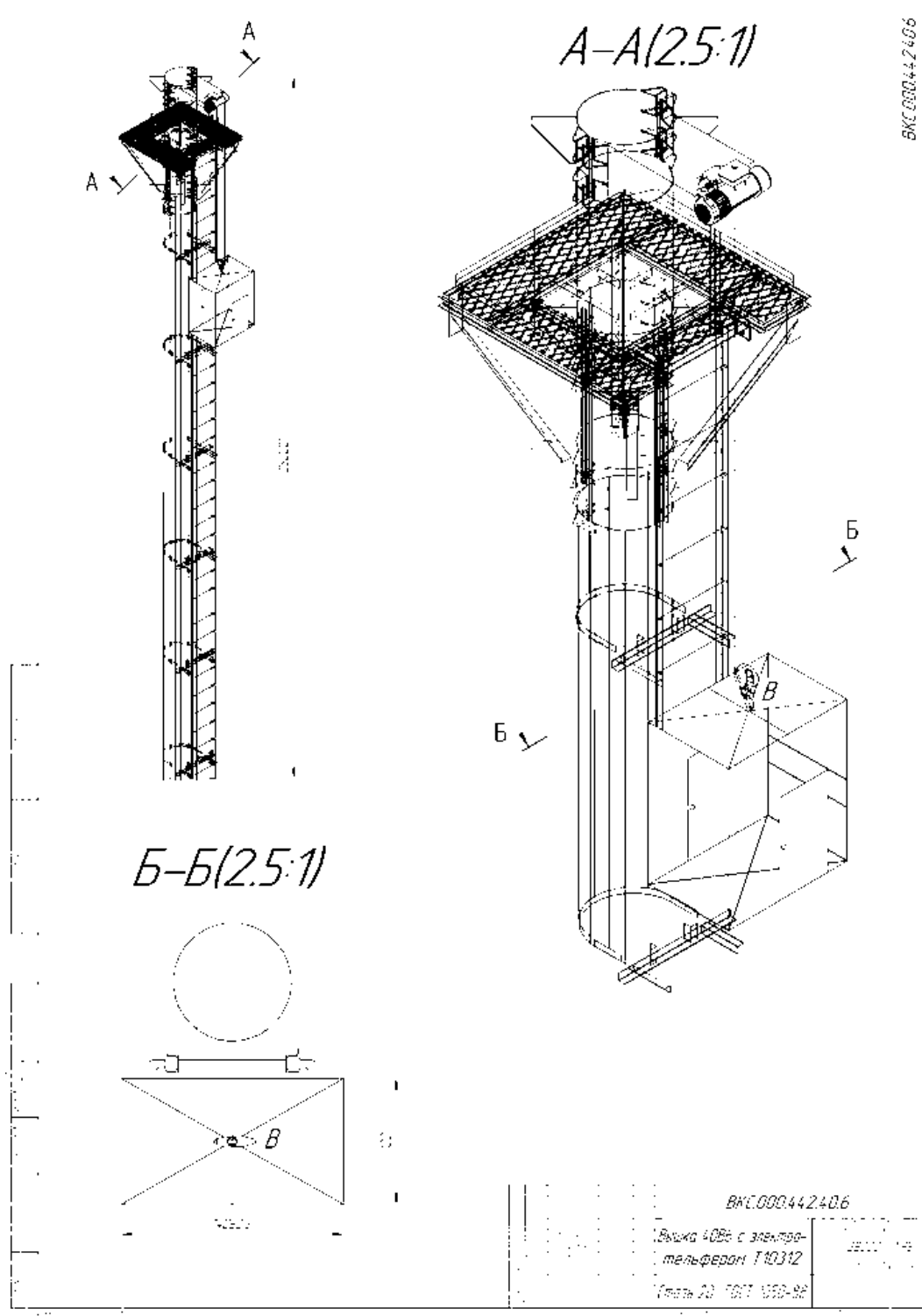


Рисунок 2 – Вышка 40В6 с усовершенствованной конструкцией

### Заключение

Согласно расчёту была подтверждена безопасность конструкции для использования.



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гарькушев А.Ю., Селиванов А.А., Чварков С.В. Сущность и проблемы управления обеспечением безопасности и обороной государства // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. 2016. № 3 (93). С. 3-10.
2. Мегера Ю.А., Гасюк Д.П., Меженев А.В. Адаптация системы технического обслуживания и ремонта к системе комплексного сервисного обслуживания // В сборнике: Проблемы технического обеспечения войск в современных условиях: Труды II межвузовской научно-практической конференции. 2017. С. 318-322.
3. Мегера Ю.А., Гасюк Д.П., Бурлаков А.А. Анализ взаимодействия системы технического обслуживания и ремонта вооружения и военной техники с оборонно-промышленным комплексом // В сборнике: Проблемы технического обеспечения войск в современных условиях. Труды II межвузовской научно-практической конференции. 2017. С. 314-317.
4. Белов А.С., Скубьев А.В. Эффективность обеспечения живучести подсистемы управления сложной организационно-технической системы // Телекоммуникации. 2020. № 11. С. 41-47.
5. Громов, В.В., Журавлев, В.А // Устройство и эксплуатация подъёмных механизмов радиолокационных станций: учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки бакалавров «Прикладная механика». Изд-во Политехн. ун-та, 2015. - 86 с.
6. Родионов, В.А., Маковой, С.В. // Принципы построения ЗРС "Волхов М6": учебное пособие/Санкт-Петербург: Изд-во Политехн. ун-та, 2018. - 60с.
7. Озарчук, В.С.; Журавлев, В.А., Богданов, В.И. // Материалы научной конференции с международным участием "Неделя науки СПбПУ", 18–23 ноября 2019 года. Военный учебный центр/Санкт-Петербург: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2019. – 127 с.

Д.Д. Брусова, О.А. Лапшина, Д.Н. Шабалин, И.И. Козарь  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Санкт-Петербург, Россия, [kalinin@ya.ru](mailto:kalinin@ya.ru)

## УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ ДЕТАЛИ «ФЛАНЕЦ» НА ОСНОВАНИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ДЕФЕКТОВКИ

### **Аннотация**

В работе рассмотрена модернизация и проектирование вышедшей из строя детали «Фланец» электронасоса.

Результатом проделанной работы является разработанный чертёж усовершенствованной детали «Фланец» и продуманный технологический маршрут изготовления данной детали.

*Ключевые слова:* ремонт, проектирование, материал, изготовление, операция, деталь.

### **Введение**

На производстве большое внимание уделяется не только разработке технологических процессов изготовления деталей, но и техпроцессам ремонта [1 - 6].

В данной работе рассматривается электронасос, который необходимо подвергнуть ремонту после трех лет активной эксплуатации. В ходе предремонтных испытаний на объекте была выявлена повышенная вибрация в области соединительного фланца насосной части с электродвигателем. Электронасос был демонтирован, выгружен с объекта, доставлен на производственную площадку, разобран, детали насоса очищены и замаркированы. По результатам дефектации было выявлено, что имеется разрушение болтового соединения фланца с корпусом по причине отсутствия центрирующего бурта.

Для восстановления работоспособности насоса необходимо изготовление нового соединительного фланца между насосной частью и электродвигателем.

Модернизация позволяет обеспечить повышение экономичности, снижение энергопотребления и значительное увеличение ресурса работы насосов. На рис.1 представлен эскиз с исходными данными для разработки деталей.

### **Модернизация фланца:**

- Изменение положения отверстий М10. Для обеспечения более легкой собираемости и повышения технологичности необходимо сместить отверстия на 45° относительно отверстий М8 (в корпусе двигателя).

- Проектирование и изготовление ремонтного комплекта из высоколегированных и высокопрочных материалов, повышающих коррозионную стойкость деталей и увеличивающих ресурс деталей.

- Для повышения статической и циклической прочности, а также уменьшения напряжений на участках переходов, все внутренние углы фланца необходимо снабдить галтелью.

- Для предохранения точных поверхностей от забоин, а также для облегчения сборки и предотвращения травм рук, все внешние углы фланца снабдить фасками.

- Не совмещать во фланце сразу две функции: функцию двух фланцев (крепление к э/д и крепление к насосу), а также функцию крышки э/д.

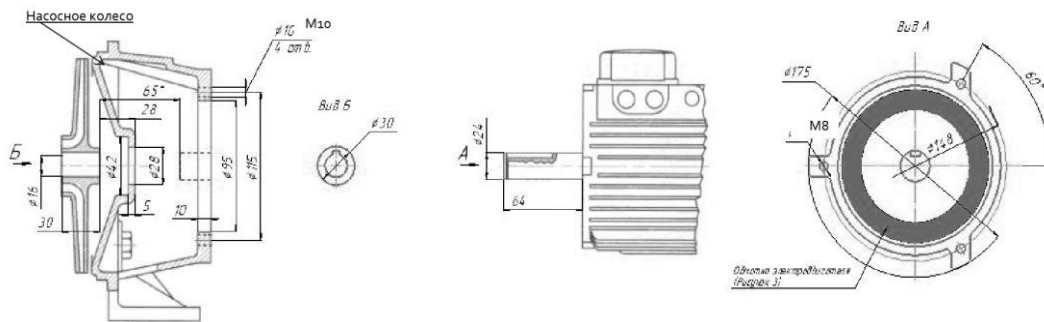


Рисунок 1 – Эскиз с исходными данными для разработки деталей

**Назначение материала для изготовления фланца и обоснование выбора.**

Марка стали 09Г2С – низколегированная конструкционная сталь, используется при производстве сортового и листового проката и фасонных профилей повышенной прочности. Производится согласно требованиям, закрепленным в стандартах ДСТУ 8541, ГОСТ 19281 и других нормативных документах.

Сталь подвергнуть оцинковке – покрытие металла слоем цинка для защиты от коррозии. После обработки данный тип стали приобретает двухфазную структуру, что гарантирует ей высокий уровень выносливости, а также устойчивость к разрушению, которая также повышается в три раза. Несомненным плюсом данного типа стали является отсутствие хрупкости материала, а также снижения уровня вязкости после температурного воздействия. Это свойство выделяет сталь 09Г2С среди других представителей данного класса с высоким содержанием различных присадок или углерода.

Ниже представлен разработанный чертеж усовершенствованной детали «Фланец».

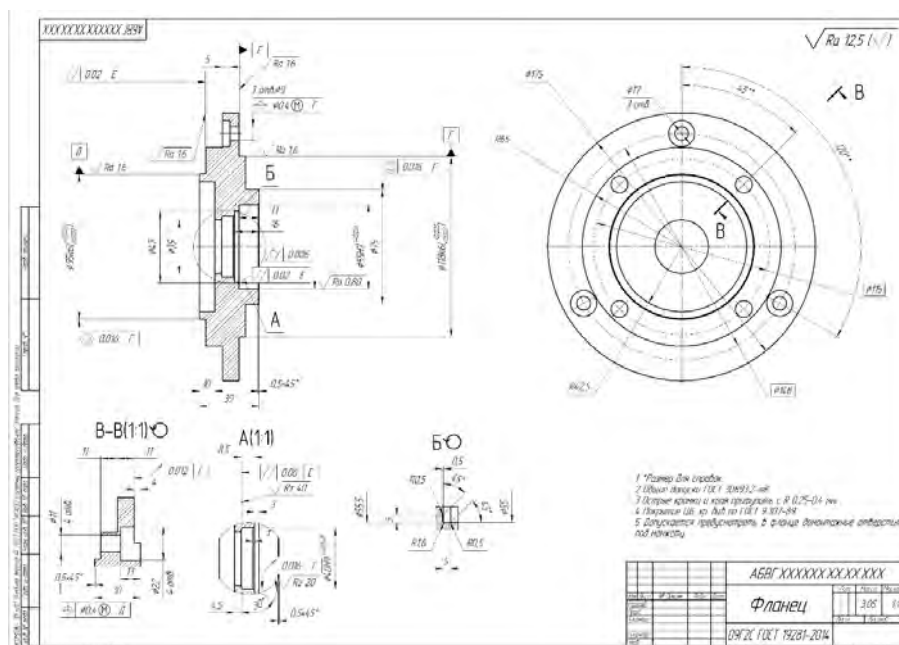


Рисунок 2 – Чертеж детали «Фланец»

Технологический маршрут изготовления разработанной детали «Фланец» представлен в виде сводной таблицы 1.

Таблица 1 – Технологический процесс изготовления детали «Фланец»

	Наименование	Суть	Описание	Станок
005	Заготовительная	Отрезка прутка		
010	Токарная с ЧПУ (два станова) черновая	Подрезка торца, зацентровка торца, сверление отверстия, точение черновое наружное со снятием фасок, точение канавок, предварительное расточивание центрального отверстия, окончательное расточивание (с припуском под шлифование.)	Первый установ: базирование по наружной поверхности и торцу в патроне. Второй установ: базирование по отверстию и торцу на оправке.	РТ-706 с ЧПУ
015	Токарная с ЧПУ (два станова) чистовая	Аналогично черновой операции 010.		РТ-706 с ЧПУ
020	Сверлильная (два станова)	Сверлить отверстия, нарезать резьбу.	Выполняется на радиально- сверлильном станке.	2Н53
025	Внутришлифовальная (предварительная)	Шлифовать поверхность под подшипник		3227
030	Круглошлифовальная предварительная	Шлифование наружных поверхностей и торцев		3А153
035	Внутришлифовальная чистовая	Шлифовать поверхность под подшипник		3227
040	Круглошлифовальная чистовая	Шлифование наружных поверхностей и торцев		3А153
045	Слесарная	Притупить острые кромки		Верстак слесарный
050	Моечная	Промывка детали		Моечная машина
055	Контрольная			стол БТК
060	Нанесение покрытий		Оцинковка	

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мегера Ю.А., Гасюк Д.П., Меженев А.В. Адаптация системы технического обслуживания и ремонта к системе комплексного сервисного обслуживания // В сборнике: Проблемы технического обеспечения войск в современных условиях: Труды II межвузовской научно-практической конференции. 2017. С. 318-322.
2. Мегера Ю.А., Гасюк Д.П., Бурлаков А.А. Анализ взаимодействия системы технического обслуживания и ремонта вооружения и военной техники с оборонно-промышленным комплексом // В сборнике: Проблемы технического обеспечения войск в современных условиях. Труды II межвузовской научно-практической конференции. 2017. С. 314-317.
3. Анухин, В.И. Допуски и посадки. Выбор и расчёт, указание на чертежах: Учебное пособие. 6-е изд., перераб. и доп. СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2018. 304 с.
4. С.А. Любомудров [и др.] Метрология, стандартизация и сертификация. Учебник. СПб. Издательство Политехн. ун-та. 2016.
5. Технология машиностроения. Часть I: Учеб.пособие/ Э.Л. Жуков, И.И. Козарь, Б.Я. Розовский, В.В. Дегтярев, А.М. Соловейчик; Под ред. С.Л. Мурашкина. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2005. 190 с.
6. Технология машиностроения. Часть II: Проектирование технологических процессов: Учеб.пособие/ Э.Л. Жуков, И.И. Козарь, Б.Я. Розовский, В.В. Дегтярев, А.М. Соловейчик; Под ред. С.Л. Мурашкина. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2008. 498 с.

О.А. Лапшина, Д.Д. Брусова, И.И. Козарь, Д.Н. Шабалин  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Санкт-Петербург, Россия, [oa.lapshina98@gmail.com](mailto:oa.lapshina98@gmail.com)

## МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПРИСПОСОБЛЕНИЯ ДЛЯ ФРЕЗЕРОВАНИЯ

### Аннотация

В работе рассмотрена разработка установочного-зажимного механизированного приспособления при выполнении фрезерной операции для корпусной детали.

Результатом работы стало проектирование установочных элементов, зажимного механизма и силового привода.

*Ключевые слова:* приспособление, сила зажима, сила резания, базирование, силовой привод.

### Введение

Использование приспособлений способствует повышению производительности и точности обработки, сборки и контроля, облегчению условий труда рабочих, строгой регламентации длительности выполняемых операций, расширению технологических возможностей оборудования, повышению безопасности работы и исключению аварий [1, 2].

### Методы

Для достижения поставленной цели использовали современные САПР программы.

Выбор технологических баз на первой операции основан на решении следующих проблем [3 - 7]:

Схема базирования выбиралась, основываясь на:

- класс детали, к которому относится данная деталь;
- выборе типовой схемы базирования.

Так как необходимо профрезеровать основную плоскость, возможно базироваться только на необрабатываемые поверхности: плоскость параллельно обрабатываемой и две боковые плоскости

Эскизы детали «Кронштейн» и «Корпус подшипника» представлен на рисунке 1.

Учитывая тип производства, габариты заготовки был выбран вертикальный консольно-фрезерный станок 6Т13.

При обработке необходимо:

1. Обеспечить заданное положение заготовки с помощью установочных элементов.

2. Обеспечить постоянство положения заготовки относительно установочных элементов за счет применения зажимного механизма.

3. Обеспечить необходимую силу зажима силовым приводом.

Для установки заготовки по плоским базам используем штыри со сферической головкой, которые предназначены для заготовок с необработанными базами.

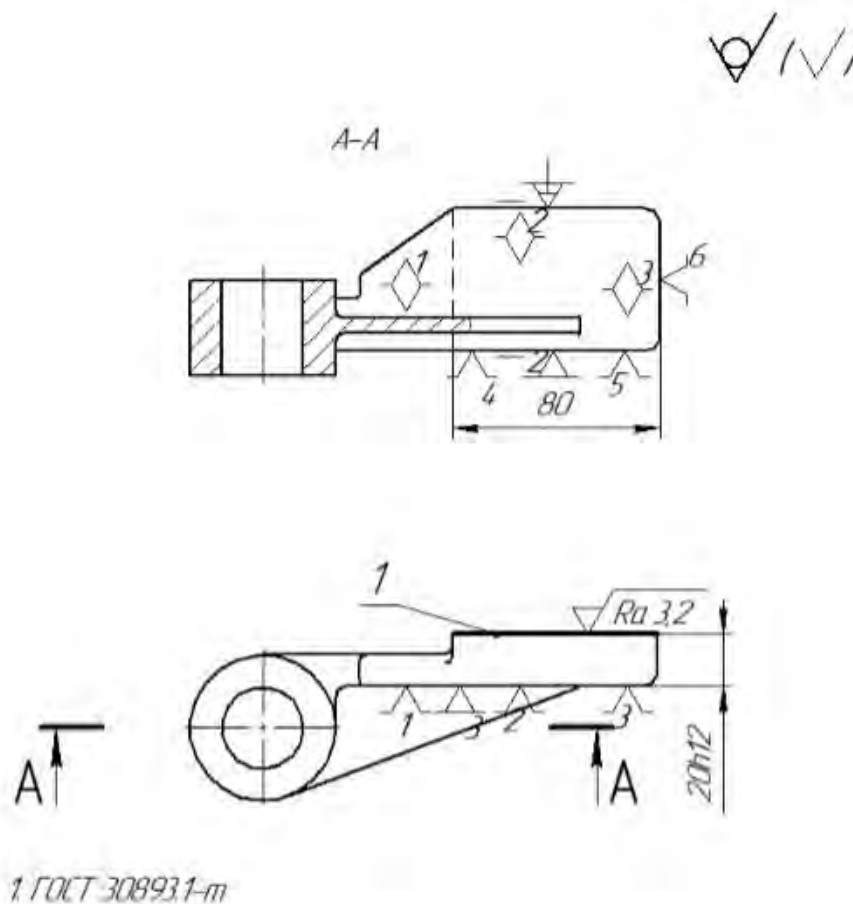


Рисунок 1 – Эскиз детали «Кронштейн»

Эскиз деталей с реализованной схемой базирования представлен на рисунке 3 соответственно.

При расчете силы зажимы необходимо рассчитать силы резания.

Определим силу резания [8, с. 291]:

Главная составляющая силы резания при фрезеровании – осевая сила.

$$P_z = \frac{10C_p \cdot s_z^y \cdot t^x \cdot B^u \cdot z \cdot K_{mp}}{D^q \cdot n^w} \quad (1)$$

где:  $t = 5,2$  мм – припуск,  $s_z = 0,14$  мм/зуб – подача на зуб,  $B = 50$  мм – ширина обработки,  $z = 8$  – число зубьев,  $D = 80$  мм – диаметр фрезы,  $n$  – частота вращения,  $C_p, K_{mp}, y, q, x, u, w$  – коэффициенты.

$$P_z = \frac{10 \cdot 54,5 \cdot 0,14^{0,74} \cdot 5,2^{0,9} \cdot 50^1 \cdot 8 \cdot 0,89}{80^{1,15} \cdot 630^0} = 1294 \text{ Н}$$

Определение сил  $P_x$  и  $P_y$ :

$$P_y = P_z \cdot 0,3 = 1294 \cdot 0,3 = 388,2 \text{ Н}$$

$$P_x = P_z \cdot 0,5 = 1294 \cdot 0,5 = 647 \text{ Н}$$

Мощность  $N$  фрезерования [9, с. 290]:

$$N = \frac{P_z \cdot v}{1020 \cdot 60} = \frac{1294 \cdot 158}{1020 \cdot 60} = 3,34 \text{ кВт}$$

Силу зажима необходимо определять так, чтобы заготовка не провернулась и не переместилась.

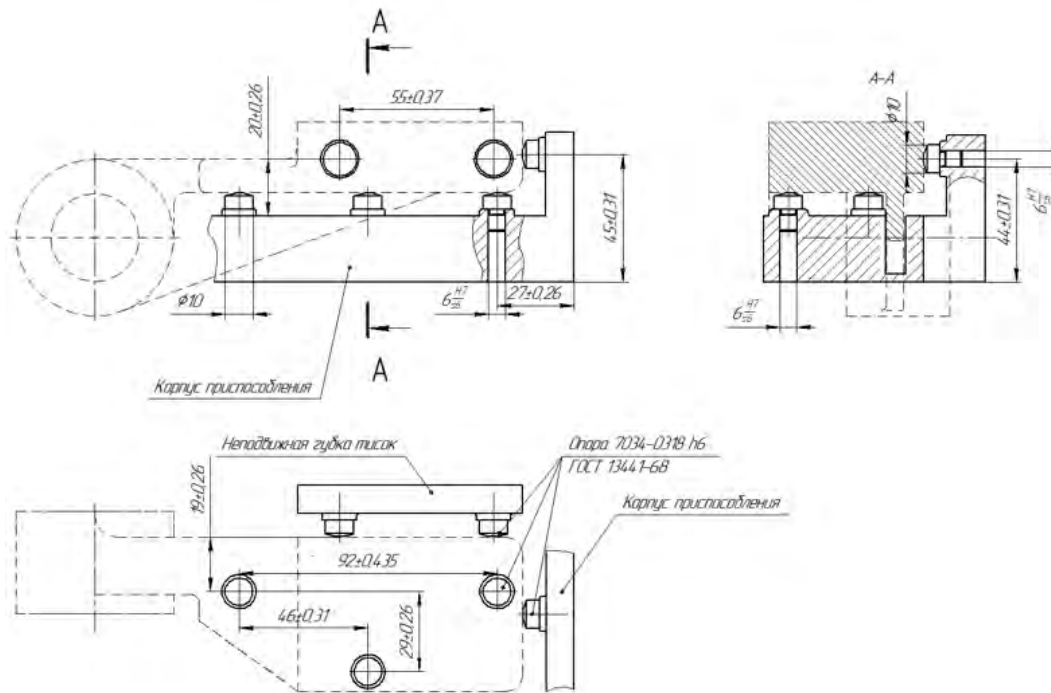


Рисунок 2 – Реализация схемы базирования детали «Кронштейн»

1 уравнение – уравнение сдвига, т. к. сила  $P_z$  противоположна по направлению силе зажима  $W$ .

$$P_z \cdot K \leq W \quad (2)$$

где:  $K$ -коэффициент запаса

2 уравнение – уравнение сдвига, сила  $P_y$  направлена перпендикулярно силе зажима  $W$  – уравновешивание происходит за счет сил трения  $Wf_1$  – сила трения зажима об заготовку и  $Wf_2$  – установочных элементов относительно заготовки.

$$P_y \cdot K \leq W(f_1 + f_2) \quad (3)$$

где:  $f_1$  – коэффициент трения между зажимом и заготовкой,  $f_2$  – коэффициент трение между установочными элементами и заготовкой.

3 уравнение – уравнение опрокидывания, сила  $P_z$  способна опрокинуть заготовку относительно правой опоры, рассмотрен самый неблагоприятный случай с максимально возможным плечом.

$$P_z \cdot K \cdot L \leq W \cdot a \quad (4)$$



где:  $L$  – расстояние от силы  $Pz$  до правой опоры;  $a$  – расстояние от силы зажима до правой опоры.

Из трех уравнений необходимо найти силу зажима и принять наибольшую из них. Принимаем максимальную силу зажима:

$$W = 11128 \text{ Н}$$

Схема для расчета привода и компоновка механизма закрепления показаны на рисунке 3.

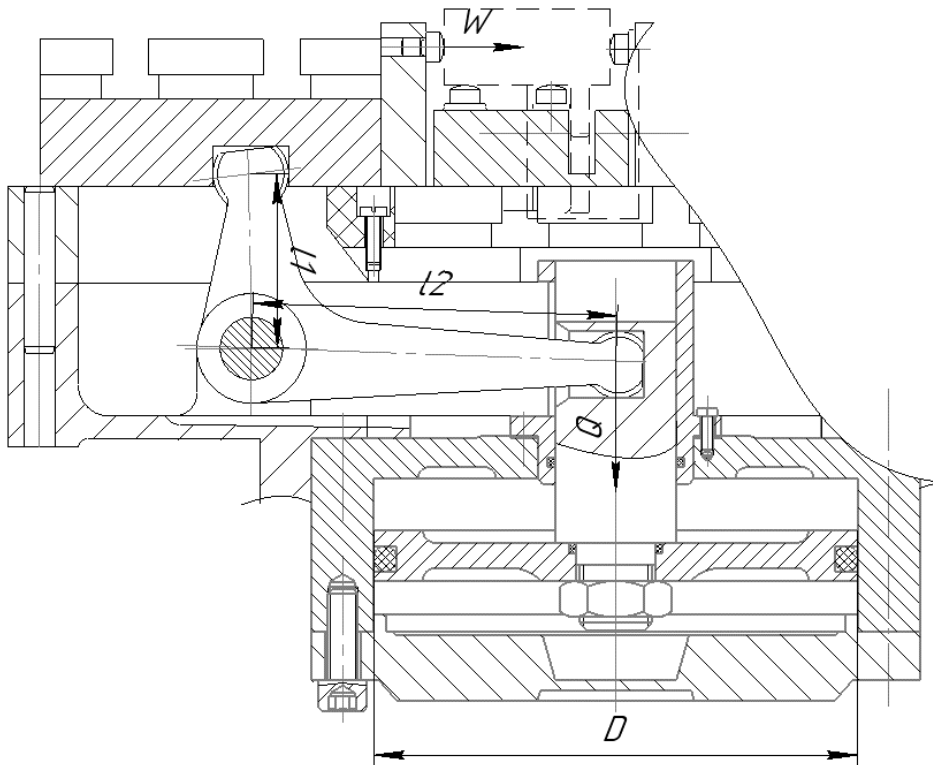


Рисунок 3 – Схема для расчета силы привода

Исходя из равновесия системы, представленной на рисунке 4, получим

$$Ql_2 = Wl_1 \quad (5)$$

где  $l_1, l_2$  – длина плеч рычага, обеспечивающего связь подвижной губки тисков со штоком пневмоцилиндра,  $Q$ – сила, которую необходимо создать на штоке.

С учетом потерь в реальном механизме

$$Q = W \frac{l_1}{l_2} K_1 K_2 = 11128 \cdot 0.5 \cdot 1.11 \cdot 1.2 = 7411.25 \text{ Н}$$

где  $K_1$  – потери на трение между рычагом и осью, принимаем  $K_1 = 1.11$ ;  $K_2$  – потери на трение подвижной губки в направляющих, принимаем  $K_2 = 1.2$ .

Сила  $Q$  обеспечивается пневмоцилиндром, встроенным в тиски. Диаметр пневмоцилиндра тянущего типа находим из зависимости:

$$Q = \frac{\pi(D^2 - d^2)}{4} P \eta \quad (6)$$

где  $D$  – диаметр пневмоцилиндра;  $d$  – диаметр штока пневмоцилиндра, принимаем  $d = \frac{1}{3}D$ ;  $P$  – давление воздуха в пневмосистеме,  $P = 0.63$  Мпа;  $\eta$  – коэффициент полезного действия пневмопривода, принимаем  $\eta = 0,8$ .

$$D = \sqrt{\frac{3W}{2P\eta}} = \sqrt{\frac{9 \cdot 7411.25}{2 \cdot 3,14 \cdot 0,63 \cdot 0,8}} = 145.5 \text{ мм}$$

Выбираем ближайшее большее значение диаметра стандартного цилиндра по ГОСТ 15608-70.

$$D_{\text{ц}} = 160 \text{ мм}$$

Тогда диаметр штока:

$$D_{\text{ш}} = 40 \text{ мм}$$

Эскиз приспособления представлен на рисунке 4.

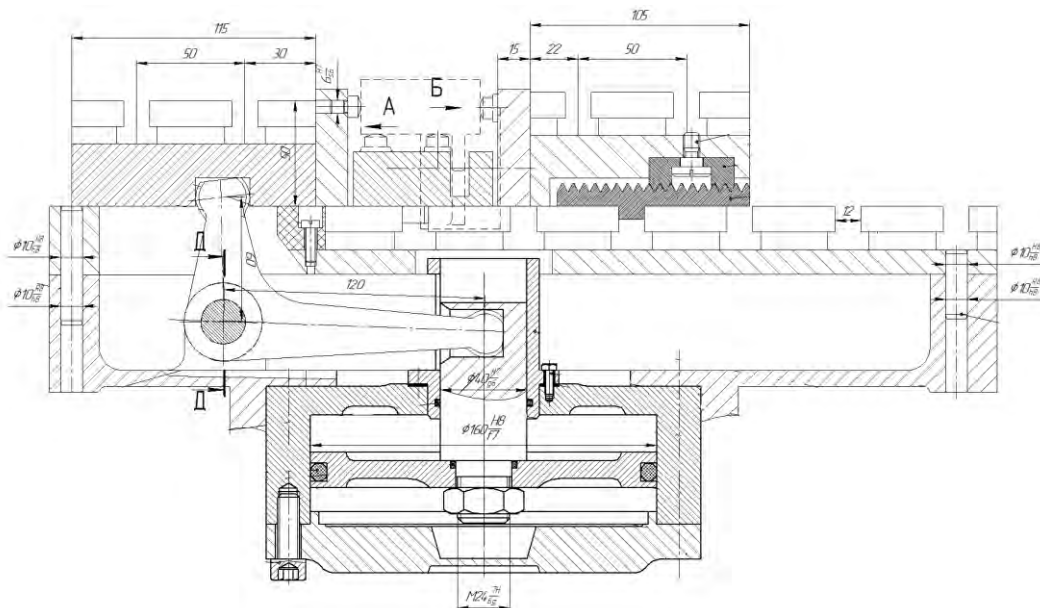


Рисунок 4 – Эскиз установочно-зажимного приспособления.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мегера Ю.А., Гасюк Д.П., Меженев А.В. Адаптация системы технического обслуживания и ремонта к системе комплексного сервисного обслуживания // В сборнике: Проблемы технического обеспечения войск в современных условиях: Труды II межвузовской научно-практической конференции. 2017. С. 318-322.
2. Мегера Ю.А., Гасюк Д.П., Бурлаков А.А. Анализ взаимодействия системы технического обслуживания и ремонта вооружения и военной техники с оборонно-промышленным комплексом // В сборнике: Проблемы технического обеспечения

войск в современных условиях. Труды II межвузовской научно-практической конференции. 2017. С. 314-317.

3. Федотова А.М., Гасюк Д.П. Анализ рисков возникновения проблем с качеством технологической подготовки производства и разработка мероприятий по их снижению в условиях АО "НИИЭФА" // Металлообработка. 2021. № 1 (121). С. 50-54.

4. Косова В.А., Гасюк Д.П. К вопросу анализа условий разработки технологических процессов машиностроительных предприятий // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2021. № 2. С. 655-658.

5. Касяненко Е.О., Гасюк Д.П. Применение процессного подхода для оптимальной работы предприятия // В сборнике: Неделя науки СПбПУ: материалы научной конференции с международным участием. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. 2016. С. 26-29.

6. Сауренко Т.Н., Анисимов Е.Г., Родионова Е.С. Методика оценки ожидаемой стоимости проектирования технических и технологических инноваций // Управленческое консультирование. 2019. № 11 (131). С. 120-128.

7. Технология машиностроения. Часть II: Учеб. Пособие / Э.Л. Жуков, И.И. Козарь, Б.Я. Розовский, В.В. Дягтерев, А.М. Соловейчик; Под ред. С.Л. Мурашкина. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2008, 498 с.

8. Справочник технолога – машиностроителя. Т2/ под редакцией А.Г. Косиловой и Р.К. Мещерякова, М.: Машиностроение, 1986.

9. Справочник конструктора-машиностроения: в 3-х т. / Анурьев В.И.- 9-е изд., перераб. И доп./ под ред И.Н. Жестковой. – М.: Машиностроение, 2006.

Н.В. Пастарнак, И.И. Козарь, Д.Н. Шабалин  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Санкт-Петербург, Россия, [pasfarnak@gmail.com](mailto:pasfarnak@gmail.com)

## **ПРОЕКТИРОВАНИЕ УСТАНОВОЧНО-ЗАЖИМНОГО ПРИСПОСОБЛЕНИЯ ДЛЯ ФРЕЗЕРНОЙ ОПЕРАЦИИ**

### **Аннотация**

В работе рассмотрена разработка установочного-зажимного механизированного приспособления при выполнении фрезерной операции для корпусной детали.

Результатом работы стало проектирование установочных элементов, зажимного механизма и силового привода.

*Ключевые слова:* приспособление, сила зажима, сила резания, базирование, силовой привод.

### **Введение**

Использование приспособлений способствует повышению производительности и точности обработки, сборки и контроля, облегчению условий труда рабочих, строгой регламентации длительности выполняемых операций, расширению технологических возможностей оборудования, повышению безопасности работы и исключению аварий [1, 2].

### **Методы**

Для достижения поставленной цели использовали современные САПР программы.

Выбор технологических баз на первой операции основан на решении следующих проблем [3 - 7]:

Схема базирования выбиралась, основываясь на:

- класс детали, к которому относится данная деталь;
- выборе типовой схемы базирования.

Так как необходимо профрезеровать лыску «8» с одной стороны, возможно базироваться только на обработанные поверхности: плоскость перпендикулярно обрабатываемой и два отверстия.

Эскизы детали «Крышка» представлен на рис. 1.

Учитывая тип производства и габариты заготовки был выбран вертикальный консольно-фрезерный станок 6М12П.

При обработке необходимо:

1. Обеспечить заданное положение заготовки с помощью установочных элементов.
2. Обеспечить постоянство положения заготовки относительно установочных элементов за счет применения зажимного механизма.
3. Обеспечить необходимую силу зажима силовым приводом.

Для установки заготовки по плоским базам используем штыри с плоской головкой, которые предназначены для заготовок с обработанными базами. Для

установки заготовки по двум отверстиям используем цилиндрический и срезанный пальцы.

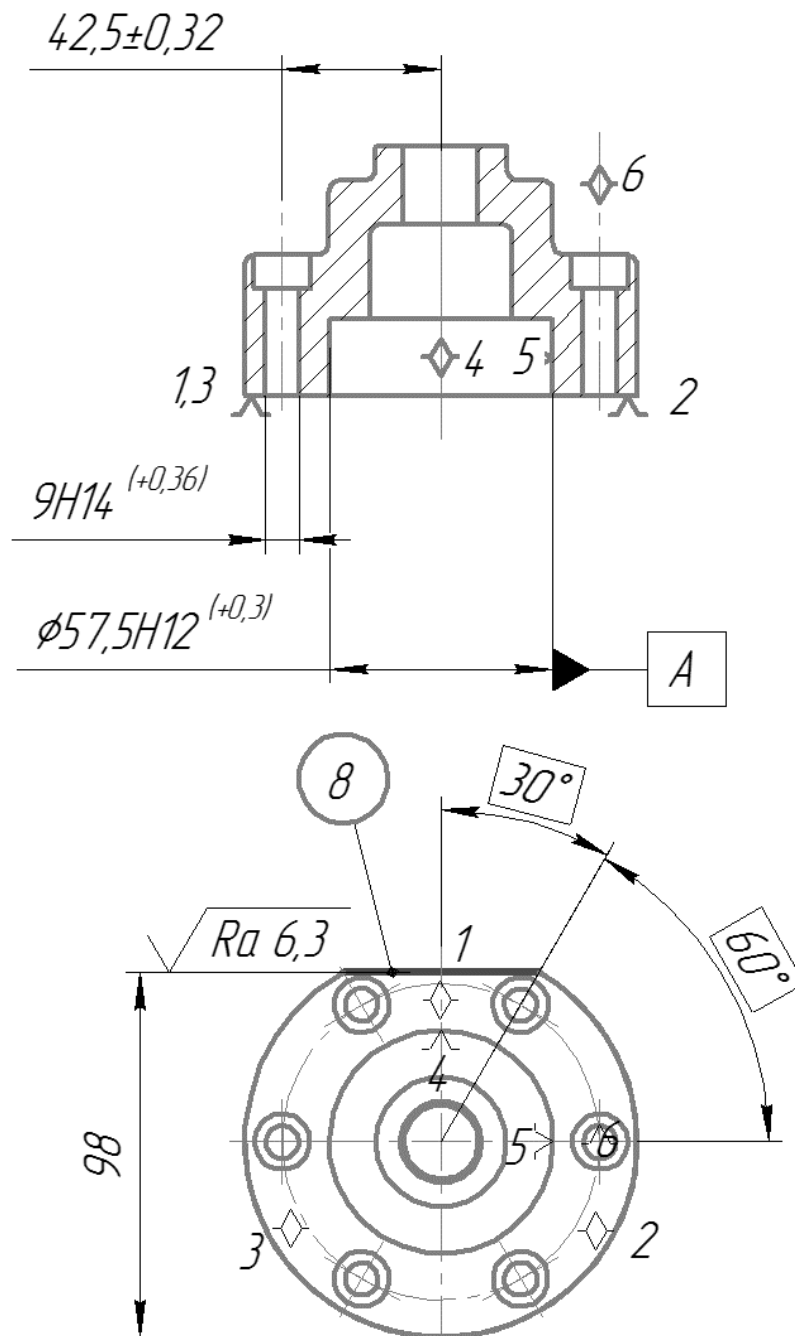


Рисунок 3 — Эскиз детали «Крышка» на фрезерной операции

При расчете силы зажимы необходимо рассчитать силы резания.

Определим силу резания [8, с. 291]:

Главная составляющая силы резания при фрезеровании — осевая сила:

$$P_z = \frac{10C_p \cdot s_z^y \cdot t^x \cdot B^u \cdot z \cdot K_{mp}}{D^q \cdot n^w} \quad (1)$$

где:  $t = 7$  мм — припуск,  $s_z = 0,1$  мм/зуб — подача на зуб,  $B = 38$  мм — ширина обработки,  $z = 6$  — число зубьев,  $D = 40$  мм — диаметр фрезы,  $n$  — частота вращения,  $C_p, K_{mp}, y, q, x, u, w$  — коэффициенты.

$$P_z = \frac{10 \cdot 58 \cdot 7^{0,9} \cdot 0,1^{0,8} \cdot 38^1 \cdot 6 \cdot 0,89}{40^{0,9} \cdot 795^0} = 3886 \text{ Н}$$

Определение сил  $P_x$  и  $P_y$ :

$$P_y = P_z \cdot 0,7 = 3886 \cdot 0,7 = 2720 \text{ Н} \quad (2)$$

$$P_x = P_z \cdot 0,5 = 3886 \cdot 0,5 = 1943 \text{ Н} \quad (3)$$

Мощность  $N$  фрезерования [9, с. 290]:

$$N = \frac{P_z \cdot v}{1020 \cdot 60} = \frac{3886 \cdot 100}{1020 \cdot 60} = 6,35 \text{ кВт} \quad (4)$$

Силу зажима необходимо определять так, чтобы заготовка не провернулась и не переместилась. Сила зажима  $W$  направлена перпендикулярно  $P_z$ .

1 уравнение учитывает возможность поворота заготовки вокруг своей оси из-за возникающего момента двух составляющих силы  $P_z$  —  $P_h$  и  $P_v$ .

$$P_h \cdot l_2 \cdot K + P_v \cdot l_1 \cdot K - W \cdot f \cdot d - W \cdot f \frac{2(R^2^3 - r^2^3)}{3(R^2^2 - r^2^2)} \leq 0 \quad (5)$$

где:  $K$  — коэффициент запаса

2 уравнение учитывает возможность сдвига заготовки силой  $P_v$ .

$$P_v \cdot K - 3(W \cdot f) + W \cdot f \leq 0 \quad (6)$$

3 уравнение учитывает возможность сдвига заготовки силой  $P_h$ .

$$P_h \cdot K - 3(W \cdot f) + W \cdot f \leq 0 \quad (7)$$

где:  $f$  — коэффициент трения между зажимом и заготовкой и между установочными элементами и заготовкой.

Из трех уравнений необходимо найти силу зажима и принять наибольшую из них. Принимаем максимальную силу зажима:

$$W = 19862 \text{ Н}$$

Схема для расчета привода и компоновка механизма закрепления показаны на рис 2.

При расчете усилия  $Q$  для данной рычажной схемы, используется равенство:

$$Q \cdot A \cdot \eta = W \cdot B \quad (8)$$

где  $A$ ,  $B$  — длина плеч рычага, обеспечивающего связь пяты со штоком гидроцилиндра,  $Q$  — сила, которую необходимо создать на штоке,  $\eta$  коэффициент полезного действия, учитывающий потери на трение.

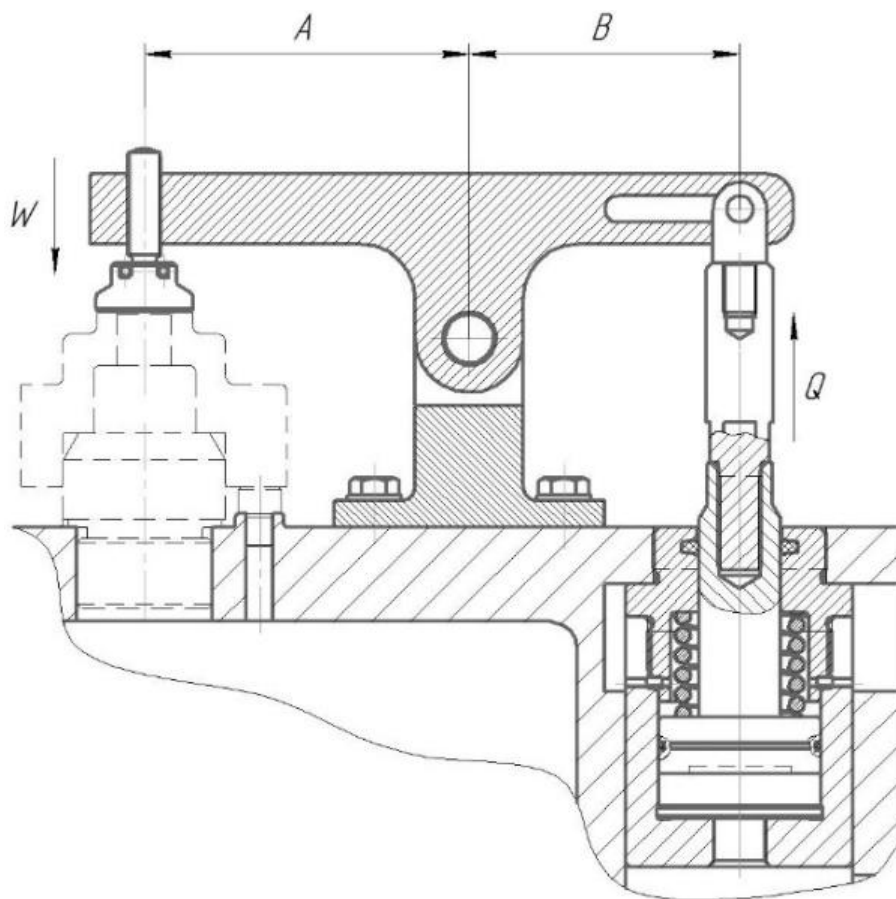


Рисунок 2 — Схема для расчета силы привода

С учетом потерь в реальном механизме:

$$Q = \frac{W \cdot B}{A \cdot \eta} = \frac{19862 \cdot 120}{100 \cdot 0.96} = 24827H$$

Исходя из величины необходимого усилия, рассчитаем диаметр поршня гидроцилиндра:

$$Q = \Delta Pr \cdot \frac{\pi \cdot D_{\Gamma}^2}{4} \eta r \quad (9)$$

где  $D_{\Gamma}$  — диаметр гидроцилиндра;  $\Delta Pr$  — давление жидкости в гидросистеме,  $P=10$  Мпа;  $\eta r$  — коэффициент полезного действия гидропривода, принимаем  $\eta r = 0,9$ .

$$D_{\Gamma} = \sqrt{\frac{Q \cdot 4}{\pi \cdot \eta r \cdot \Delta Pr}} = \Gamma = \sqrt{\frac{24827 \cdot 4}{\pi \cdot 0.9 \cdot 10}} = 61,621 \text{ мм.}$$

Выбираем диаметр стандартного цилиндра по ГОСТ 6540–68.

$$D_{\Gamma} = 63\text{мм};$$

Эскиз приспособления представлен на рис 3.

На рис. 4 представлена модель установочно-зажимного приспособления.

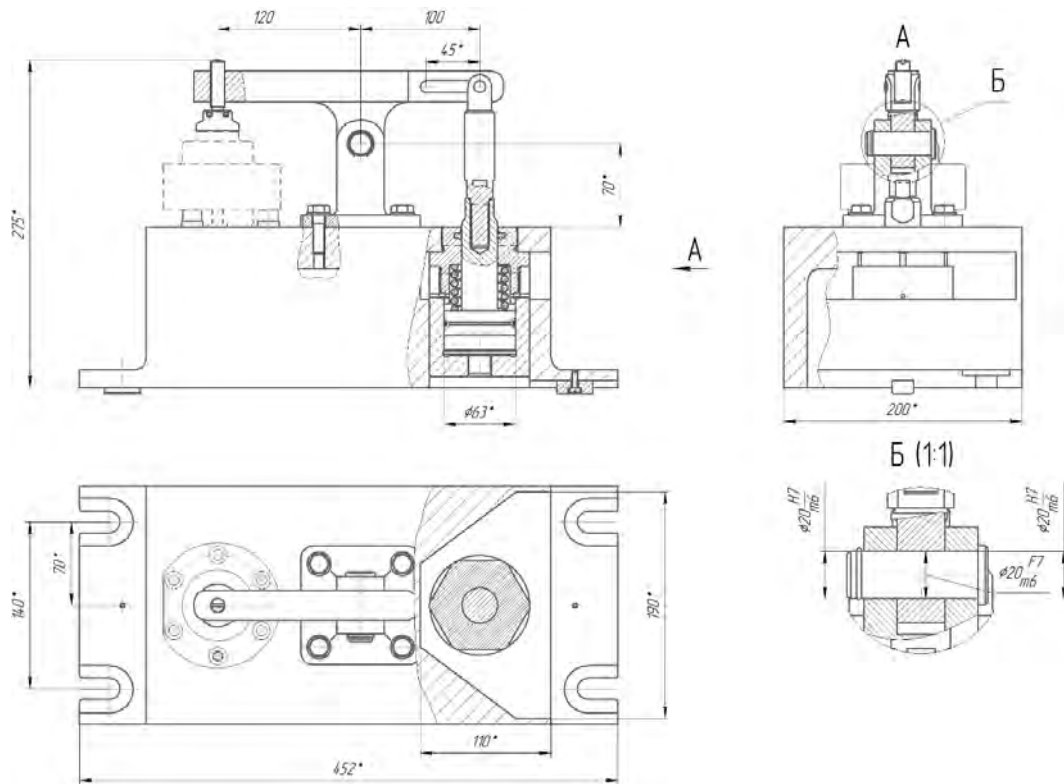


Рисунок 3 — Эскиз установочно-зажимного приспособления

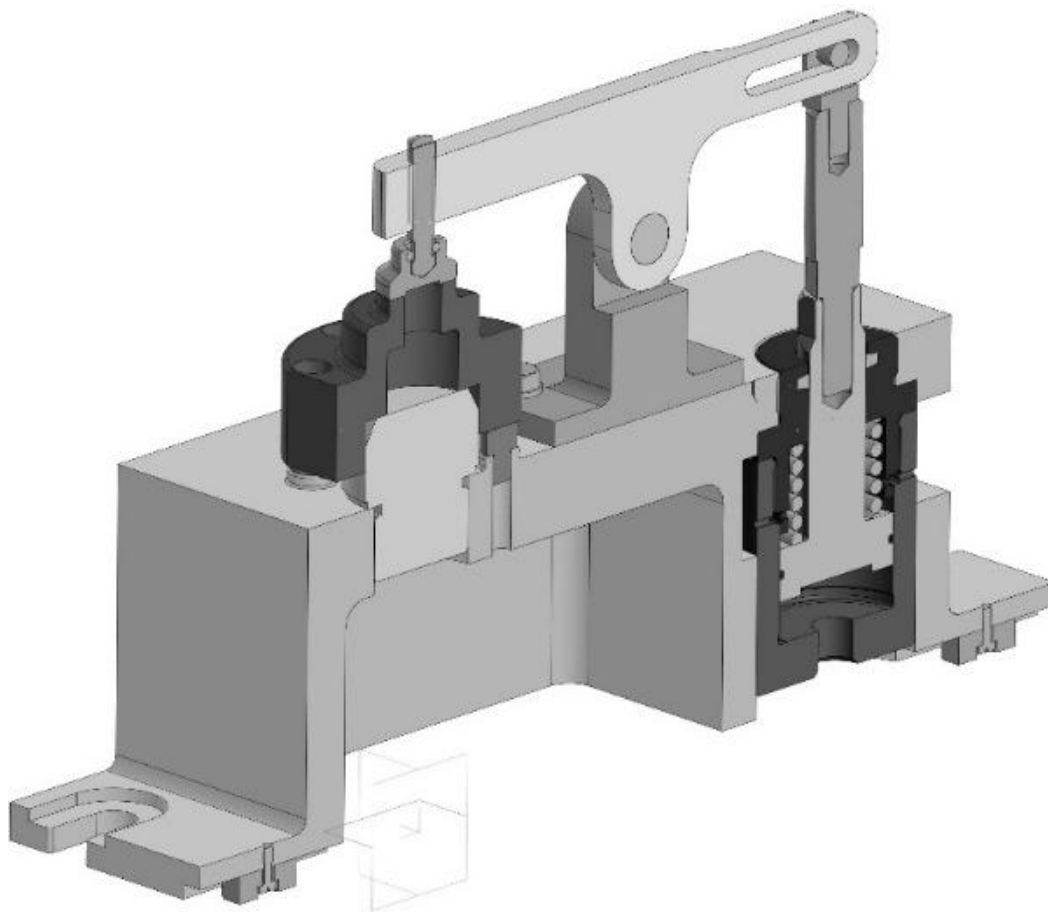


Рисунок 4 — Модель установочно-зажимного приспособления



## Заключение

Разработанная и представленная в данной работе конструкция установочно-зажимного приспособления может быть использована для упрощенного закрепления и фрезерования подобных деталей на настроенных станках фрезерной группы.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мегера Ю.А., Гасюк Д.П., Меженев А.В. Адаптация системы технического обслуживания и ремонта к системе комплексного сервисного обслуживания // В сборнике: Проблемы технического обеспечения войск в современных условиях: Труды II межвузовской научно-практической конференции. 2017. С. 318-322.
2. Мегера Ю.А., Гасюк Д.П., Бурлаков А.А. Анализ взаимодействия системы технического обслуживания и ремонта вооружения и военной техники с оборонно-промышленным комплексом // В сборнике: Проблемы технического обеспечения войск в современных условиях. Труды II межвузовской научно-практической конференции. 2017. С. 314-317.
3. Федотова А.М., Гасюк Д.П. Анализ рисков возникновения проблем с качеством технологической подготовки производства и разработка мероприятий по их снижению в условиях АО "НИИЭФА" // Металлообработка. 2021. № 1 (121). С. 50-54.
4. Косова В.А., Гасюк Д.П. К вопросу анализа условий разработки технологических процессов машиностроительных предприятий // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2021. № 2. С. 655-658.
5. Технология машиностроения. Часть II: Учеб. Пособие / Э.Л. Жуков, И.И. Козарь, Б.Я. Розовский, В.В. Дягтерев, А.М. Соловейчик; Под ред. С.Л. Мурашкина. - СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2008. - 498 с.
6. Сауренко Т.Н., Анисимов Е.Г., Родионова Е.С. Методика оценки ожидаемой стоимости проектирования технических и технологических инноваций // Управленческое консультирование. 2019. № 11 (131). С. 120-128.
7. Касяненко Е.О., Гасюк Д.П. Применение процессного подхода для оптимальной работы предприятия // В сборнике: Неделя науки СПбПУ: Материалы научной конференции с международным участием. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. 2016. С. 26-29.
8. Справочник технолога-машиностроителя. Т.2. / под редакцией А.Г. Косиловой и Р.К. Мещерякова. - М.: Машиностроение, 1986.
9. Справочник конструктора-машиностроения: в 3-х. т. / Ануриев В.И.- 9-е изд., перераб. И доп./ под ред И. Н. Жестковой. – М.: Машиностроение, 2006.

Н.А. Беликова, И.И. Козарь, Д.Н. Шабалин  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Санкт-Петербург, Россия, nata.bel.0311@yandex.ru

## **РАСЧЕТ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ ОТДЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ УСТАНОВОЧНО-ЗАЖИМНОГО ПРИСПОСОБЛЕНИЯ ДЛЯ ФРЕЗЕРНОЙ ОПЕРАЦИИ**

### **Аннотация**

В данной работе рассматривается проектирование станочной технологической оснастки для фрезерной операции. Основной целью работы является реализация схем базирования заготовки на этапе фрезерной обработки, а также надежное закрепление заготовки во время обработки.

Для достижения поставленной цели было разработано установочно-зажимное приспособление, а также произведен расчет необходимой силы зажима для удержания заготовки.

В результате работы спроектирован силовой привод, обеспечивающий необходимую силу зажима.

*Ключевые слова:* установочно-зажимное приспособление, станочная технологическая оснастка, технология машиностроения, базирование.

### **Введение**

В настоящее время распространяется применение приспособлений для универсальных станков с целью расширения их технологической возможности. К таким приспособлениям относятся установочно-зажимные механизмы, которые служат для реализации схемы базирования, определения положения заготовки относительно станка и режущего инструмента, а также закрепления заготовки в процессе механической обработки.

Стоит отметить, что применение правильно подобранного станочного приспособления на производстве повышает производительность и точность обработки, а также сокращает возникновение аварийных ситуаций [1 - 11].

### **Методы**

Для достижения поставленной цели будут спроектированы элементы станочного приспособления с использованием САПР программы КОМПАС-3D.

### **Результаты и обсуждение**

Разработка приспособления производится для выполнения вертикально-фрезерной операции — фрезерование на станке 6P11 кулачкового венца заготовки с помощью концевой фрезы 2220-0118 T15K6 ГОСТ 17025-71. Назначенные для данной операции режимы резания: скорость резания  $v=140$  м/мин; подача  $s=0,15$  мм/зуб, снимаемый припуск  $t=2$  мм, частота вращения шпинделя с инструментом  $n=1600$  об/мин.

Проектирование установочно-зажимного механизма начинается с соблюдения схемы базирования заготовки, показанной на операционном эскизе (рисунок 1). Реализация схем базирования достигается с помощью установочных элементов. В

данном случае, при фрезеровании плоскостей кулачкового венца, заготовка базируется на плоскость и лишается трех степеней свободы, базирование на отверстие лишает заготовку двух степеней свободы.

Таким образом, исходя из заданной схемы базирования и размеров заготовки, в качестве установочных элементов берется палец установочный постоянный 7030-0931 ГОСТ 12209-66 и установочная шайба 7034-0556 ГОСТ 17777-72.

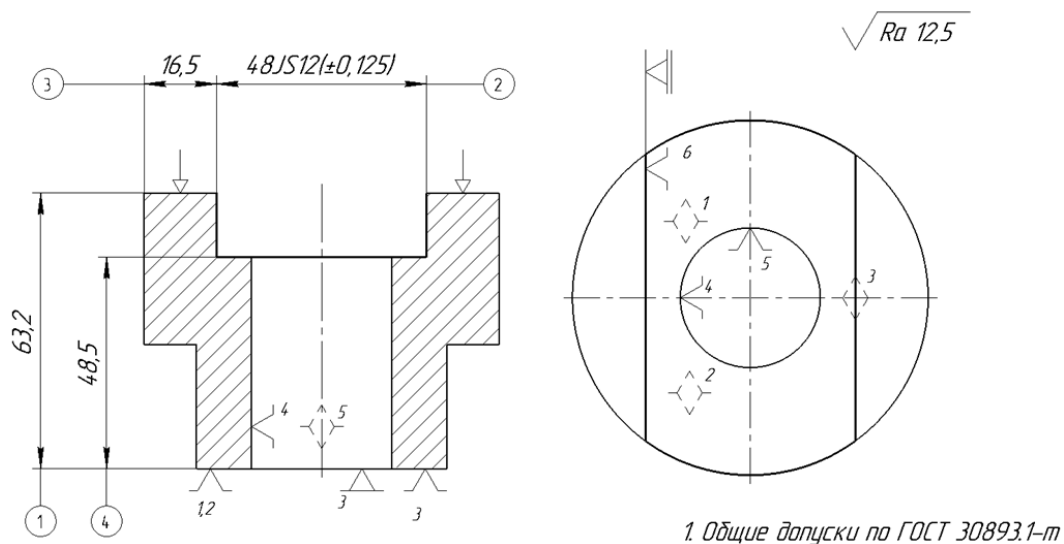


Рисунок 1 – Операционный эскиз вертикально-фрезерной операции

Схема установочных элементов представлена на рисунке 2.

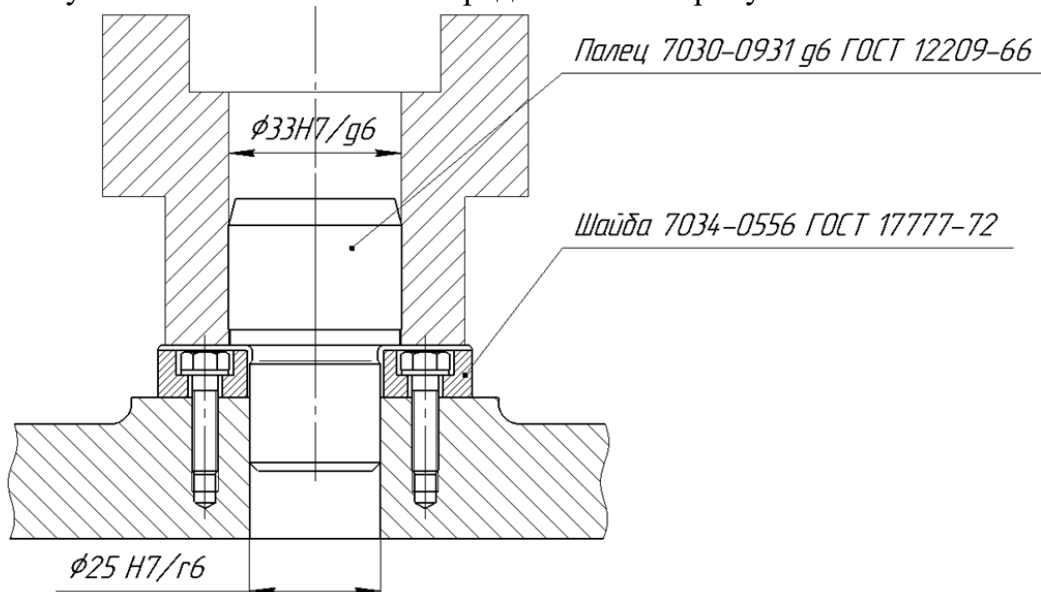


Рисунок 2 – Установочные элементы

Для дальнейшего проектирования приспособления необходимо произвести силовой расчет, заключающийся в расчете сил, действующих на заготовку, расчете силы закрепления, расчете силы на входе зажимного механизма.

В процессе обработки на заготовку действуют силы резания. Главная составляющая силы резания при фрезеровании – осевая сила, определяется по формуле 1:

$$P_z = \frac{10 \cdot C_p \cdot t^x \cdot S_z^y \cdot B^u \cdot z}{D^q \cdot n^w} \quad (1)$$

где  $B = 15$  мм – ширина обработки,  
 $z = 6$  – число зубьев концевой фрезы,  
 $D = 28$  мм – диаметр фрезы,  
 $C_p, K_{mp}, y, q, x, u, w$  – коэффициенты.

Подставив все численные значения, получим:

$$P_z = \frac{10 \cdot C_p \cdot t^x \cdot S_z^y \cdot B^u \cdot z}{D^q \cdot n^w} = \frac{10 \cdot 12,5 \cdot 2^{0,85} \cdot 0,15^{0,75} \cdot 15^1 \cdot 6}{28^{0,73} \cdot 1600^{-0,13}} = 1120 \text{ Н.}$$

Также на заготовку действует сила зажимов, препятствующих опрокидыванию заготовки в процессе ее обработки. В нашем случае заготовка закрепляется с помощью двух прижимов. Согласно схеме зажима (рисунок 3) составим уравнение равновесия 2:

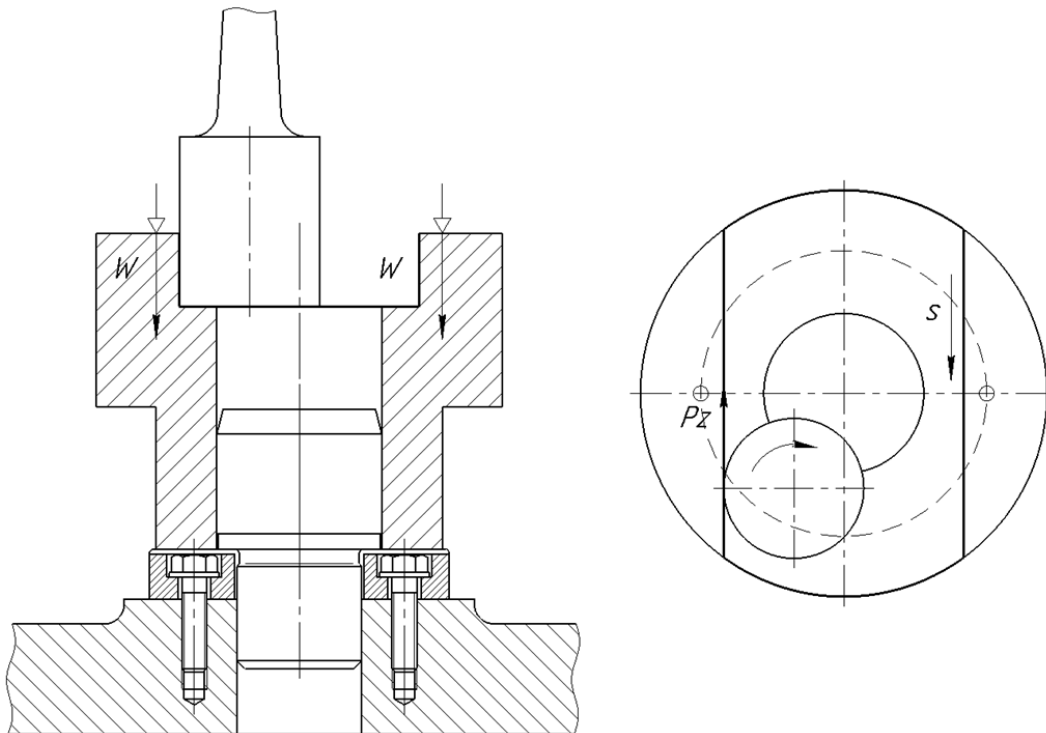


Рисунок 3 – Схема зажима

$$K \cdot P_z - 2W \cdot (f_1 + f_2) = 0, \quad (2)$$

где  $f_1$  – коэффициент трения между заготовкой и установочным элементом,  $f_1 = 0,2$ ;  
 $f_2$  – коэффициент трения между деталью и зажимным механизмом,  $f_2 = 0,16$ ;  
 $K$  – коэффициент запаса, учитывающий нестабильность силовых воздействий на заготовку,  $K = 5,4$ .

Из уравнения равновесия определим силу зажима одного прихвата:

$$W = \frac{k \cdot P_z}{2(f_1 + f_2)} = \frac{5,4 \cdot 1120}{2(0,2 + 0,16)} = 8400 \text{ Н.}$$

Стоит учесть, что при такой схеме зажима возможность опрокидывания заготовки исключается.

Для реализации схемы закрепления будет использован зажимной механизм с Г-образными поворотными прихватами. Схема зажимного механизма представлена на рисунке 4.

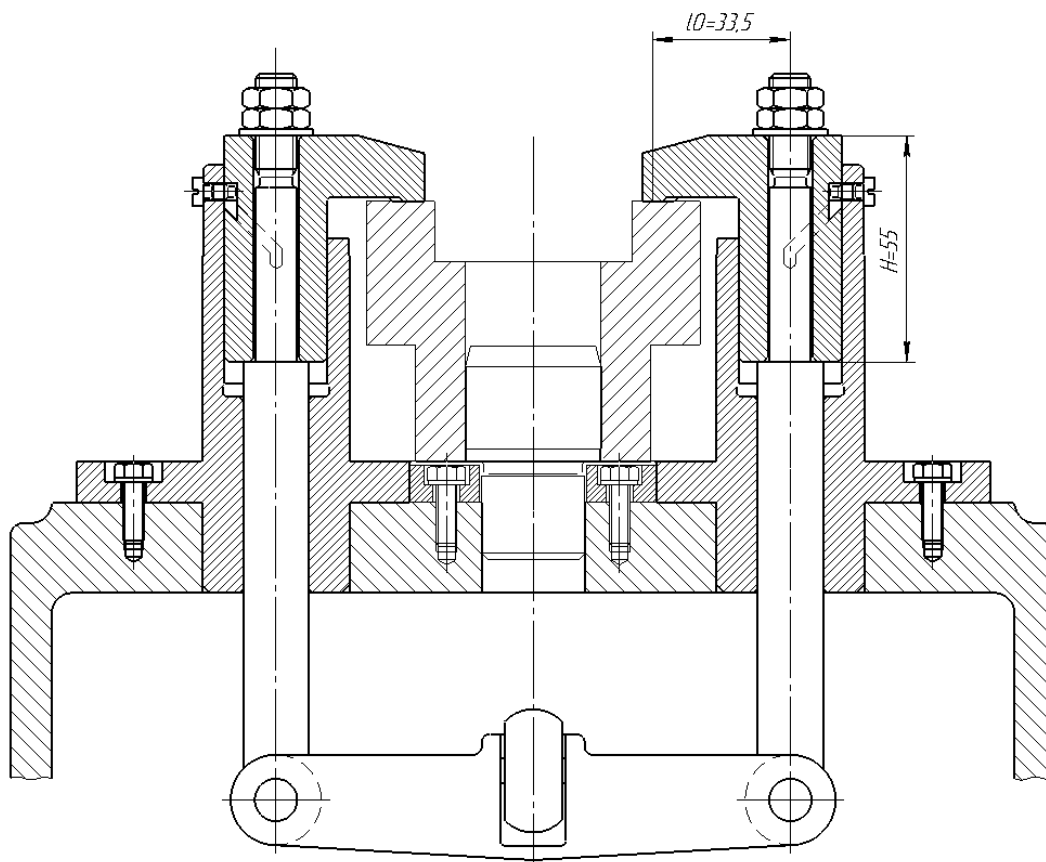


Рисунок 4 – Зажимной механизм

Расчет силового привода заключается в определении входной силы  $Q$  – сила, необходимая для закрепления заготовок с силой  $W$ .

Определение необходимой силы  $Q$  на входе производится исходя из геометрии зажимного приспособления по формуле 3 согласно схеме, представленной на рисунке 4:

$$Q = 2W \cdot \frac{1}{1 - \frac{3l_0}{H} f_2} \cdot (\tan(\alpha + \varphi_{1\text{пр}}) + \tan \varphi_2) \cdot \frac{1}{\mu}, \quad (3)$$

где  $W = 8400$  Н – требуемая сила зажима одного прихвата;

$\alpha = 5^\circ$  – угол скоса клина;

$\tan \varphi_2 = 0,09$  – коэффициент трения на направляющей части клина;

$\varphi_{1\text{пр}} = 0,5\varphi_1 = 2,5^\circ$  – приведённый угол трения на скосе клина (угол трения на скосе клина  $\varphi_1 = 2,5^\circ$ );

$\mu$  – коэффициент, учитывающий потери от трения в шарнирах рычага;

$H = 55$  мм;

$l_0 = 33,5$  мм;

$f_2 = 0,16$  – коэффициент трения в месте контакта заготовки и прихвата.

Подставив имеющиеся численные значения, получим:

$$Q = 2 \cdot 8400 \cdot \frac{1}{1 - \frac{3 \cdot 33,5}{55} \cdot 0,16} \cdot (\tan(5 + 2,5) + 0,09) \cdot \frac{1}{0,97} = 5690 \text{ Н.}$$

Из рассчитанной входной силы рассчитаем диаметр пневмоцилиндра по формуле 4:

$$D_{\text{цил}} = \sqrt{\frac{4Q}{p\eta\pi}}, \quad (4)$$

где  $Q = 5690 \text{ Н}$  – входная сила;

$p = 1 \text{ МПа}$  – давление воздуха внутри пневмоцилиндра;

$\eta = 0,93$  – КПД.

Подставив численные значения, получим:

$$D_{\text{цил}} = 83 \text{ мм.}$$

По ГОСТ 15608-81 определяем ближайшее стандартное значение, равное 80 мм и диаметр штока  $d=25 \text{ мм}$ .

Схема силового привода для вертикально-фрезерной операции представлена на рисунке 5.

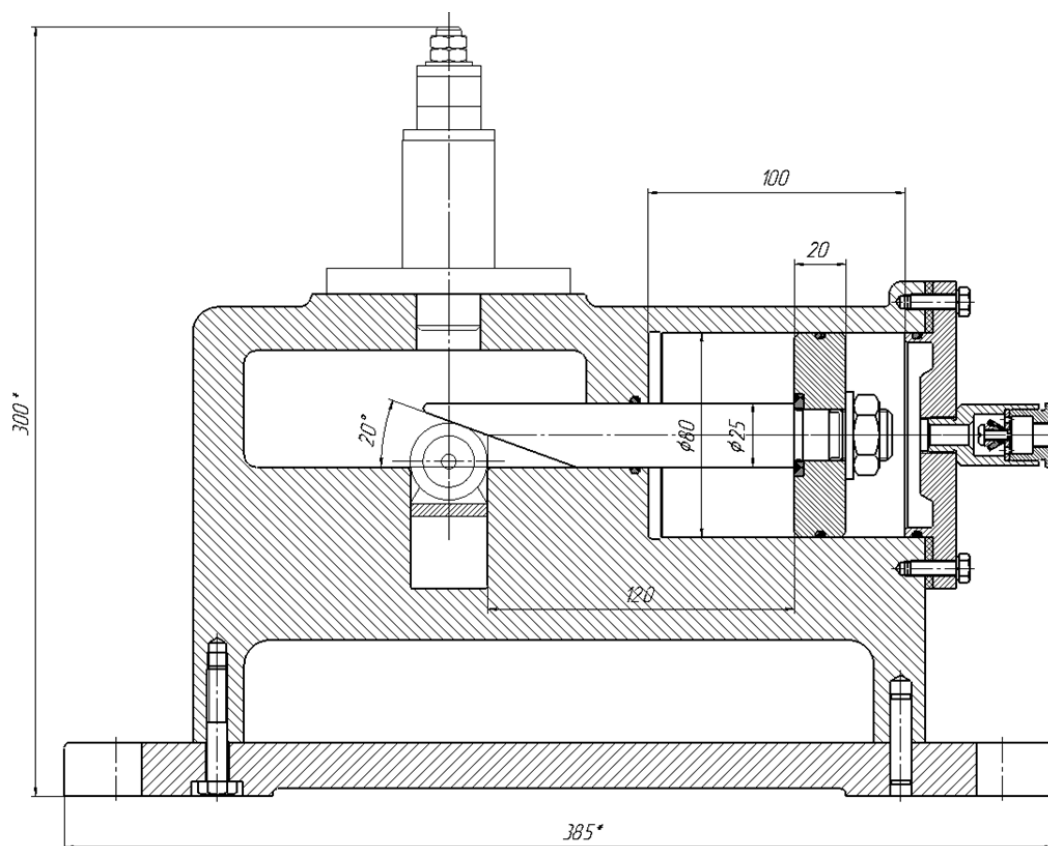


Рисунок 5 – Силовой привод

## Заключение

Спроектированное в данной работе установочно-зажимное приспособление полностью отвечает требуемой схеме базирования и препятствует перемещению заготовки во время обработки.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мегера Ю.А., Гасюк Д.П., Меженев А.В. Адаптация системы технического обслуживания и ремонта к системе комплексного сервисного обслуживания // В сборнике: Проблемы технического обеспечения войск в современных условиях: Труды II межвузовской научно-практической конференции. 2017. С. 318-322.
2. Мегера Ю.А., Гасюк Д.П., Бурлаков А.А. Анализ взаимодействия системы технического обслуживания и ремонта вооружения и военной техники с оборонно-промышленным комплексом // В сборнике: Проблемы технического обеспечения войск в современных условиях. Труды II межвузовской научно-практической конференции. 2017. С. 314-317.
3. Федотова А.М., Гасюк Д.П. Анализ рисков возникновения проблем с качеством технологической подготовки производства и разработка мероприятий по их снижению в условиях АО "НИИЭФА" // Металлообработка. 2021. № 1 (121). С. 50-54.
4. Косова В.А., Гасюк Д.П. К вопросу анализа условий разработки технологических процессов машиностроительных предприятий // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2021. № 2. С. 655-658.
5. Технология машиностроения. Часть II: Учеб. Пособие / Э.Л. Жуков, И.И. Козарь, Б.Я. Розовский, В.В. Дягтерев, А.М. Соловейчик; Под ред. С.Л. Мурашкина. - СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2008. - 498 с.
6. Касяненко Е.О., Гасюк Д.П. Применение процессного подхода для оптимальной работы предприятия // В сборнике: Неделя науки СПбПУ: Материалы научной конференции с международным участием. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. 2016. С. 26-29.
7. Сауренко Т.Н., Анисимов Е.Г., Родионова Е.С. Методика оценки ожидаемой стоимости проектирования технических и технологических инноваций // Управленческое консультирование. 2019. № 11 (131). С. 120-128.
8. Козарь, И. И. Проектирование установочно-зажимных приспособлений: учеб. пособие / И. И. Козарь, Д. Ю. Колодяжный, С. Н. Степанов. - СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2022. - 118 с.
9. Горошкин, В. С. Приспособления для металлорежущих станков: справочник / В. С. Горошкин. - М.: Машиностроение, 1979. - 301 с.
10. Ансеров, М. А., Приспособления для металлорежущих станков. Расчеты и конструкции - Л.: «МАШГИЗ», 1960, 638 с.
11. Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х т. Т. 2/ Под ред. А.Г. Косиловой и Р.К. Мещерякова. - 4-е изд., перераб. и доп. - М.: Машиностроение, 1985. 496 с., ил.

В.М. Кондратьева, М.Д. Головань, К.О. Лобастов, Д.Д. Зинин, С.С. Степанов  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Санкт-Петербург, Россия, [valeria.kon@mail.ru](mailto:valeria.kon@mail.ru)

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПОГРЕШНОСТИ ПОВЕРКИ КОНЦЕВЫХ МЕР ДЛИНЫ НА УСТАНОВКЕ УКМ 100

### Аннотация

В работе рассматриваются вопросы связанные с исследованием погрешности установки для поверки концевых мер длины 3 и 4 разрядов и рабочих классов точности с 1 по 5. Исследования проводились согласно методике МП УКМ100.01 при этом определялись следующие параметры: определение размаха показаний индуктивных преобразователей; определение абсолютной погрешности измерения длины концевых мер; определение абсолютной погрешности при измерении отклонения от плоскопараллельности концевых мер. Проведено сравнение с импортными установками. Сделаны выводы о возможности импортозамещения.

*Ключевые слова:* концевые меры длины, поверка, калибровка, установка, индуктивные датчики.

### Введение

Для настройки ручного измерительного инструмента, штангенциркуля, микрометров, нутромеров и др. используются наборы концевых мер длины. Они изготавливаются с классами точности от 3 до 0, что является наивысшими классами точности. Меры могут не соответствовать необходимой точности при изготовлении, а также, могут изнашиваться при многократном контакте с рабочими поверхностями измерительных инструментов и приборами, и терять первоначальные размеры [1,3]. Данная проблема решается методом периодического контроля мер, но возникает новая проблема, с помощью какого измерительного прибора можно измерить меры с необходимой точностью. В настоящее время существуют приборы, которые могут сделать измерения с необходимой точностью. Такие приборы производят ведущие фирмы мира такие как Mahr (Германия), TESA (Швейцария) Mitutoyo (Япония) и др. В России производится установка для контроля концевых мер УКМ-100.

Целью работы является повышение эффективности поверки концевых мер длины. В связи с этим ставится задача- проведение испытаний на точность по размаху показаний, погрешности преобразователей и по плоскопараллельности на мерах от 1.0 до 100 мм.

### Методы

Объектом исследования в данной работе является установка УКМ-100 предназначенная для измерения концевых плоскопараллельных эталонных мер длины 3 и 4 разрядов и рабочих мер 1 – 5 классов точности длиной до 100 мм методом сравнения с эталонной мерой по следующим параметрам: отклонение длины концевой меры от номинальной; определение срединной длины концевой меры; отклонение от плоскопараллельности концевой меры [2].

Установка представляет собой рабочее место поверителя (рис. 1) и состоит из стола, в который встроена гранитная плита, выполняющая функцию основания, на



котором установлена колонка с верхним и нижним кронштейнами. Верхний кронштейн, перемещающийся по колонке, нижний кронштейн жестко крепится к колонке и гранитному основанию, в кронштейнах закреплены индуктивные датчики. Верхний и нижний кронштейны содержат механизм вертикальной тонкой подачи измерительных датчиков в виде упругого параллелограмма. Система арретирования полуавтоматическая вакуумная. Блок управления арретированием датчиков обеспечивает поочередное арретирование верхнего и нижнего датчика по команде поверителя. При измерении эталонная и поверяемая концевые меры укладываются в кассеты.

Работой поверителя управляет компьютерная программа. Электронный цифровой блок БИН 10 принимает информацию от индуктивных датчиков и передает ее в компьютер. Результаты измерения и обработанные данные выводятся на дисплей и заносятся в память компьютера.

Одной из первых прибор для проверки концевых мер индуктивными датчиками разработала швейцарская фирма TESA (рис.2). В установке TESA усилие прижима верхнего индуктивного датчика 0,63 Н, нижнего – 1,0 Н. Погрешность измерения для установки TESA позволяет поверять на ней меры 3-го класса точности. Стабильность показаний  $\pm 0,1$  мкм. Радиус измерительного наконечника  $R = 20$  мм.



Рисунок 1 – Установка УКМ 100

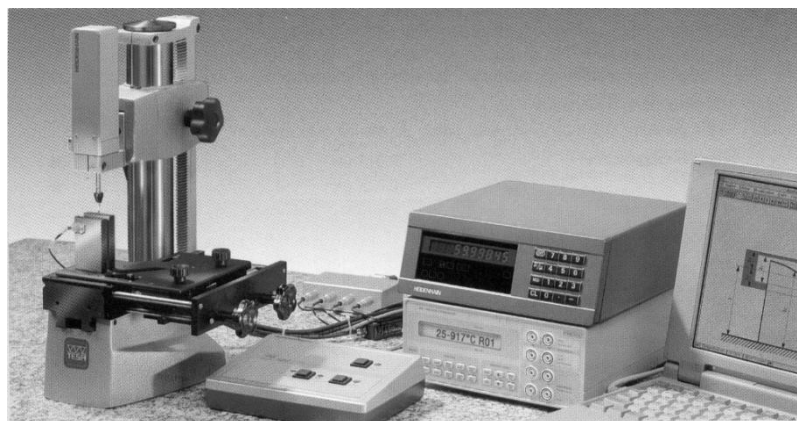


Рисунок 2 — Установка для поверки КМП фирмы TESA (Швейцария)

Этой же фирмой заявлен патент на «двухшаблонную систему», в которой перемещения эталонной и поверяемой мер во время измерительного цикла независимы друг от друга. При перемещении поверяемой меры эталонная мера не движется, что значительно снижает риск повреждения и износа измерительных поверхностей [4].

Недостаток, важный для российского потребителя – высокая стоимость установок TESA – порядка 20 000 \$.

Установки имеют один принцип работы, но разные пределы погрешности.

Сравнительные характеристики представленных приборов указаны в таблице 1.

Определение действительной погрешности установки УКМ 100 проводилось согласно методике поверки МП УКМ100.01.

### Результаты и обсуждение

Размах показаний определяют в средней (нулевой) и в двух точках ( $-10,0 \pm 0,1$ ;  $+10,0 \pm 0,1$  мкм) по мере 10 мм при десятикратном автоматическом арретировании.

Наибольшую разность показаний между отсчетами, соответствующую одному и тому же значению измеряемой величины, принимают за размах показаний. Размах показаний должен быть не более 0,03 мкм. Результаты представлены на рис.3.

Таблица 1— Сравнительные характеристики приборов

Вид погрешности	УКМ-100	TESA
Размах	0,02	0,02
Погрешность измерения длины для концевых мер, мм:		
1,00		
10,00	0,05	0,04
50,00	0,04	0,02
100,00	0,01	0,005
Погрешность измерения длины по паре мер:	0,01	0,007
1,00 – 1,01	0,05	0,02
1,01 – 1,00	0,05	0,02
Абсолютная погрешность при измерении отклонения от плоскопараллельности по концевой мере 10, мм	0,026	0,020

Контролируемые точки, мкм	Показания при арретировании, мкм										Минимальное значение показаний, мкм	Максимальное значение показаний, мкм	Размах, мкм
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10			
+10	19.855	19.861	19.863	19.864	19.874	19.867	19.854	19.866	19.866	19.868	19.855	19.874	0.020
0	-0.306	-0.316	-0.316	-0.315	-0.313	-0.316	-0.316	-0.319	-0.326	-0.328	-0.328	-0.306	0.020
-10	-20.410	-20.422	-20.426	-20.425	-20.422	-20.422	-20.425	-20.420	-20.422	-20.423	-20.426	-20.410	0.020

Рисунок 3— Размах показаний датчиков

Абсолютную погрешность измерения определяют путем измерения срединной длины пары эталонных концевых мер 1-го разряда одного номинального размера 1,00; 10,00; 50,00; 100,00 мм (рис.4)

Определение абсолютной погрешности индуктивных датчиков при измерении длины концевых мер по паре мер 1,00 и 1,01 мм (рис.5).

Погрешность измерения отклонения от плоскопараллельности концевых мер определяют путем измерения концевой меры с номинальным размером 10 мм, у которой указано действительное значение отклонения от плоскопараллельности  $h_d$ . Результаты измерения представлены в таблице 2.

### Заключение

Из приведенных выше результатов исследований по определению погрешности измерения концевых мер длины на установке УКМ 100 можно сделать следующие выводы: установка УКМ 100 по своим техническим характеристикам не уступает

аналогичным приборам для поверки концевых мер длины выпускаемым ведущими зарубежными производителями приборов для линейно-угловых измерений таких как фирма TESA (Швейцария); данный прибор соответствует эталону третьего разряда, но при дальнейшей доработке может быть доведен до эталона второго разряда. Данный прибор включен в Государственный реестр средств измерений и может заменить импортные аналоги в рамках Государственной программы импортозамещения.

Номинальный размер меры, мм	Срединная длина мер, мкм	Разность действ. размеров двух мер, мкм	Показания при арретировании, мкм			Разность измеренных значений средних длин мер, мкм	Погрешность, мкм	Допустимое значение погрешности, мкм
			1	2	3			
1,00	1000.02	0.00	-0.208	-0.236	-0.227	0.05	0.05	0.10
	1000.02		-0.162	-0.171	-0.174			
10,00	9999.99	-0.03	0.219	0.216	0.214	-0.07	0.04	0.10
	9999.96		0.152	0.140	0.139			
50,00	49999.89	0.09	-0.018	-0.029	-0.038	0.08	0.01	0.10
	49999.98		0.058	0.045	0.038			
100,00	99999.93	0.00	0.475	0.461	0.463	-0.01	0.01	0.10
	99999.93		0.458	0.452	0.449			

Рисунок 4 – Погрешность измерения срединной длины пар концевых мер

Номинальный размер меры, мм	Срединная длина мер, мкм	Разность действительных размеров двух мер, мкм	Показания при арретировании, мкм			Разность значений средних длин мер, мкм	Погрешность, мкм	Допустимое значение погрешности, мкм
			1	2	3			
1,00	1000.02	10.01	0.079	0.067	0.066	10.06	0.05	0.10
1,01	1010.03		10.139	10.134	10.136			
1,01	1010.03	-10.01	-0.024	-0.028	-0.026	-10.06	0.05	
1,00	1000.02		-10.077	-10.089	-10.091			

Рисунок 5 – Погрешность измерения индуктивных датчиков

Таблица 2 – Результаты измерения плоскопараллельности

$h_d$ , мкм	$C1$ , мкм	$a$ , мкм	$b$ , мкм	$d$ , мкм	$e$ , мкм	$h_n$ , мкм	$\Delta h$ , мкм
0.040	-0.013	-0.049	-0.075	-0.038	-0.010	0.066	0.026

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Табенкин, Александр Натанович. Текстура поверхности и ее измерение. Шероховатость, волнистость, профиль, топография / А. Н. Табенкин, С. Б. Тарасов, С. Н. Степанов; под редакцией Н. А. Табачниковой; Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. - Санкт-Петербург: Изд-во Политехн. ун-та, 2018.

2. Любомудров, Сергей Александрович. Метрологическое обеспечение производств: учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки 150400 «Технологические машины и оборудование» / С. А. Любомудров, С. Н. Степанов, С. Б. Тарасов; Санкт-Петербургский государственный политехнический университет. / Санкт-Петербург: Изд-во Политехн. ун-та, 2008 (Санкт-Петербург, 2020).

3. МИ 2007-89. Плиты поверочные и разметочные методика поверки.: введен: 12.07.89/ Государственным комитетом СССР по стандартам. - МОСКВА - 1990.

4. ГОСТ 8026-92. Линейки поверочные. Технические условия.: введен 1993-01-01. -Постановлением Госстандарта от 23.03.92 N 233.

Д.И. Ашрапов, А.А. Евдокимова, В.А. Подлобошников,  
С.Н. Степанов, А.А. Москалец  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Санкт-Петербург, Россия, [ashrapov.denis@gmail.com](mailto:ashrapov.denis@gmail.com)

## ИССЛЕДОВАНИЯ ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРОННЫМ УРОВНЕМ М-05-03

### **Аннотация**

В представленной работе рассмотрены вопросы, связанные с определением погрешности измерения, отклонения от плоскостности и прямолинейности плит и линеек, с помощью системы электронных уровней М-050-03. Также представлены результаты сравнений действительной погрешности уровня на эталонном экзаменаторе 1-го разряда с электронным уровнем Blue LEVEL фирмы WYLER (Швейцария). Сделаны выводы о возможности импортозамещения.

*Ключевые слова:* электронный уровень, плита, линейка, плоскостность, измерения, поверка.

### **Введение:**

В заводских лабораториях и центрах метрологии широко применяются плиты и линейки различных классов точности. В процессе эксплуатации плиты и линейки изнашиваются и требуют поверки, т. е. подтверждения своих технических характеристик, для выполнения таких работ используются электронные уровни. Кроме этого, электронные уровни используются при монтаже оборудования в машиностроительных цехах и площадках [1]. Так, например, электронные уровни применяют при монтаже металлорежущих станков, координатно-измерительных машин и другого оборудования, требующего определения точного взаимного расположения его частей и в пространстве.

Целью работы является повышение эффективности поверки плит и линеек, посредством опытного исследования действительной погрешности измерения электронными уровнями М-05-03.

Для достижения поставленной цели необходимо решить задачу, состоящую в проведении точностных испытаний электронными уровнями на экзаменаторе 1-го разряда М-055 и сравнений действительной погрешности данного уровня с максимальной погрешностью уровня фирмы WYLER (Швейцария).

### **Методы.**

Объектом исследования данной работы стала электронная система уровней Российского производства модели М-050-03, предназначенная для измерений отклонений от плоскостности и прямолинейности рабочих поверхностей поверочных линеек типа ШМ, ШМ-ТК и УТ по ГОСТ 8026-92 и станочных направляющих (рис.1) [4].

В металлическом корпусе уровня расположена маятниковая система и индуктивный преобразователь полумостового типа. Преобразователь состоит из катушки с двумя обмотками и подвижного якоря. Обмотки катушки включены встречно и составляют половину индуктивного моста. Вторая его половина

образуется входным делителем электронного блока БИН-2И. При расположении якоря симметрично обмоткам, мост сбалансирован и напряжение в его диагонали равно нулю.



Рисунок 1 – Система электронных уровней М-050-03 для измерений отклонений от плоскости плит поверочных и разметочных: 1— уровень с измерительной кареткой; 2 уровень с подошвой; 3— экзаменатор 1-го разряда М-055; 4— электронный блок

Уровень состоит из двух индуктивных измерительных уровней, один с плоской подошвой, другой с измерительной кареткой (рис. 1). Уровень с измерительной кареткой (А) измеряет объект, а уровень с подошвой (В) отслеживает пространственное положение измеряемого объекта и, таким образом, исключается погрешность внешнего воздействия на измеряемый объект связанное с его перемещением в пространстве в момент измерения.

Например, если объектом измерения является плита, которая находится в здании то здание, в зависимости от конструкции, может раскачиваться и это вызовет погрешность при измерении плиты. Уровень с подошвой будет отслеживать это раскачивание здания и вычитать из результатов измерения уровнем с измерительной кареткой [2].

Измерительная каретка имеет ножки, которые устанавливаются на расстоянии, определяемом по ГОСТУ в зависимости от размеров измеряемого объекта. Результаты измерения отображаются на электронном блоке и на экране компьютера.

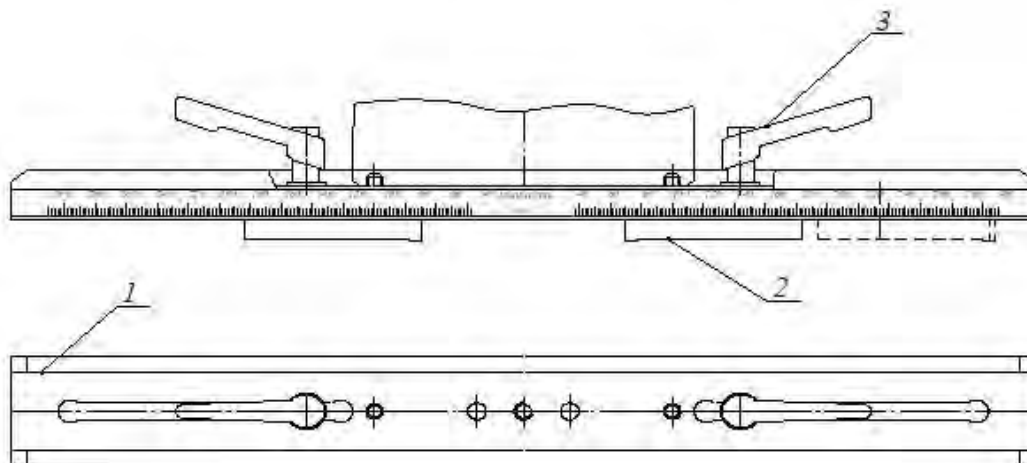


Рисунок 2 – Каретка измерительная: 1 – корпус; 2 – опора; 3-зажимной винт

Программное обеспечение прибора в диалоговом режиме руководит действиями оператора по перемещению уровня по плите согласно стандартной схеме поверки (МИ 2007-89) [3]. Обработку результатов измерений выполняет компьютер, на дисплее которого отображается 3D картинка отклонения от плоскостности или прямолинейности и соответствующие таблицы расчётов отклонений. Результаты поверки и свидетельство о поверке могут быть распечатаны с компьютера на любом принтере.

Уровень Blue LEVEL фирмы WYLER (Швейцария), получил наибольшее распространение и применение в промышленности для измерения углов, плоскостей и взаимного положения объектов (рис.3).

Данный уровень имеет горизонтальное плоское основание с пазами для отвода пыли. Основание имеет выборку в центральной части, а его контактные поверхности притёрты на три точки. Основание сделано из износостойкой стали и защищено никелированием. Длина основания 110, 150 и 200 мм. Уровень крепится на дополнительное гранитное основание длиной 200, 250, и 500 мм через сквозные отверстия.

Сравнительные характеристики представленных уровней указаны в табл.1.

Таблица 1 – Сравнительные технические характеристики электронных уровней М-050 и Blue LEVEL

Характеристика	Уровень М-050	Уровень Blue LEVEL
Цена деления, мкм/м	1	1
Диапазон измерения, мкм/м	1500	2000
Максимальная погрешность, мкм/м	17	20
Минимальная погрешность, мкм/м	2	1
Установочное время для считывания, с	5	3



Рисунок 3 – Уровень Blue LEVEL фирмы WYLER (Швейцария)

Максимальная и минимальная погрешность уровня М-050, мкм/м, указанная в табл.1 рассчитывалась по формуле (1).

$$\Delta = \pm(2 + 0,01 \times a), \quad (1)$$

где  $a$  – измеренное значение, мкм/м.

Установление действительной погрешности уровня М-050-03 проводилось на экзаменаторе 1-го разряда М-055 согласно методике поверки МП 2511/0010-2008.

Поверяемый уровень устанавливался на плите экзаменатора в продольном направлении, параллельно ее краю.

Действительной погрешность измерений определялась в пяти точках, равномерно распределенных по всему диапазону измерений при прямом и обратном ходе.

С помощью регулировочных винтов устанавливалось требуемое начальное положение плиты экзаменатора. Показание поверяемого уровня должно быть равно «0».

С помощью рукоятки грубой и точной регулировки устанавливался требуемый угол наклона плиты экзаменатора. После стабилизации показаний уровня снимался отсчет по электронному блоку БИН-2И (рис.1).

Измерения проводились в каждой проверяемой точке диапазона измерений в соответствии с методикой измерений (МИ 2007-89).

### **Результаты и обсуждение**

В ходе измерений за абсолютную погрешность принималось значение, равное наибольшей разности между показанием уровня и действительным значением угла наклона плиты экзаменатора в каждой проверяемой точке.

Результаты измерений отображены в табл.2

Уровень считается выдержавшим поверку, если абсолютная погрешность измерений не превышает значений, рассчитанных по формуле (1) и представленных в табл.1.



Таблица 2 – Результаты измерений действительной погрешности уровня М-050-03

Поверяемые точки диапазона, мкм/м		-1500	-1175	-750	-375	0	+375	+750	+1175	+1500
Действительная погрешность, мкм/м	Уровень А	Прямой ход								
		-4	-3	-1	1	0	+3	+2	+3	+5
		-3	-2	-2	2	+1	+2	+3	+4	+3
		Обратный ход								
	Уровень В	Прямой ход								
		-4	-2	-2	-1	0	+2	+2	+2	+4
		-5	-4	-3	-2	-1	+3	+4	+4	+4
		Обратный ход								
Вариация, мкм/м		2								

### Заключение

Как видно из результатов исследований действительной погрешность данного комплекта уровней составляет 5 мкм. Исходя из сравнительных характеристик, представленных в табл.1, можно сделать вывод о том, что максимальная действительной уровня М-050, полученная в результате опытных исследований, гораздо меньше, чем у уровня Blue LEVEL. Следовательно, при полученных результатах, можно проводить поверку плит и линеек уровнем М-050 более высокого класса с меньшим полем допуска. Данный комплект уровней соответствует эталону второго разряда и может заменить ранее рассматриваемые уровни фирмы WYLER в рамках импортозамещения.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Табенкин, Александр Натанович. Текстура поверхности и ее измерение. Шероховатость, волнистость, профиль, топография / А.Н. Табенкин, С.Б. Тарасов, С.Н. Степанов; под редакцией Н.А. Табачниковой; Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. — Санкт-Петербург: Изд-во Политехн. ун-та, 2018 (Санкт-Петербург, 2021).

2. Любомудров, С.А. Метрологическое обеспечение производств: учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки 150400 «Технологические машины и оборудование» / С.А. Любомудров, С.Н. Степанов, С.Б. Тарасов; Санкт-Петербургский государственный политехнический университет. - Санкт-Петербург: Изд-во Политехн. ун-та, 2008 (Санкт-Петербург, 2020).

3. МИ 2007-89. Плиты поверочные и разметочные методика поверки.: введен: 12.07.89/ Государственным комитетом СССР по стандартам. - МОСКВА - 1990.

4. ГОСТ 8026-92. Линейки поверочные. Технические условия.: введен 1993-01-01. -Постановлением Госстандарта от 23.03.92 N 233.

Е.Н. Евсеева., Д.А. Нифонтов, А.С. Быстрова, Л.Г. Черных, И.Н. Хрусталева  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Санкт-Петербург, Россия, [katya.evseeva@mail.ru](mailto:katya.evseeva@mail.ru)

## **ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ АЛЮМИНИЯ НА АДГЕЗИЮ ПРИ ГАЗОПЛАМЕННОМ НАПЫЛЕНИИ ОБРАЗЦОВ ИЗ КОНСТРУКЦИОННОЙ СТАЛИ С РАЗЛИЧНОЙ ШЕРОХОВАТОСТЬЮ**

### **Аннотация**

В работе, которая посвящена исследованию влияния оксида алюминия на повышение прочности сцепления с поверхностью, представлены результаты зависимости значений прочности сцепления с подложкой от состава порошка для напыления, путем добавления в применяемый (в качестве опытного материала) порошок оксида алюминия, который по своим свойствам повышает прочность, твердость, стойкость к температурным и химическим воздействиям и, следовательно, влияет на величину адгезии.

Произведен анализ данных зависимостей и определены параметры, которые оказывают наибольшее влияние на их значения.

*Ключевые слова:* оксид алюминия; газопламенное напыление; шероховатость поверхности; пескоструйная обработка; измерительный прибор;

### **Введение**

Повышение износостойкости деталей- одна из главных задач в машиностроении, одним из путей решения которой, является нанесение на деталь газотермического напыления. Каждый напыляемый материал обладает индивидуальными свойствами, поэтому воздействие его на металл, так же индивидуально.

С целью повышения качества напыляемых покрытий, после применения струйно-абразивной очистки, и управления их свойствами как при напылении, так и при последующей обработке, имеется несколько способов комбинирования покрытий как с различными технологиями, так и с различными составами порошков для напыления.

В связи с возросшим интересом к порошковым материалам, сочетающими в себе разнородные компоненты, в частности оксида алюминия, появилась возможность исследовать сочетания данных компонентов, с сохранением, при этом, микротвердости и максимальном повышении адгезионной прочности.

### **Методы**

Целью работы является повышение адгезии при газопламенном напылении порошков на поверхность деталей типа вал с различной шероховатостью.

В рамках достижения поставленной цели необходимо решить следующую задачу:

- выведение прямой зависимости прочности сцепления покрытия от состава порошка для газопламенного напыления ПР-НД42С, при добавлении в него оксида алюминия.

Данные исследования проводились на двух заготовках, изготовленных из стали 45 для отливок обыкновенной.

Образцы имеют одинаковые характеристики: длину ( $L$ ) 500 мм, диаметр ( $D$ ) 30 мм (рис.1).

Общий вид опытных образцов из стали 45, представлен на рис.1.

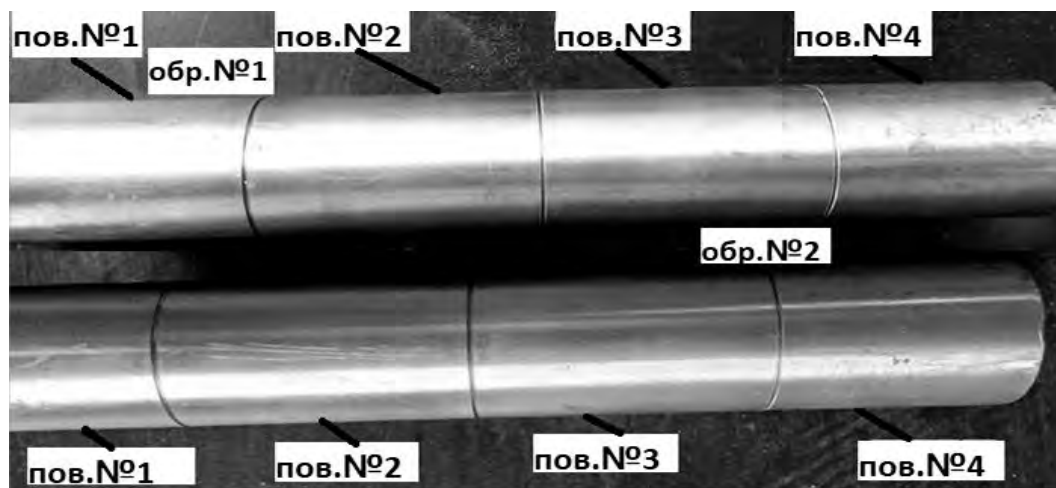


Рисунок 1— Общий вид опытных образцов

Для получения наиболее полных и достоверных результатов каждый опытный образец был разделен на четыре части, для чего, на их поверхностях, на станке «OptimumoptiD 28 OX 76», были нанесены по четыре риски по всей окружности на каждый образец. На выделенных поверхностях проводились измерения параметров шероховатости поверхности, и, впоследствии, после восстановления деталей методом газопламенного напыления, измерения прочности сцепления основного материала с поверхностью. Глубина рисок составила 2 мм.

Перед нанесением покрытия, опытные образцы, для очистки и придания металлу текстурной поверхности, были подвергнуты пескоструйной обработке (степень очистки поверхности Sa2,5), так как, шлифование и полирование не всегда могут оказаться эффективными для удаления окалины, ржавчины и т.п. [1,2].

Для пескоструйной обработки поверхностей опытных образцов, был применен пескоструйный аппарат эжекторного типа «Аэробластинг А-90Э», который предназначен для металлических очистки поверхностей сухим песком любого вида, фракцией до 3,5 мм (в данном случае был использован кварцевый окатанный песок с фракцией 0,4 - 0,8 мм).

В соответствии с [4], после очищения детали, были исследованы параметры шероховатости полученной поверхности.

Поверхности обоих образцов были измерены прибором профилометром MarSurfPS10.

Данные средних значений параметра  $Rz$  представлены в табл.2.

Далее, в соответствии с постановкой задач исследования, после контроля качества поверхности на опытные образцы было нанесено газопламенное напыление порошками с различным химическим составом, с предварительным подогревом поверхности до 100°C.

Для напыления опытного образца №1, был применен самофлюсующийся порошок ПР-НД42СР, полученный распылением расплава металла газом

(сферическая форма частиц), отличающийся пониженной пористостью при напылении.

Затем, в используемый порошок, имеющий химический состав, представленный в табл. 2 для напыления образца №2, в качестве металлической компоненты смеси, был добавлен химический элемент оксид алюминия (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), в размере 2%, а содержание никеля (Ni) было уменьшено на 2% (табл.1).

Таблица 1— Химический состав порошков на никелевой основе

Вид порошка	Изначальный химический состав порошка без добавления оксида алюминия (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ), %						
	Ni	Cu	C	Si	B	Fe	Другие
Порошок на основе никелевого сплава ПР-НД42СР	51,6	42,5	0,2	0,9	1,0	2,8	-
	Химический состав порошка с добавлением алюминия						
	Ni	Cu	C	Si	B	Fe	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
	49,6	42,5	0,2	0,9	1,0	2,8	2

Газопламенное напыление производилось при дистанции напыления, в пределах 200 мм, горелкой «Автоген ГН-2 ВРИМА», которая предназначена для наплавки изношенных поверхностей деталей машин и механизмов, со смесью рабочих газов-кислород и ацетилен. Далее, с помощью адгезиметра «Elcometer 508», который имеет диапазон нагружения от до 40 МПа, точность установки давления отрыва ±1% от полной шкалы, методом отрыва, были измерены и получены результаты зависимости параметров прочности сцепления с основным материалом (табл.2) при полученной шероховатости поверхности. Для более достоверных результатов, было проведено, в соответствии с [3] по 6 измерений на каждой поверхности, затем, было рассчитано среднее значение и округлено до целых чисел.

Таблица 2— Результаты исследования зависимости прочности сцепления от параметров шероховатости поверхности

Геометрия поверхности	Выбранная опытная поверхность	Средние значения параметра шероховатости поверхности, Rz, мкм	Средние значения прочности сцепления, σ, МПа
Образец №1, с применением порошка для газопламенного напыления без добавления алюминия	Поверхность 1	34	21
	Поверхность 2	32	22
	Поверхность 3	31	21
	Поверхность 4	35	25
Образец №2, с применением порошка для газопламенного напыления при добавлении оксида алюминия	Поверхность 1	34	35
	Поверхность 2	30	33
	Поверхность 3	28	30
	Поверхность 4	31	33

## Результаты и обсуждение

Сопоставив имеющиеся данные прочности сцепления и параметра шероховатости каждого опытного образца, были сделаны выводы о наличии прямой зависимости и увеличении адгезии не только с увеличением параметра шероховатости, но и с добавлением в порошок для газопламенного напыления оксида алюминия (Al).

Исходя из этого, можно предположить, что связь между признаками прямая, и её можно описать линейным уравнением регрессии при наличии величины достоверности аппроксимации ( $R$ ), построив поле корреляции для каждого случая.

Анализируя данные в полях корреляции, можно сделать вывод о том, что ближе всего к поиску величины достоверности подходит линейная функция, так как точки на обеих полях расположены максимально близко к прямой линии.

Графическое представление аппроксимации экспериментальных данных изображено на рис. 2 и рис.3.

В соответствии с построенным полем корреляции можно видеть, что величина достоверности аппроксимации полученных значений адгезии без добавления в используемый порошок оксида алюминия (рис.2)  $R= 0,8628$ , а на рис.3, при добавлении в используемый порошок оксида алюминия  $R=0,9490$  что указывает на максимальное совпадение расчетной прямой с опытными данными.

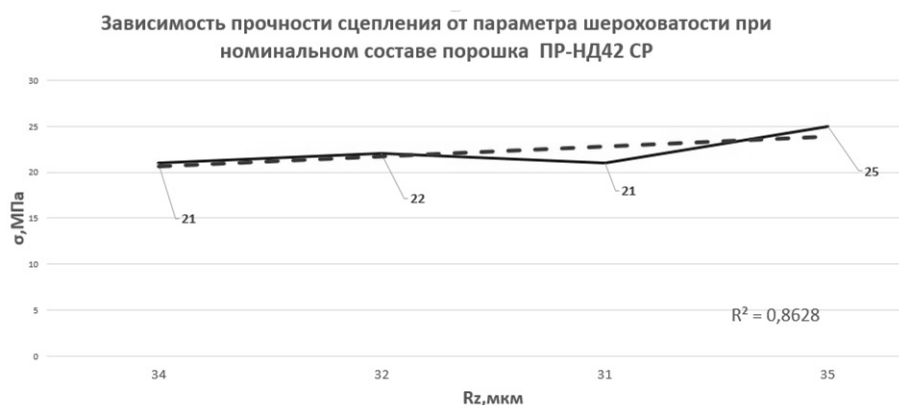


Рисунок 2 – графическое представление аппроксимации полученных значений адгезии без добавления в используемый порошок оксида алюминия (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)

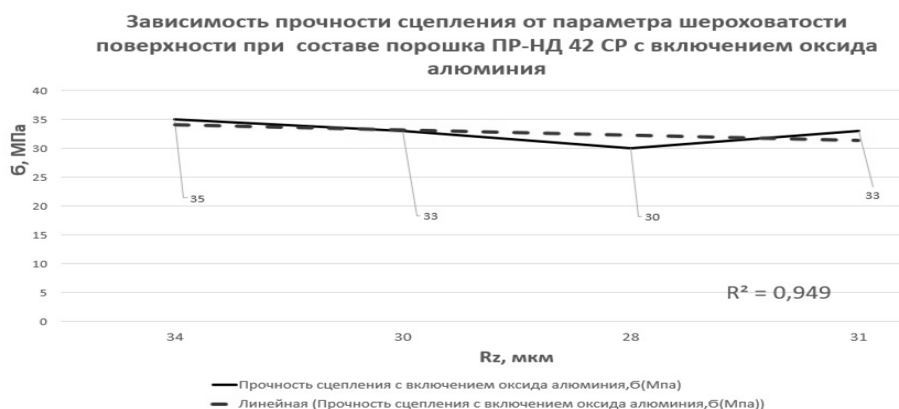


Рисунок 3 – Графическое представление аппроксимации полученных значений адгезии при добавлении в используемый порошок оксида алюминия (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)

## Заключение

В соответствии с целью работы, опытным путем было доказано, что присутствие оксида алюминия в напыляемом порошке ПР-НД42СР, повысил параметр адгезии, в среднем на 10 Мпа по сравнению с составом того же порошка, но без присутствия оксида алюминия.

Таким образом, на примере проведенных исследований, было доказано, что существенное влияние на адгезионную прочность оказывает качество текстуры поверхности, а присутствие в составе порошка для напыления ПР-НД42СР такого элемента, как оксид алюминия, повышает адгезионную прочность, следовательно, существенно повышает долговечность детали и дает основания к уменьшению финансовых затрат и повышению экономической выгоды.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Балдаев Л.Х. Особенности процессов высокоскоростного газопламенного напыления // Технология машиностроения. - 2005. - № 3. - 315с.
2. Суслов А.Г. Технологическое обеспечение и повышение эксплуатационных свойств деталей и их соединений /А.Г. Суслов, В.П. Федоров, О.А. Горленко. - М.: Машиностроение, 2006. - 448-454 с.
3. Табенкин, А.Н. Текстура поверхности и ее измерение. Шероховатость, волнистость, профиль, топография / А. Н. Табенкин, С.Б. Тарасов, С.Н. Степанов; под редакцией Н.А. Табачниковой; Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. - Санкт-Петербург: Изд-во Политехн. ун-та, 2018 (Санкт-Петербург, 2021)
4. ГОСТ 32299-2013 (ISO 4624:2002). Материалы лакокрасочные. Определение адгезии методом отрыва: межгосударственный стандарт ГОСТ 32299-2013 (ISO 4624:2002) : изд. офиц. : введен впервые : введен 2014-08-01 / Межгос. совет по стандартизации, метрологии и сертификации; Техн. ком. по стандартизации ТК 195 "Материалы лакокрасочные", Науч.-произв. фирма "Спектр ЛК". - Москва : Стандартинформ, 2014. - III, 10, [1] с.; 29 см.

О.Д. Григорьев, К.В. Плюснина, Р.О. Кириченко, Л.Г. Черных, В.И. Слатин  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Санкт-Петербург, Россия, [grigoriev.od@edu.spbstu.ru](mailto:grigoriev.od@edu.spbstu.ru)

## **МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ НА ВАЛАХ, С ПОМОЩЬЮ УСТРОЙСТВА ДЛЯ ПРИВОДА ПРОФИЛОМЕТРА**

### **Аннотация**

В представленной работе была описана методика измерения параметров шероховатости поверхности с помощью разработанного устройства для уменьшения суммарной погрешности измерений для деталей типа «вал», на основе сравнительного анализа значений параметра шероховатости, полученных при измерении портативным профилографом-профилометром MarSurf PS 10 и эталонным профилографом-профилометром MarSurf M400.

*Ключевые слова:* измерительный прибор; привод профилографа-профилометра; шероховатость; устройство; погрешность.

### **Введение**

При измерении параметров шероховатости поверхности, наряду с погрешностью прибора, присутствует, также, и случайная погрешность, которая может быть связана с ошибкой оператора, с влиянием внешних условий (вибрацией, колебаниями температуры, влажности и др.), с несовершенством наших органов чувств. При измерении размеров детали в машиностроении случайные погрешности возникают, в частности, при перемещении измерительного прибора относительно детали и наоборот [1].

Таким образом, целью данной работы является разработка такого метода измерения значений шероховатости поверхности, которое бы существенно уменьшало значение суммарной погрешности.

В соответствии с целью, была поставлена задача спроектировать и создать 3D модель устройства для привода профилографа-профилометра MarSurfPS 10, предназначенного для сведения к минимуму случайной погрешности измерения, путем максимальной фиксации как привода профилометра, так и измеряемой детали.

### **Методы**

Опытные исследования проводились в несколько этапов на образце детали типа «вал», изготовленного из стали 45 (рис.1).

Вначале, деталь была разделена рисками на 8 отрезков, по всей длине, на станке «Optimum TH 4210 DPA V». Глубина рисков составила 1,5 мм. Затем, на каждую из поверхностей, были назначены определенные режимы резания, с помощью которых деталь была обработана (рис.1), для получения более достоверных результатов. Скорость резания ( $V$ ) м/мин и глубина резания,  $t$ , мм, были взяты для всех поверхностей одинаковые 150 и 0,3, соответственно. Подача,  $S$ , мм/об, подбиралась под каждую из восьми поверхностей — 0,6; 0,08; 0,1; 0,12; 0,14; 0,16; 0,18; 0,2, соответственно.

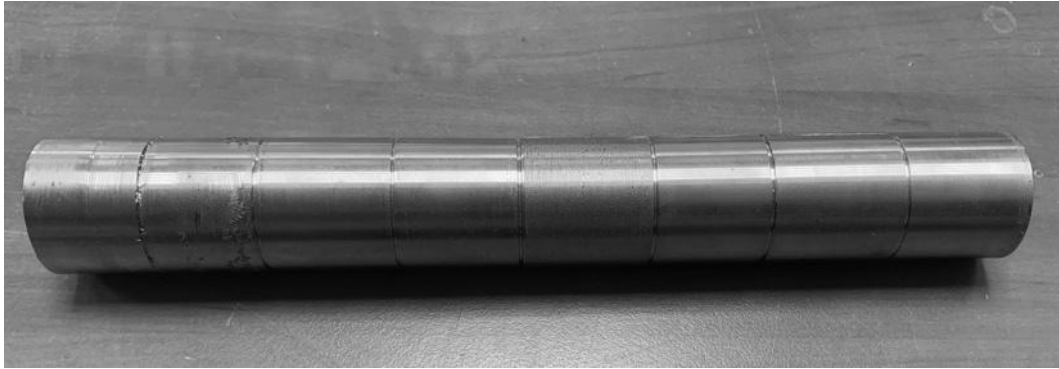


Рисунок 1— Внешний вид опытного образца

Затем, в соответствии с ГОСТ Р ИСО 4287–2014, по всей длине опытного образца, были произведены измерения шероховатости поверхности в пределах базовой длины ( $L$ ) 0,8 мм, портативным прибором профилограф-профилометр «MarSurfPS 10».

На основании технических характеристик погрешность данного прибора составляет 5%.

На рис.2 видно, что оператор снимает измерения параметра шероховатости без какой-либо фиксации прибора, что может существенно повлиять на увеличение случайной погрешности. В ходе измерений были получены значения, представленные на рис.5.

Для проведения сравнительных испытаний и выявления значений случайной погрешности, с помощью эталонного прибора профилограф - профилометр «MarSurf M400», был проведен контроль и получены значения параметра шероховатости поверхности, после анализа которых, сделаны расчеты и выводы об увеличении погрешности измерения, в несколько раз (рис.5) [2].

После контрольного измерения параметра шероховатости, в соответствии с полученными результатами, был проведен анализ причин возникновения погрешности, что привело к проектированию устройства, которое позволило бы существенно снизить показатель суммарной погрешности измерения, за счет максимальной фиксации, как самого привода прибора, так и закрепленной в устройстве, детали. 3D модель данного устройства представлена на рис.3[3,4].

Устройство состоит из стенок корпуса 1, которые скреплены с крышкой 2 болтовым соединением 5, на которой находится отверстие цилиндрической формы 3 для установки привода профилометра 11, на конце которого расположен щуп с иглой 12 для измерения параметров шероховатости. Привод профилометра устанавливается в отверстии 3 и соединяется с корпусом профилометра с помощью кабеля. Над отверстием для крепления привода расположена крепежная скоба 4 она позволяет максимально фиксировать привод в отверстии (крепежная скоба сводит к минимуму перемещение профилометра по отверстию, и, как следствие, уменьшается погрешность и повышается точность результатов измерения), резьбовые отверстия 6 для крепления винтов вертикальной подачи 7. В нижней части корпуса располагаются винты горизонтальной подачи 8, которые перемещаются с помощью ползунков 10 и фиксируют измеряемую деталь с помощью призматических губок 9.

Обе стенки корпуса и крышка приспособления изготовлены из трех разных пластин стали, что повышает его технологичность, поскольку использование неразъемной верхней части корпуса, сложно в изготовлении и металлоемко.



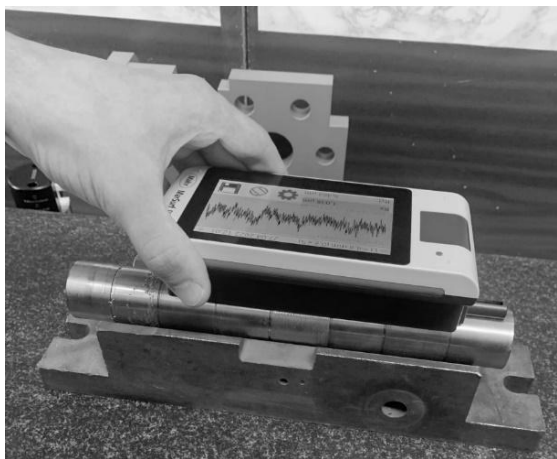


Рисунок 2 – Измерение параметра шероховатости поверхности портативным прибором профилограф-профилометр «MarSurfPS 10»

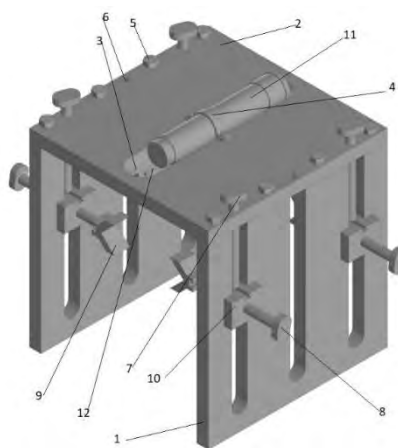


Рисунок 3 – Устройство для измерения шероховатости на валах  
 1 – корпус приспособления; 2 – крышка; 3 – отверстие цилиндрической формы для привода профилометра; 4 – крепежная скоба; 5 – болтовое соединение; 6 – резьбовое отверстие для крепления винтов; 7 – винт вертикальной подачи; 8 – винт горизонтальной подачи; 9 – призматические губки; 10 – ползуны; 11 – привод профилометра; 12 – щуп с иглой

В соответствии с описанной методикой измерения на разработанном устройстве, предполагается, что случайная погрешность измерения будет уменьшена в несколько раз, за счет максимальной фиксации привода прибора и самой детали, а также за счет имеющейся возможности управлять измерениями с некоторого расстояния, так как профилограф-профилометр «MarSurf PS 10» имеет съемный привод, соединённый с корпусом прибора кабелем определенной длины.

### Результаты и обсуждение

В соответствии с целью и задачей, поставленной в данной работе, и на основании выполненных измерений на приборе профилограф-профилометр «MarSurf PS 10», были получены следующие профилограммы, которые отражают состояние поверхности опытного образца и демонстрируют числовые значения параметра  $R_a$ , мкм. Профилограммы нескольких поверхностей представлены на рис.4. На основании сравнительных результатов была рассчитана суммарная погрешность измерения, которая составила, в среднем, 14%. Данные и график средних значений измерений и значений суммарной погрешности представлены на рис.5.

### Заключение

На основании проведенных исследований можно сделать несколько выводов:

Случайная погрешность измерений параметров шероховатости напрямую зависит от фиксации не только детали, но и самого прибора для измерений.

В данном случае процент случайной погрешности составил, в среднем, 14 %. На основании описанной выше методики измерения, с помощью разработанного устройства для измерения валов, можно предположить, что за счет максимальной

фиксации детали и прибора случайная погрешность будет сведена к минимуму, и, следовательно, существенно повысится точность измеряемых деталей.

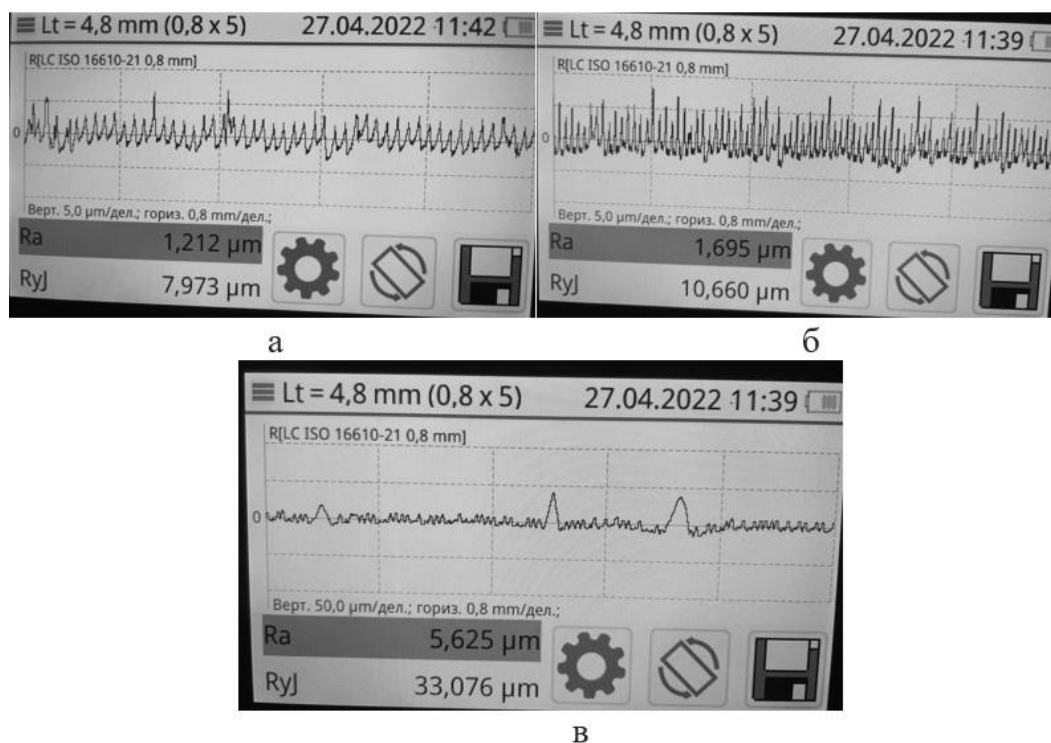


Рисунок 4 – Профилограммы нескольких измеренных профилографом - профилометром «MarSurf PS 10» поверхностей: а – поверхность 7; б – поверхность 3; в – поверхность 2

Средние значения параметра шероховатости Ra, мкм и средние значения суммарной погрешности, полученные опытным путем			
Номер исследуемой поверхности	Значения, измеренные прибором MarSurf PS 10, мкм	Значения, измеренные эталонным прибором MarSurf M400, мкм	Расчитаная суммарная погрешность измерения, Δ, %
1	0,71	0,62	14,5
2	5,62	5,38	4,5
3	1,7	1,48	14,9
4	0,6	0,52	15,4
5	1,03	0,9	14,4
6	1,51	1,31	15,3
7	1,21	1,05	15,2
8	2,42	2,08	16,3



Рисунок 5 – График средних значений измерений и значений суммарной погрешности

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Табенкин, А.Н. Текстура поверхности и ее измерение. Шероховатость, волнистость, профиль, топография / А.Н. Табенкин, С.Б. Тарасов, С.Н. Степанов; под

редакцией Н.А. Табачниковой; Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. — Санкт-Петербург: Изд-во Политехн. ун-та, 2018.

2. Козарь, И.И. Проектирование установочно-зажимных приспособлений: учебное пособие для реализации основных профессиональных образовательных программ по направлению подготовки магистров 15.04.05 Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств / И.И. Козарь, Д.Ю. Колодяжный, С.Н. Степанов; Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Институт машиностроения, материалов и транспорта, Высшая школа машиностроения. — Санкт-Петербург: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2022.

3. ГОСТ Р ИСО 4287-2014. Геометрические характеристики изделий (GPS). Структура поверхности. Профильный метод. Термины, определения и параметры структуры поверхности: нац. стандарт Рос. Федерации / Подготовлен ООО "ЦИТОпроект". - Введ. впервые / Введ. 2016-01-01. - Москва : Стандартиформ, 2015. - II, 17 с.; 29 см.

И.С. Михайлова, И.И. Козарь, Д.Н. Шабалин  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Санкт-Петербург, Россия, [mixailova26050@yandex.ru](mailto:mixailova26050@yandex.ru)

## РАЗРАБОТКА УСТАНОВОЧНО-ЗАЖИМНОГО ПРИСПОСОБЛЕНИЯ ДЛЯ РАДИАЛЬНО-СВЕРЛИЛЬНОЙ ОПЕРАЦИИ

### Аннотация

К одной из актуальных проблем современного мира относится проблема механизация и автоматизация технологических процессов, условием которой является использование станочных приспособлений.

Одним из основных вариантов решения данной проблемы является разработка установочно-зажимных приспособлений для различных операций, что приведет к повышению производительности труда.

В данной статье будет разработано установочно-зажимное приспособление для радиально-сверлильной операции.

*Ключевые слова:* установочно-зажимное приспособление, механизация и автоматизация, повышение производительности труда, скальчатый кондуктор, палец, кольцевая опора, поршень.

### Введение

Ниже приведен ряд требований для установочных приспособлений (для агрегатных станков):

- Обеспечение точной ориентировки обрабатываемой детали относительно инструмента;
- Обеспечение надежного и жесткого крепления обрабатываемой детали;
- Создание зажимных сил, которые обеспечат надежное закрепление детали, но никак не деформируют её;
- Высокая жесткость;
- Защитные устройства от загрязнений стружкой;
- Обеспечение удобной установки, закрепления и снятия заготовки.

Цель: разработать установочно-зажимное приспособление для радиально-сверлильной операции (для детали «Полумуфта»).

### Методы

Для достижения поставленной цели были использованы современные САПР программы (КОМПАС-3Dv20 Учебная версия).

### Результаты

Для достижения поставленной задачи необходимо поэтапно выбрать и рассчитать установочные элементы, зажимной механизм и силовой привод.

На радиально-сверлильном станке 2М55 необходимо выполнить последовательное сверление четырех отверстий спиральным сверлом 2300–0248 ГОСТ 10902–77 (Ø19,5 мм), базирываясь на цилиндрическую поверхность основного отверстия и уступ на нижнем торце фланца полумуфты, операционный эскиз детали «Полумуфта» можно увидеть на рисунке 1.

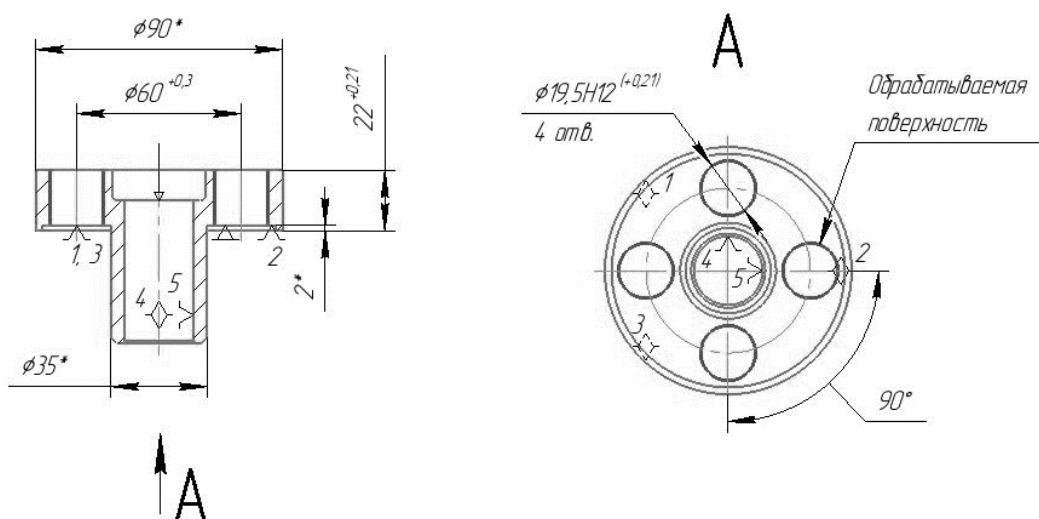


Рисунок 1 – Операционный эскиз детали «Полумуфта»

Базовая цилиндрическая поверхность основного отверстия лишает заготовку двух степеней свободы, а уступ на нижнем торце фланца, упирающийся в кольцевую опору – трёх степеней свободы.

Исходя из размеров заготовки, берём установочные элементы: установочный цилиндрический постоянный палец 7030–0909 25 g6 ГОСТ 12209–66, специальное приспособление – кольцевая опора (см. рисунок 2(а и б)), которая фиксируется на четыре винта А.М16х1,5-6gx35 ГОСТ 1491–80.

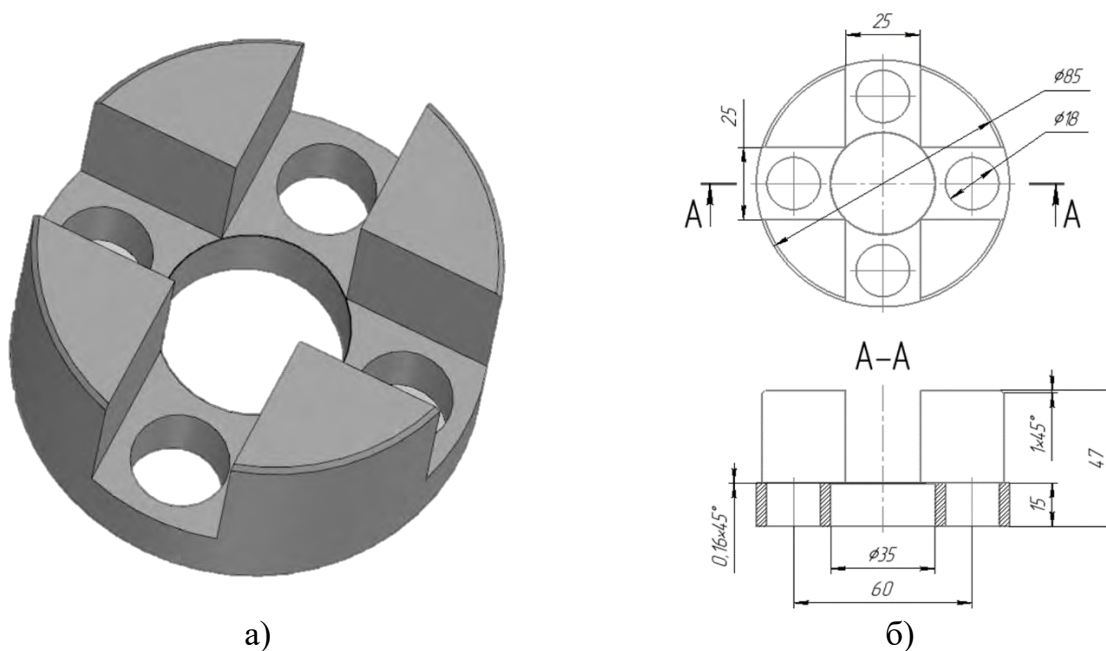


Рисунок 2 – Кольцевая опора: а) 3-D модель; б) Чертеж

В состав зажимного механизма будут входить: четыре специальных приспособления в виде кондукторных постоянных втулок с буртиком, пята 7007–0009 ГОСТ 13436–68, штифт 4x10 ГОСТ 10774–80, специальное приспособление в виде опоры постоянной со сферической головкой.

Требуется определить силу зажима, если она прижимает заготовку к плоскости кольца, параллельной плоскости действия момента резания М. Закрепляющее действие осевой силы Р0 не учитываем. Поэтому реакцию опорного кольца можно

привести к нормальной силе  $N = W$  и моменту от сил трения  $M_{тр1}$ , который создается распределенными по всей площади соприкосновения заготовки с кольцом элементарными силами трения. Также необходимо учесть момент от сил трения  $M_{тр2}$ , который создается сконцентрированными в определенных точках соприкосновения нажимного винта с пятой элементарными силами трения. Схема сил представлена на рисунке 3.

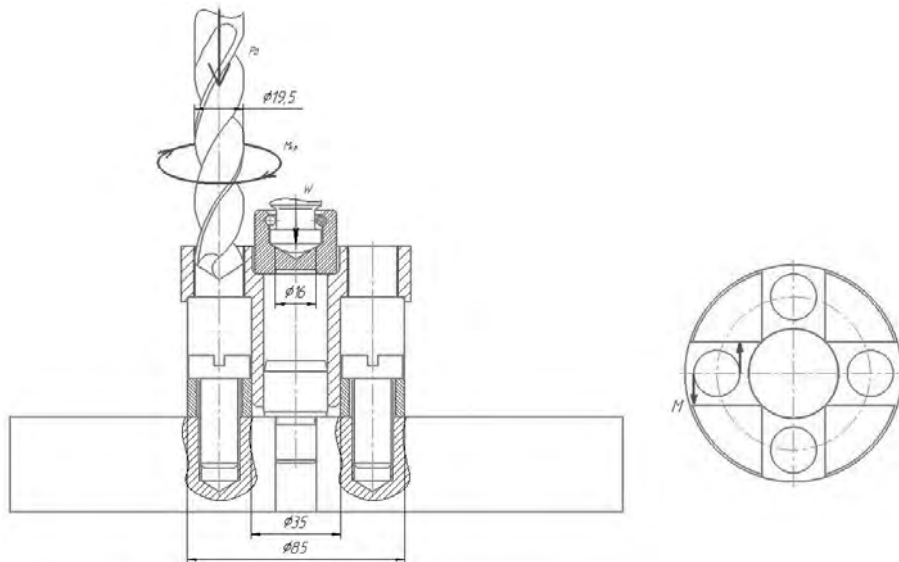


Рисунок 3 – Схема сил

Для расчета  $M_{мп1}$ :

$$F_{тр} = N \cdot f = W \cdot f, \quad (1)$$

где  $f$  – коэффициент запаса (сталь – сталь:  $f = 0,2$ ).

Силы трения сосредоточены на приведенном радиусе трения, который является плечом пары:

$$R_{тр} = \frac{D^3 - d^3}{3 \cdot (D^2 - d^2)} \quad (2)$$

Поэтому, если учесть, что момент трения  $M_{мп1}$  уравнивает момент резания  $M$ , то можно записать:

$$M_{тр1} = F_{тр} \cdot R_{тр} = W \cdot f \cdot \frac{1}{3} \cdot \frac{D^3 - d^3}{D^2 - d^2} \quad (3)$$

Для расчета  $M_{мп2}$ :

$$M_{тр2} = W \cdot f \cdot d_1, \quad (4)$$

где  $d_1 = 16$  мм.

Таким образом:

$$\sum M_{тр} = M_{тр1} + M_{тр2} \quad (5)$$

$$\sum M_{\text{тр}} = K \cdot M_{\text{рез}}, \quad (6)$$

где  $K$  – коэффициент запаса.

$$K = K_0 \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4 \cdot K_5 \cdot K_6 \quad (7)$$

$$K = 1,5 \cdot 1,2 \cdot 1,5 \cdot 1,1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1,4 = 4,158$$

Откуда следует следующее выражение:

$$M_{\text{тр}1} + M_{\text{тр}2} = K \cdot M_{\text{рез}} \quad (8)$$

$$W \cdot f \cdot \frac{1}{3} \cdot \frac{D^3 - d^3}{D^2 - d^2} + W \cdot f \cdot d_1 = K \cdot M_{\text{рез}} \quad (9)$$

$$W \cdot f \cdot \left( \frac{D^3 - d^3}{3 \cdot (D^2 - d^2)} + d_1 \right) = K \cdot M_{\text{рез}} \quad (10)$$

$$W = \frac{K \cdot M_{\text{рез}}}{f \cdot \left( \frac{D^3 - d^3}{3 \cdot (D^2 - d^2)} + d_1 \right)} = \frac{4,158 \cdot 34,52}{0,2 \cdot \left( \frac{85^3 - 35^3}{3 \cdot (85^2 - 35^2)} + 16 \right)} \quad (11)$$

$W = 15034$  Н – минимальная необходимая сила зажима

Диаметр штока в силовом приводе принимаем равным 20 мм.

Чертеж заготовки, установочных элементов и зажимного механизма изображен на рисунке 4.

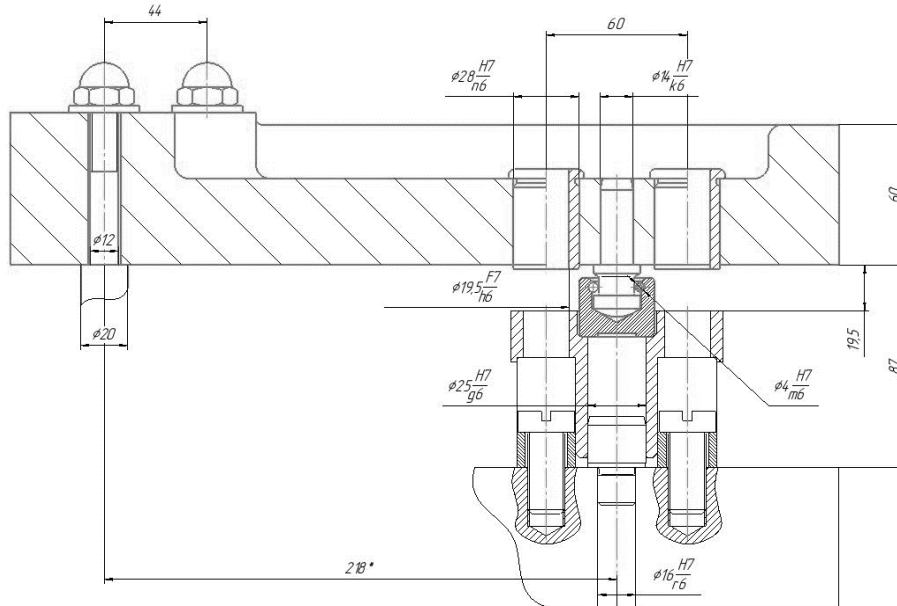


Рисунок 4 – Чертеж заготовки, установочных элементов и зажимного механизма

Теперь определим диаметр цилиндра:

$$W = 0,9 \cdot Q \Rightarrow Q = \frac{W}{0,9} = \frac{15034}{0,9} \quad (12)$$

$$Q = 16704 \text{ Н}$$

Требуемая сила на штоке цилиндра двустороннего действия можно представить следующим образом:

$$Q = S_{\text{эф.}} \cdot \Delta p \cdot \eta, \quad (13)$$

где  $S_{\text{эф.}}$  – эффективная площадь поршня;  $\Delta p$  – давление воздуха в сети ( $\Delta p = 1$  МПа);  $\eta$  – КПД цилиндра ( $\eta = 0,9$ ).

Отсюда следует:

$$S_{\text{эф.}} = \frac{Q}{\Delta p \cdot \eta} = \frac{16704}{1 \cdot 0,9} = 18560 \text{ мм}^2$$

$$S_{\text{эф.}} = \frac{\pi \cdot D^2}{4} - \frac{\pi \cdot d^2}{4}, \quad (14)$$

где  $d = 20$  мм.

Таким образом:

$$D = 155 \text{ мм}$$

В результате выполненной работы получилось установочно-зажимное приспособление в виде скальчатого консольного кондуктора с пневматическим закреплением с установкой заготовки на цилиндрический палец и кольцевую опору, чертеж которого представлен на рисунке 5.

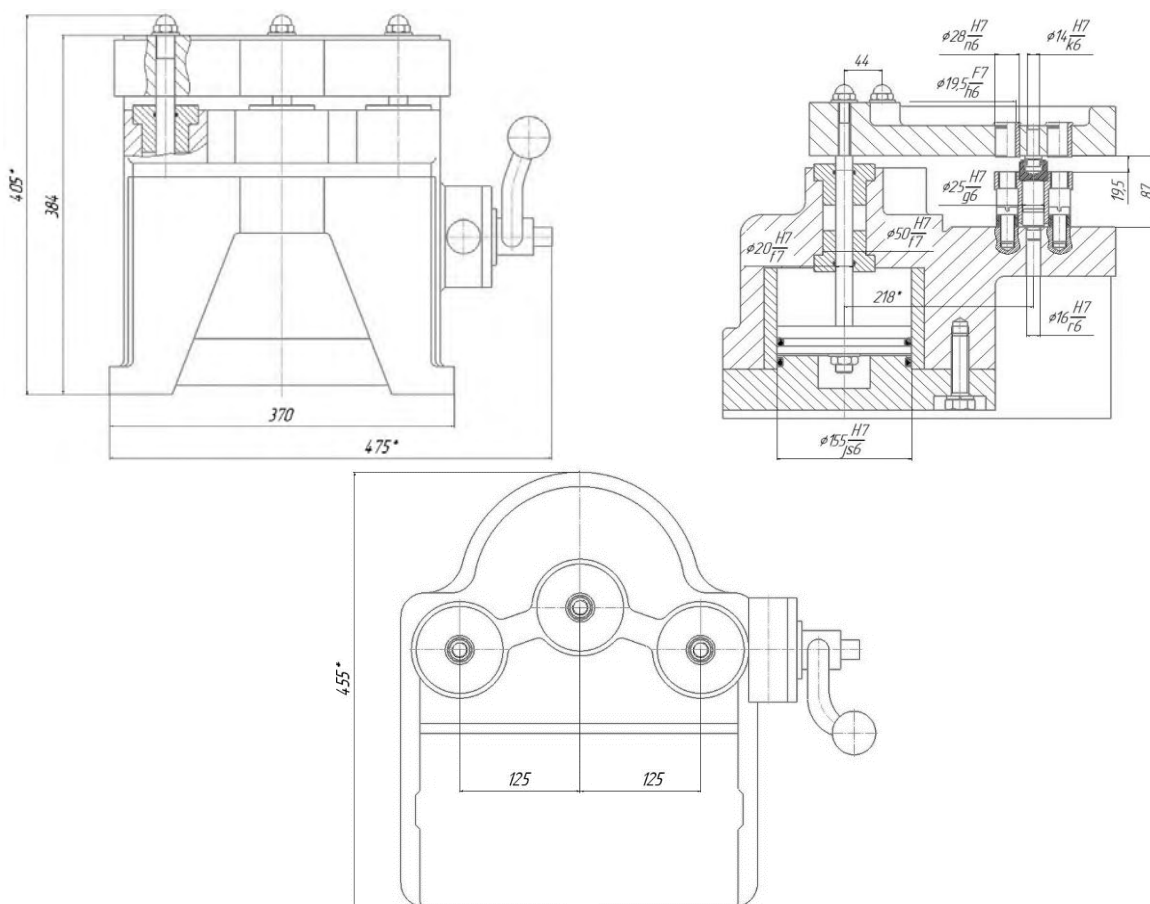


Рисунок 5 – Чертеж скальчатого консольного кондуктора с пневматическим закреплением с установкой заготовки на цилиндрический палец и кольцевую опору



### **Заключение**

Разработанное и представленное в данной работе установочно-зажимное приспособление в виде скальчатого консольного кондуктора с пневматическим креплением может быть использовано для базирования и закрепления обрабатываемой заготовки для выполнения радиально-сверлильной операции.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Козарь И.И. Проектирование установочно-зажимных приспособлений: учеб. пособие / И.И. Козарь, Д.Ю. Колодяжный, С.Н. Степанов. – СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2022. – 118 с.
2. Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х т. Т. 2 / Под ред. А.Г. Косиловой и Р.К. Мещерякова. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1985. 496 с., ил.
3. Горошкин. В. С. Приспособления для металлорежущих станков: справочник / В. С. Горошкин. – М. : Машиностроение, 1979. – 301 с.
4. Ансеров М. А., Приспособления для металлорежущих станков. Расчеты и конструкции – Л.: «МАШГИЗ», 1960. - 638 с.

А.А. Лухмаев, И.И. Козарь, Д.Н. Шабалин  
 Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
 Санкт-Петербург, Россия, [and.luhmaev@yandex.ru](mailto:and.luhmaev@yandex.ru)

## РАЗРАБОТКА ОТДЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ СТАНОЧНОЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОСНАСТКИ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ ГОРИЗОНТАЛЬНО-ФРЕЗЕРНОЙ ОПЕРАЦИИ

### Аннотация

В работе представлены основные этапы разработки механизированного установочно-зажимного приспособления для выполнения горизонтально-фрезерной операции для детали типа рычага. В процессе работы были спроектированы установочные элементы, зажимной механизм и силовой привод.

*Ключевые слова:* приспособление, сила зажима, сила резания, базирование, силовой привод.

### Введение

Применение механизированных установочно-зажимных приспособлений повышает производительность и точность обработки, улучшает условия труда рабочих, обеспечивает строгую регламентацию длительности выполняемых операций, расширяет технологические возможности применяемого оборудования, способствует повышению безопасности работы и снижению количества аварий [1 - 3].

### Методы

Для достижения поставленной цели использовались современные САПР программы [4 - 7].

Базирование заготовки на горизонтально-фрезерной операции осуществляется по двум отверстиям и торцу. В таком случае приемлема установка заготовки на цилиндрический и срезанный пальцы (рис. 1).

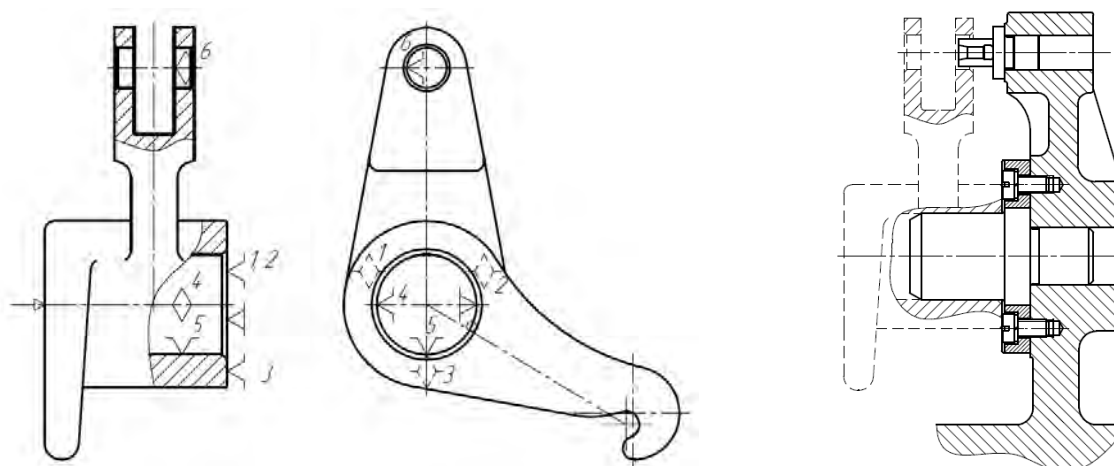


Рисунок 1 – Эскиз детали «Рычаг» с указанием схемы базирования и способом её реализации

Исходными данными для проектирования подобного приспособления являются:

1. Номинальные диаметры базовых отверстий  $d_{o1}$  и  $d_{o2}$ ;
2. Допуски на диаметры базовых отверстий  $\delta_{o1}$  и  $\delta_{o2}$ ;
3. Номинальное значение межосевого расстояния отверстий  $L$ ;
4. Допуск на межосевое расстояние отверстий  $\delta_o$ .

Правильно спроектированное приспособление обеспечивает возможность установки на два пальца любой заготовки из партии и требуемую точность получаемых на операции размеров.

В данном случае  $d_{o1} = 30$  мм,  $d_{o2} = 12$  мм,  $\delta_{o1} = 32$  мкм (поле допуска – JS7),  $\delta_{o2} = 27$  мкм (поле допуска – H8),  $L = 72$  мм,  $\delta_o = 200$  мкм.

Диаметр цилиндрического пальца  $d_{п1}$  задаётся равным номинальному диаметру базового отверстия  $d_{o1}$ , а допуск на него – по f7. Таким образом, диаметр цилиндрического пальца имеет значение:

$$d_{п1} = \varnothing 30 f7_{-0,041}^{-0,020}$$

При этом минимальный  $S_{1min}$  и максимальный  $S_{1max}$  зазоры в сопряжении цилиндрического пальца с отверстием определяются по формулам (1) и (2):

$$S_{1min} = d_{o1min} - d_{п1max} \quad (1)$$

$$S_{1max} = d_{o1max} - d_{п1min} \quad (2)$$

Подставив численные значения в формулы (1) и (2), получается

$$\begin{aligned} S_{1min} &= 29,984 - 29,98 = 0,004 \text{ (мм)} \\ S_{1max} &= 30,016 - 29,959 = 0,057 \text{ (мм)} \end{aligned}$$

Диаметр второго пальца определяется из условия собираемости всех заготовок партии с приспособлением. Условие собираемости для данной схемы является:

$$S_{1min} + X \geq \delta_{п} + \delta_o, \quad (3)$$

где  $X$  – зазор между срезанным пальцем и базовым отверстием;  $\delta_{п}$  – допуск на межосевое расстояние пальцев;  $\delta_o$  – допуск на межосевое расстояние отверстий.

Если основное отклонение на второй палец назначить по g (в соответствии с ГОСТ 12210-66), а допуск взять по 6 качеству, то можно принять следующую формулу для расчёта диаметра второго пальца:

$$d_{п2} = S_{1min} + d_{o2min} - \delta_o - \delta_{п} \quad (4)$$

Подставив значения в формулу (4), получается

$$d_{п2} = 0,004 + 12 - 0,2 - 0,2 = 11,604$$

Таким образом, диаметр срезанного пальца имеет значение:

$$d_{п2} = \varnothing 11,604 g6_{-0,011}^{-0,006}$$

Назначаются палец установочный цилиндрический высокий 7030-1245 ГОСТ 17774-72 и палец установочный срезанный постоянный 7030-0926 ГОСТ 12210-66.

Проверка по условию собираемости (3):

$$S_{1min} + X \geq \delta_{\Pi} + \delta_o$$

$$X = C - b$$

$$C = \sqrt{d_{o2min}^2 - d_{\Pi2max}^2 + b^2} = \sqrt{12^2 - 11,604^2 + 3^2} \cong 4,283 \text{ (мм)}$$

$$X = 4,283 - 3 = 1,283 \text{ (мм)}$$

$$0,004 + 1,283 \geq 0,2 + 0,2 \leftrightarrow 1,287 \geq 0,4$$

Главная составляющая силы резания при фрезеровании – окружная сила. Она может быть вычислена по формуле [8, с.282]:

$$P_z = \frac{10 \cdot C_p \cdot t^x \cdot s_z^y \cdot B^u \cdot z}{D^q \cdot n^w} \cdot K_{Mp}, \quad (5)$$

где  $t$  – глубина резания, мм ( $t = 4$  мм);  $s_z$  – подача на зуб, мм/зуб ( $s_z = 0,14$  мм/зуб);  $B$  – ширина фрезерования, мм ( $B = 12$  мм);  $z$  – число зубьев фрезы ( $z = 20$ );  $D$  – диаметр фрезы, мм ( $D = 100$  мм);  $n$  – частота вращения фрезы, об/мин ( $n = 800$  об/мин);  $C_p, x, y, u, q, w$  – коэффициенты.

Подставив численные значения в формулу (5), получается:

$$P_z = \frac{10 \cdot 54,5 \cdot 4^{0,9} \cdot 0,14^{0,74} \cdot 12^1 \cdot 20}{100^1 \cdot 800^0} \cdot 1^{0,55} \cong 1063 \text{ (Н)}$$

Определение сил  $P_x$  и  $P_y$  [8, с. 292]:

$$P_y = 0,6 \cdot P_z = 0,6 \cdot 1063 \cong 638 \text{ (Н)}$$

$$P_x = 0,3 \cdot P_z \cdot \tan 0^\circ = 0,3 \cdot 1063 \cdot 0 = 0 \text{ (Н)}$$

Мощность  $N$  фрезерования [8, с. 290]:

$$N = \frac{P_z \cdot v}{1020 \cdot 60} = \frac{1063 \cdot 251}{1020 \cdot 60} \cong 4,4 \text{ (кВт)}$$

Силу зажима необходимо определить так, чтобы заготовка не провернулась и не переместилась во время обработки. Силу тяжести можно не учитывать в расчёте силы зажима, т.к. она составляет менее 10% от силы резания.

Сила зажима  $W$  может быть определена из уравнения равновесия (рис. 2):

$$W \cdot f_1 \cdot \frac{2}{3} \cdot \frac{R_1^3 - r_1^3}{R_1^2 - r_1^2} + 2 \cdot W \cdot f_2 \cdot R = (P_z \cdot H + P_y \cdot H_1) \cdot K, \quad (6)$$

где  $W$  – сила зажима, Н;  $f_1, f_2$  – коэффициенты трения ( $f_1 = f_2 = 0,2$ ),  $R_1, r_1$  – внешний и внутренний радиусы опорных поверхностей, м;  $R$  – радиус опорной поверхности зажимного механизма, м;  $H$  и  $H_1$  – плечи сил, м.

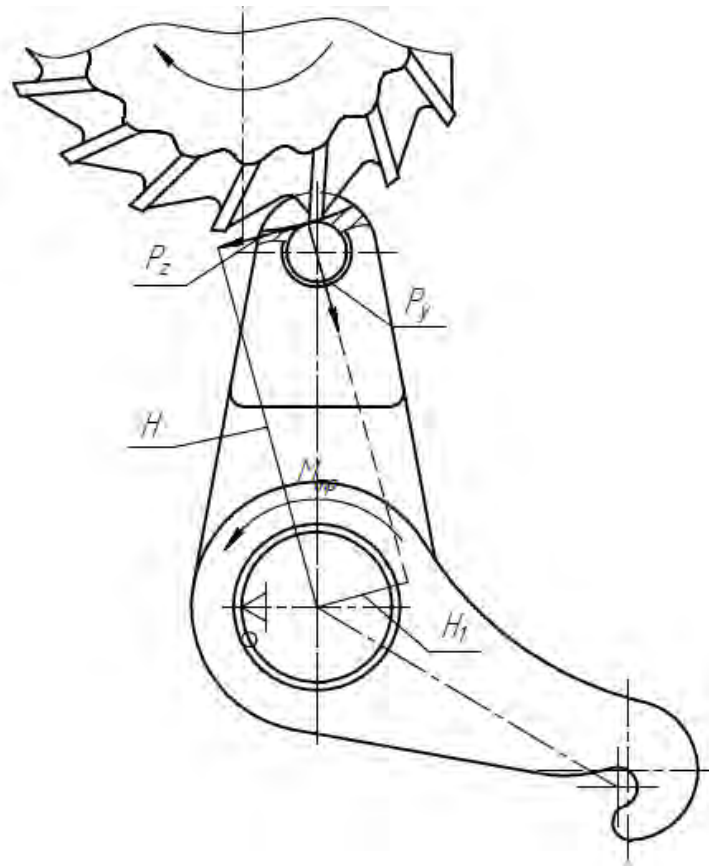


Рисунок 2 – Расчётная схема

Выразив силу зажима из формулы (6), получается формула

$$W = \frac{3}{2} \cdot \frac{(P_z \cdot H + P_y \cdot H_1) \cdot K}{f_1 \cdot \frac{R_1^3 - r_1^3}{R_1^2 - r_1^2} + 3 \cdot f_2 \cdot R}$$

Подставив численные значения, получается значение требуемой силы зажима:

$$W = \frac{3}{2} \cdot \frac{(1063 \cdot 0,07452 + 638 \cdot 0,01842) \cdot 3,3}{0,2 \cdot \frac{0,0245^3 - 0,0166^3}{0,0245^2 - 0,0166^2} + 3 \cdot 0,2 \cdot 0,008} \cong 30250 \text{ (Н)}$$

Схема для расчёта силы на входе зажимного механизма представлена на рисунке 3.

Из справочных данных [9, с. 178] сила на входе зажимного механизма  $Q$  с учётом силы трения, относящийся к направляющей части механизма (рис. 2), определяется по формуле

$$Q = \frac{W \cdot H}{H - 3 \cdot l \cdot f'} \quad (7)$$

где  $H$  – длина контактирующей направляющей, м;  $l$  – длина плеча прихвата, м;  $f$  – коэффициент трения.

Диаметр штока  $d$  можно определить из условия продольной устойчивости:

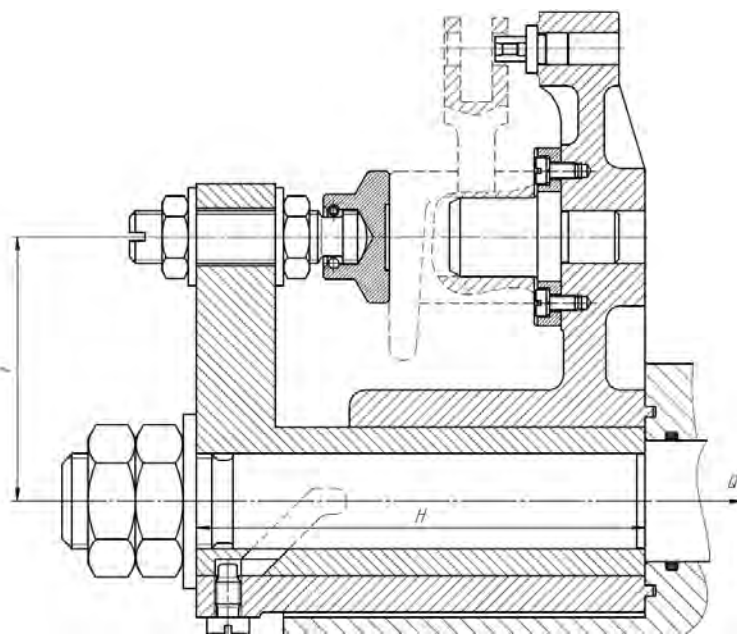


Рисунок 3 – Схема для расчёта силы на входе зажимного механизма

$$d \geq k \cdot \sqrt[4]{\frac{64 \cdot Q \cdot L}{\pi^3 \cdot E}}, \quad (8)$$

где  $k$  – коэффициент, учитывающий заделку концов штока ( $k = 2$ );  $L$  – длина штока, м ( $L = 240$  мм);  $E$  – модуль Юнга (для стали  $E = 2,1 \cdot 10^{11}$  Па).

Расчёт диаметра штока по формулам (7) и (8):

$$Q = \frac{30250 \cdot 170 \cdot 10^{-3}}{170 \cdot 10^{-3} - 3 \cdot 100 \cdot 10^{-3} \cdot 0,1} \cong 36732 \text{ (Н)}$$

$$d \geq k \cdot \sqrt[4]{\frac{64 \cdot Q \cdot L}{\pi^3 \cdot E}} = 2 \cdot \sqrt[4]{\frac{64 \cdot 36732 \cdot 215 \cdot 10^{-3}}{3,14^3 \cdot 2,1 \cdot 10^{11}}} \cong 0,033 \text{ (м)}$$

Диаметр штока принимается равным 36 мм.

Сила на выходе силового привода определяется из формулы [10, стр.54]

$$Q = \left( \frac{\pi \cdot D^2}{4} - \frac{\pi \cdot d^2}{4} \right) \cdot \Delta p \cdot \eta, \quad (9)$$

где  $Q$  – сила на входе зажимного механизма (сила на выходе силового привода), Н;  $D$  – наибольший диаметр цилиндра, м;  $d$  – диаметр штока, м;  $\Delta p$  – давление в системе, Па;  $\eta$  – КПД зажимного механизма.

Таким образом, выразив наибольший диаметр цилиндра из формулы (9) получается:

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot \Delta p \cdot \eta} + d^2}$$

Подставив численные значения в формулу (исходя из особенности конструкции штока, в расчётах для диаметра цилиндра принимается диаметр штока равный 46 мм), получается

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot 36732}{\pi \cdot 10 \cdot 10^6 \cdot 0,95} + (46 \cdot 10^{-3})^2} \cong 0,084 \text{ (м)}$$

Принимается диаметр цилиндра равный 84 мм.

В качестве уплотнений принимаются O-образные кольца по ГОСТ 9833-73 различных диаметров в соответствии со справочной литературой [11, стр. 55].

Эскиз спроектированного установочно-зажимного приспособления представлен на рисунке 4.

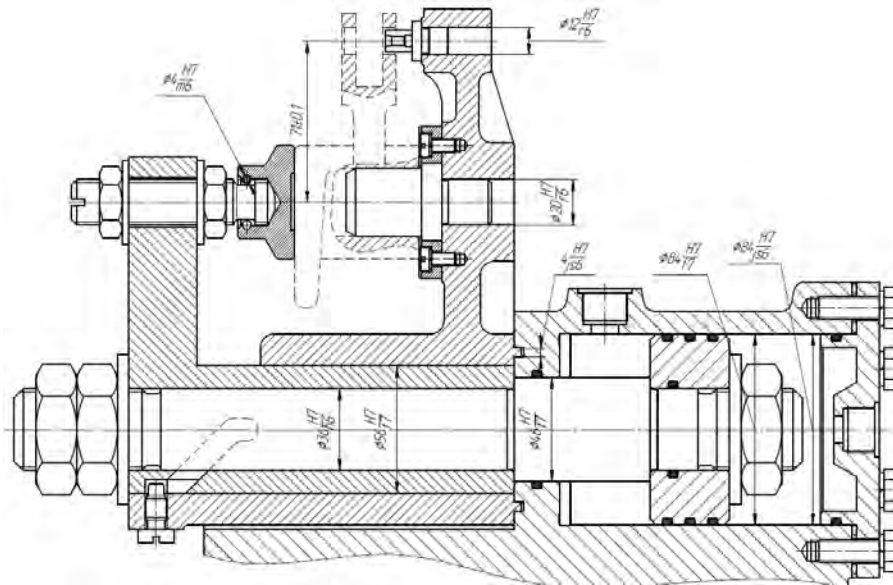


Рисунок 4 – Эскиз установочно-зажимного приспособления

### Заключение

Разработанное и представленное в данной работе механизированное установочно-зажимное приспособление может быть использовано для упрощённого закрепления и фрезерования подобных деталей на горизонтально-фрезерных станках.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федотова А.М., Гасюк Д.П. Анализ рисков возникновения проблем с качеством технологической подготовки производства и разработка мероприятий по их снижению в условиях АО "НИИЭФА" // *Металлообработка*. 2021. № 1 (121). С. 50-54.
2. Анисимов А.В., Анисимов А.Е., Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г., Барабанов В.В. Проблема сравнения и выбора варианта построения системы безопасности // В сборнике: *Актуальные проблемы защиты и безопасности: Труды Четвертой Всероссийской научно-практической конференции*. 2001. С. 348-351.

3. Косова В.А., Гасюк Д.П. К вопросу анализа условий разработки технологических процессов машиностроительных предприятий // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2021. № 2. С. 655-658.
4. Тебекин А.В., Сауренко Т.Н. Эволюционная модель прогноза частных показателей инновационных проектов (на примере технических инноваций) /А.В. Тебекин, Т.Н. Сауренко [и др. ]Журнал исследований по управлению. 2019. Т. 5. № 6. С. 55-61.
5. Технология машиностроения. Часть II: Учеб. Пособие / Э.Л. Жуков, И.И. Козарь, Б.Я. Розовский, В.В. Дягтерев, А.М. Соловейчик; Под ред. С.Л. Муракшина. - СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2008. - 498 с.
6. Касяненко Е.О., Гасюк Д.П. Применение процессного подхода для оптимальной работы предприятия // В сборнике: Неделя науки СПбПУ: Материалы научной конференции с международным участием. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. 2016. С. 26-29.
7. Сауренко Т.Н., Анисимов Е.Г., Родионова Е.С. Методика оценки ожидаемой стоимости проектирования технических и технологических инноваций // Управленческое консультирование. 2019. № 11 (131). С. 120-128.
8. Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х т. Т. 2/ Под ред. А.Г. Косиловой и Р. К. Мещерякова. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1985. 496 с.: ил.;
9. Горошкин. В. С. приспособления для металлорежущих станков: справочник / В. С. Горошкин. – М. : Машиностроение, 1979. – 301 с.;
10. Козарь И.И. Проектирование установочно-зажимных приспособлений: учеб.пособие / И. И. Козарь, Д. Ю. Колодяжный, С. Н. Степанов. – СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2022. – 118 с.;
11. Гидроцилиндры. Конструкция и расчёт / В.А. Марутов, С. А. Павловский – М. : Машиностроение, 1966. – 172 с.



## **МЕТОДИКА РАСЧЕТА РАЦИОНАЛЬНОЙ ПЕРИОДИЧНОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ РЕЖИМОВ РЕЗАНИЯ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ПРИНУДИТЕЛЬНЫМ СТРУЖКОДРОБЛЕНИЕМ НА СТАНКАХ С ЧПУ**

### **Аннотация**

Разработано математическое обеспечение расчета периодичности дробления сливной стружки в зависимости от технологических условий резания инструментом со стружкозавивающей криволинейной передней поверхностью. На основе прогнозирования формы и размеров стружки предложена методика расчета рациональной периодичности изменения режимов резания для управления принудительным стружкодроблением на токарных станках с ЧПУ.

*Ключевые слова:* резание материалов, сливная стружка, кинематическое стружкодробление, расчет периодичности изменения режимов резания.

При работе металлорежущего оборудования в условиях малолюдной технологии должно быть обеспечено своевременное удаление стружки из рабочей зоны. В противном случае невозможно эффективное функционирование отдельных исполнительных и вспомогательных устройств, а, следовательно, и гибких производственных систем в целом. Обеспечение удовлетворительного стружкодробления на станках с ЧПУ затрудняется рядом объективных обстоятельств, в том числе малыми припусками на обработку, высокими скоростями резания, а также увеличением прочностных характеристик обрабатываемых материалов [1, 2]. Особые трудности возникают при обработке пластичных, вязких материалов с малыми подачами и глубинами резания.

Одним из путей решения задачи удовлетворительного стружкодробления является резание с периодическим изменением режимов резания [3]. Такой метод сравнительно просто реализуется на токарных станках с ЧПУ и многоцелевых станках. Метод основан на периодическом замедлении подачи или скорости резания до величины, достаточной для деления стружки на части в процессе механической обработки детали. Реализация на станках с ЧПУ оптимального алгоритма импульсного изменения режимов без остановки резания позволяет обеспечить гарантированное дробление стружки независимо от свойств обрабатываемого материала. Тем самым решается острая проблема надежного стружкодробления при механической обработке вязких материалов, подобных чистым алюминию или меди и низкоуглеродистой или нержавеющей стали.

Для оценки вероятности естественного дробления стружки могут быть использованы диаграммы стружкодробления, составленные фирмами изготовителями СМП. Более перспективно применение аналитического метода, учитывающего взаимосвязь между размерами стружколомающей поверхности инструмента, режимами резания, физико-механическими свойствами обрабатываемого материала и стружки. Если, согласно расчетам, в диапазоне возможного изменения условий

резания не удастся обеспечить надежное естественное стружкодробление, решается задача по реализации искусственного метода – оптимизации условий прерывистого резания или периодического замедления подачи.

Оптимизация заключается в определении рациональной периодичности изменения режимов резания в зависимости от условий механической обработки с применением инструментов со стружкозавивающей поверхностью. Поскольку написание программы и ее отладка разделены во времени подбор оптимальных условий резания может представлять серьезную проблему. Эффективное решение вопросов проектирования и внедрения новых технологических процессов обработки на станках с ЧПУ возможно на базе надежной методики расчета рациональных условий кинематического стружкодробления.

Длина спирали завитой стружки определяется по формуле:

$$l_{\text{стр}} = \frac{L D p_h}{2R_0 s k_l},$$

где  $L$  – длина обработанной поверхности за время  $t$ ,  $D$  – диаметр обрабатываемой заготовки,  $p_h$  – шаг спирали стружки,  $R_0$  – радиус спирали стружки;  $s$  – минутная подача инструмента,  $k_l$  – коэффициента укорочения стружки. Расчетные формулы радиуса кривизны  $R_0$  и шага спирали стружки  $p_h$  получены в работе [4].

Из схемы на рисунке 1 следует, что для получения стружки требуемой длины при точении заготовки диаметром  $D$  необходимо организовать процесс резания с периодичностью изменения подачи, соответствующей длинам отрезков обрабатываемой детали равных:

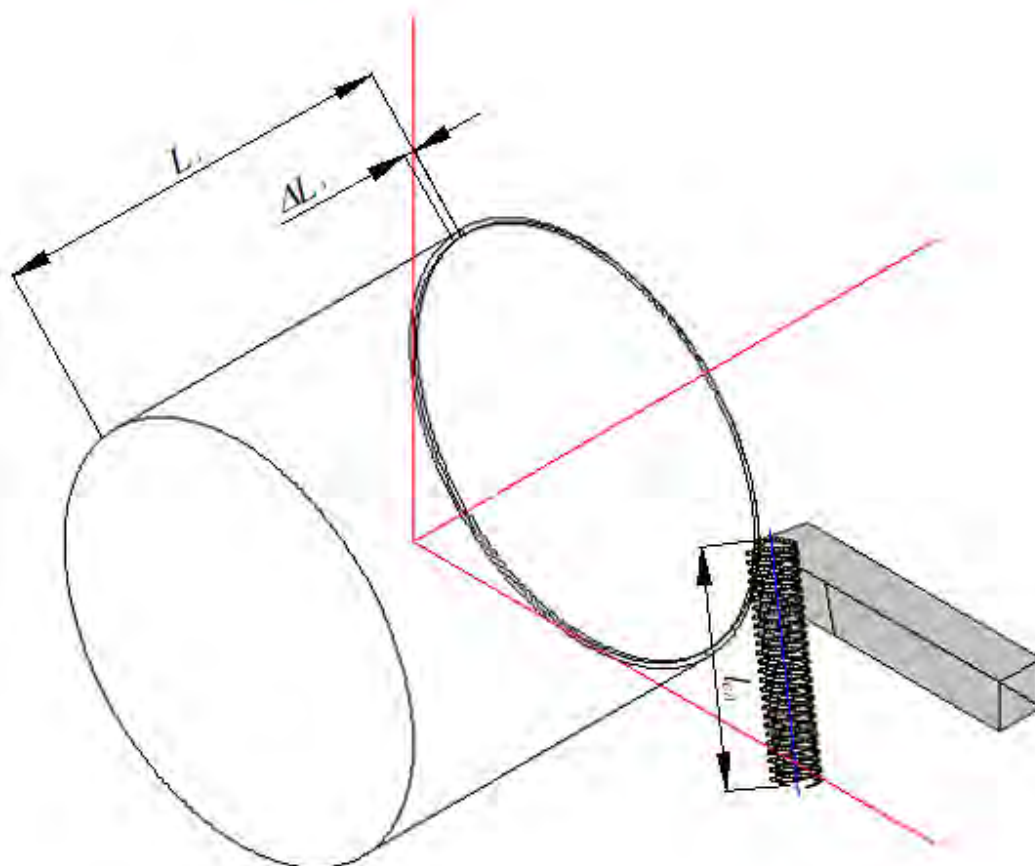


Рисунок 1 – Схема разбиения обрабатываемой поверхности

заготовки на участки непрерывного резания  $\Delta L_3$  с учетом длины стружки

$$\Delta L = \frac{2l_{\text{стр}}R_0 sk_l}{D p_h}$$

Для условий автоматизированного производства оптимальной формой стружки являются спиральные отрезки малого диаметра длиной 30–80 мм [5]. С точки зрения минимальных затрат на переработку стружки рекомендуется длина спирали, равная 50–100 мм [6]. Таким образом, оптимальные отрезки участка заготовки с непрерывным резанием зависят от режимов резания и формы СМП, определяющих геометрические параметры стружки. Для обеспечения оптимального режима дробления стружки при обработке заготовки длиной  $L_3$  необходимо обеспечить число прерываний подачи, равное:

$$z = \frac{L_3}{\Delta L_3}$$

Результаты расчетов периодичности изменения режимов резания представлены на рисунках 2-4. Расчеты выполнены для следующих начальных условий резания: Ст45–Т15К6,  $v=2\text{ м/с}$ ,  $s=0,3\text{ мм/об}$ ,  $t=2\text{ мм}$ ,  $r=0,3\text{ мм}$ ,  $\varphi=90^\circ$ ,  $\varphi_l=5^\circ$ ,  $\lambda=0^\circ$ ,  $D=100\text{ мм}$ . Параметры передней поверхности резца: передний угол  $\gamma=10^\circ$ , расстояние между стружкозавивающим уступом и режущей кромкой резца  $B=5\text{ мм}$ , угол наклона уступа  $\psi=45^\circ$ , высота уступа  $w=0,4\text{ мм}$ .

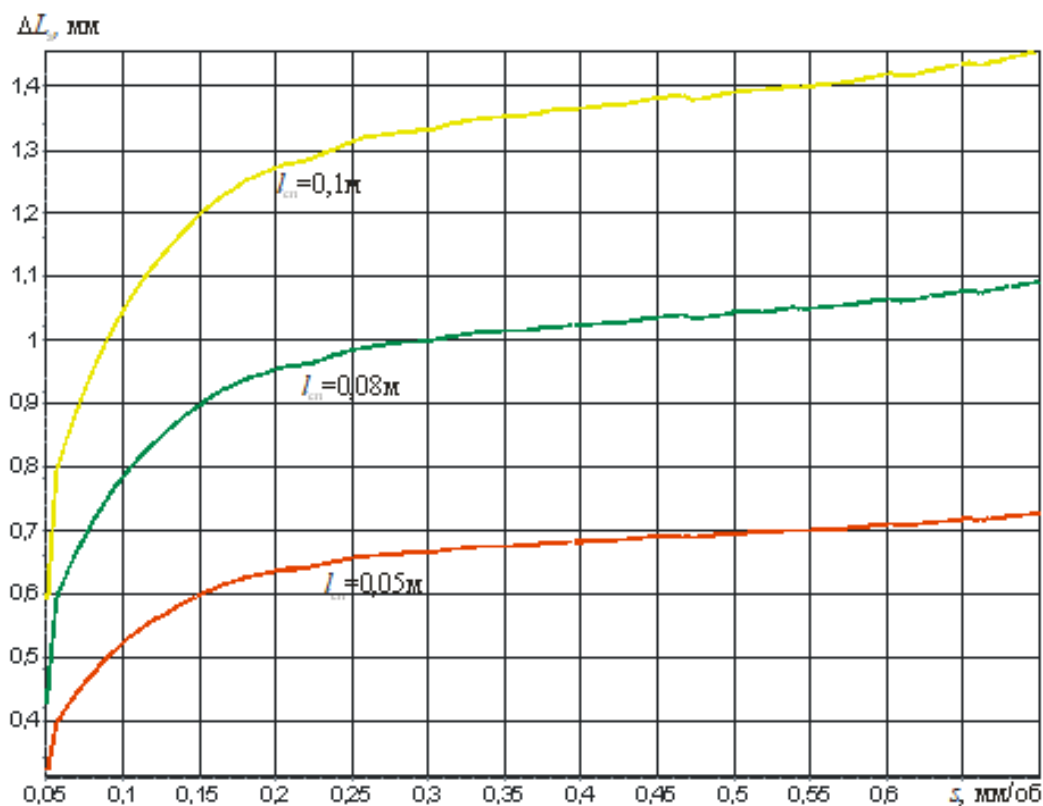


Рисунок 2 – Зависимости длин участков заготовки с непрерывным резанием  $\Delta L_3$  от подачи  $s$

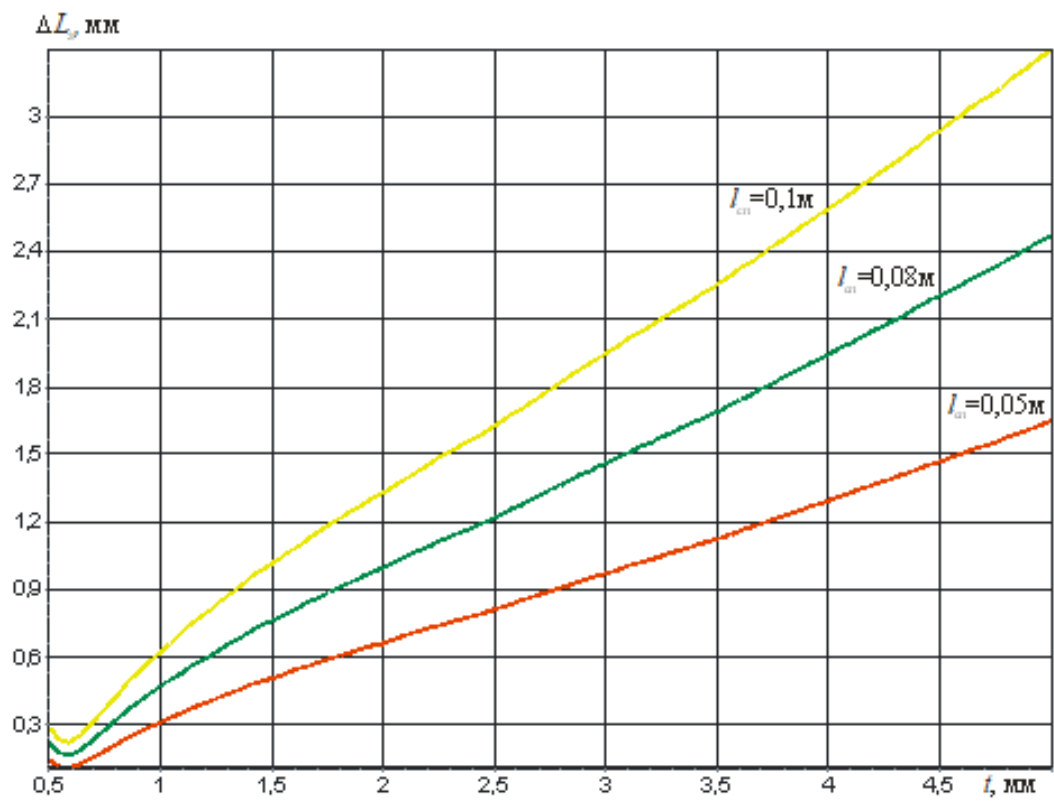


Рисунок 3 – Зависимости длин участков заготовки с непрерывным резанием  $\Delta L_3$  от глубины резания  $t$

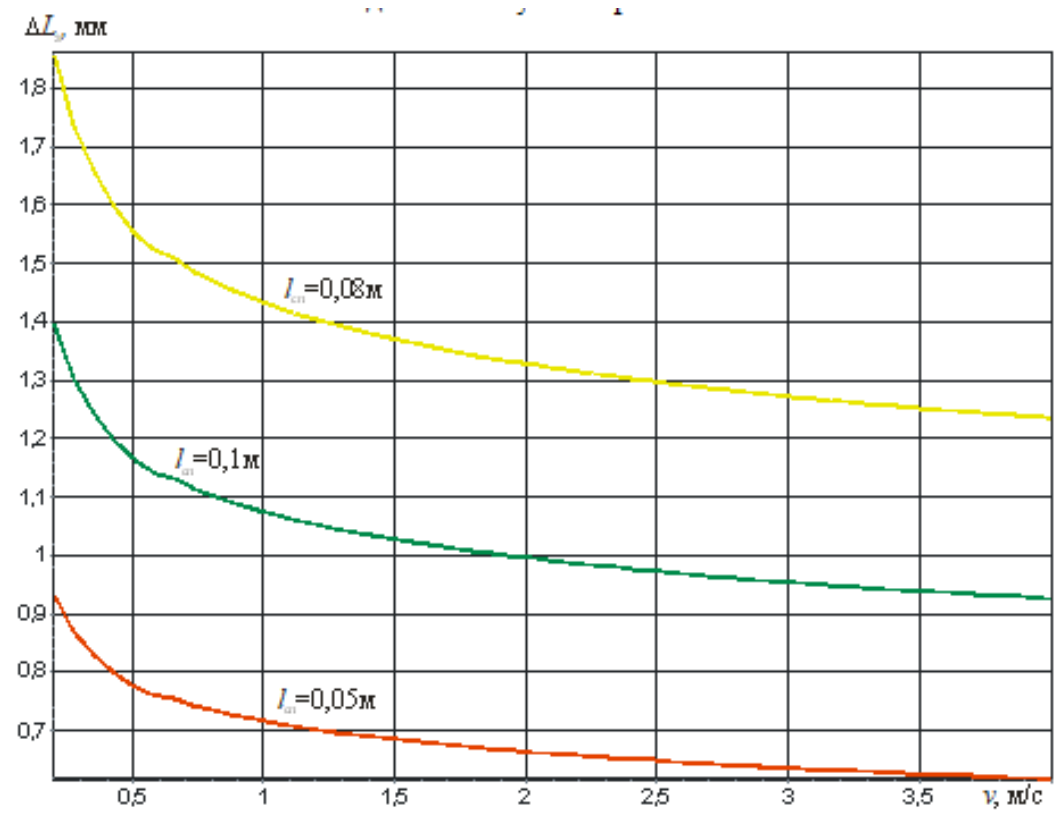


Рисунок 4 – Зависимости длин участков заготовки с непрерывным резанием  $\Delta L_3$  от скорости резания  $v$

Анализ результатов исследований показывает, что периодичность резания зависит от комплекса технологических условий обработки, в том числе физико-механических свойств обрабатываемого и инструментального материалов, режимов резания, геометрии инструмента. Частота прерываний подачи  $z = L_3/\Delta L_3$  уменьшаются при уменьшении диаметра заготовки  $D$ , главного угла в плане  $\varphi$ , радиуса при вершине  $r$ , скорости резания  $v$  и увеличении переднего угла  $\gamma$ , ширины порошка  $L_n$ , глубины резания  $t$ .

### **Заключение**

Разработанный метод расчета периодичности дробления многовитковой сливной стружки в зависимости от технологических условий резания позволяет определять рациональные условия принудительного стружкодробления и может быть использован для совершенствования кинематических методов стружкодробления с применением систем с ЧПУ.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Федотова А.М., Гасюк Д.П. Анализ рисков возникновения проблем с качеством технологической подготовки производства и разработка мероприятий по их снижению в условиях АО "НИИЭФА" // *Металлообработка*. 2021. № 1 (121). С. 50-54.

2. Косова В.А., Гасюк Д.П. К вопросу анализа условий разработки технологических процессов машиностроительных предприятий // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2021. № 2. С. 655-658.

3. Романов, В. В. Программное динамическое управление стружкодроблением при резании металлов [Текст] / В. В. Романов, С. В. Михайлов // *Современные технологии в машиностроении: Сборник статей VII Всероссийской научно-практической конференции*. – Пенза, 2003. – С. 73–75.

4. Безъязычный, В. Ф. Оптимизация конструкций и условий эксплуатации инструментов со стружкозавивающей поверхностью [Текст] / В.Ф. Безъязычный, С.В. Михайлов, Д.С. Скворцов // *Инженерный журнал. Справочник. Приложение №8 – 2007 – №8* – С. 16-19.

5. Лавров, Н. К. Завивание и дробление стружки в процессе резания [Текст] / Н. К. Лавров. – М. : Машиностроение, 1971. – 88 с.

6. ГОСТ 2787-75. Металлы черные вторичные.

# Компьютерные технологии в машиностроении

УДК 621.8

Н.Д. Васильев, Д.О. Васильев  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого  
Санкт-Петербург, Россия, [vasilyevnd@gmail.com](mailto:vasilyevnd@gmail.com)

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ВИРТУАЛЬНОГО ПРОТОТИПИРОВАНИЯ ПРИ СОЗДАНИИ ТРОФИ ТРАКА

### Аннотация

В работе рассмотрены преимущества применения компьютерных технологий в машиностроении при работе над сложными инженерными проектами, а также представлена часть процесса разработки и создания автомобиля класса трофи трак.

*Ключевые слова:* компьютерные технологии, прототипирование, трофи трак, компьютерное моделирование и визуализация.

### Введение

Машиностроение одна из старейших и главнейших отраслей промышленности. Как и любая другая область, машиностроение не могло обойтись без модернизации и внедрения новых технологий. Ещё совсем недавно не было даже такого понятия, а сегодня без компьютерных технологий не обходится ни одно промышленное предприятие. Они существенно облегчают не только труд работников, но и улучшают процесс производства в целом [1- 6].

Применение компьютерных технологий позволяет усовершенствовать технологию проектирования и производства, автоматизировать многие процессы, что сокращает сроки разработки и внедрения новой продукции, повышает её качество [7 - 13].

Компьютерные технологии направлены на создание точного и подробного макета изделия в целом и его отдельных, сложных узлов. Они позволяют проводить различные расчёты (кинематики, прочности, аэродинамики и т. п.) и оперативно анализировать полученные результаты.

Цель проекта: создание трофи трака, близкого по характеристикам к американскому sidebysideCanAmMaverik с минимальным бюджетом и с использованием максимально доступных агрегатов. (Рисунок 1).

Методы: для достижения поставленной цели при разработке трофи трака мы использовали технологию 3Dсканирования и САД систему Creo 7.0.

### Проектирование и изготовление трофи трака

Классический подход к разработке инженерного проекта основывается на многочисленных повторениях процессов проектирования и последующего построения дорогостоящих и трудоемких физических прототипов. Компьютерное моделирование и визуализация позволяют значительно сократить этот процесс. [14]. В отличие от классического проектирования, при котором сначала разрабатываются

все компоненты по отдельности, а затем они, за несколько повторений, соединяются вместе, компьютерное моделирование сразу предполагает работу с прототипом всего изделия, начиная с ранних этапов разработки и до её окончания. Это позволяет при изменении какой-то части проекта более четко понимать, как изменится весь проект в целом. Такой подход обеспечивает существенные преимущества при проектировании сложных систем, в создании которых задействовано большое количество разработчиков [15].



Рисунок 1 – Общий вид готового проекта

Для автомобилей класса трофи трек характерны большой ход подвески и внедорожные колёса большого диаметра. Было принято решение делать автомобиль классической компоновки: двигатель спереди, ведущие колёса задние, спереди независимая двухрычажная подвеска, сзади зависимая 4link с ходом подвески каждого колеса 500мм.

По серии фотографий партнеры проекта из ООО «Системы компьютерного моделирования» сгенерировали полигональную модель с текстурой силового агрегата, точности которой вполне достаточно для компоновки. Этим же способом была создана модель раллийного каркаса ВАЗ 2108, который послужил основой центральной части рамы. 3Dмодели остальных покупных компонентов были изготовлены по чертежам, а также с помощью обмера уже приобретенных деталей.

Проанализировав характеристики различных агрегатов, рассчитав скоростные характеристики, совместимость по максимальному крутящему моменту различных агрегатов, выбрали двигатель ВАЗ 21124 мощностью 88 л.с. Он хорошо зарекомендовал себя в спорте и поддается форсировке. КПП от ВАЗ 2106 четырехступенчатая. Она более надёжная, а пятая передача была бы лишней по передаточному отношению. Подобное сочетание часто применяется в дрифте на классических моделях ВАЗ и доказало свою надежность. На моделях переднеприводного семейства ВАЗ первичный вал КПП не стыкуется непосредственно с валом двигателя, а в классических моделях он опирается на шариковый подшипник, запрессованный в коленчатый вал. Поэтому для стыковки двигателя и КПП пришлось снять и доработать заднюю часть коленчатого вала двигателя под установку подшипника. Также понадобился измененный маховик под стартер от классического автомобиля ВАЗ.

Задний мост выбран «Тимкен» от УАЗ из-за возможности установки главной пары с большим передаточным отношением, а также из-за конструкции с разгруженными полуосями и достаточным запасом прочности при установке внедорожных колёс диаметром 33 дюйма. Дифференциал заблокировали для лучшей проходимости и более предсказуемого поведения автомобиля на грунтовой дороге.

Чтобы сделать максимальным дорожный просвет, дно сделано не плоским, а в виде рампы. При этом спортивные сиденья установлены практически на полу.

Достаточно много времени ушло на разработку задней подвески 4 link. Из-за достаточно высоко расположенной передней точки карданного вала стало понятно, что передний кардан будет работать со значительными углами, заднюю же точку кардана было необходимо поднять как можно выше, чтобы максимально защитить её от возможных контактов с грунтом. Для оценки неравномерности вращения карданного вала была создана его схематичная модель и проанализирована его кинематика при работе с различными углами наклона. Анализ показал, что при угле наклона  $25^\circ$  неравномерность вращения составляет 17.8%. (Рисунок 2). В таких условиях неизбежны вибрации и быстрый износ переднего кардана и других элементов трансмиссии. По этим причинам было принято решение применить шарниры равных угловых скоростей (ШРУС). Из наиболее доступных подошел ШРУС от автомобиля Нива, к тому же он полностью совместим с хвостовиком КПП ВАЗ 2106. Кроме достаточно большого угла поворота, ШРУСы обеспечили возможность осевого смещения фланцев вала на 3 см. Поэтому было решено отказаться от шлицевого соединения, то есть спроектировать подвеску так, чтобы расстояние между шарнирами при всём диапазоне работы подвески менялось в пределах 1 см, что смогут компенсировать ШРУСы.

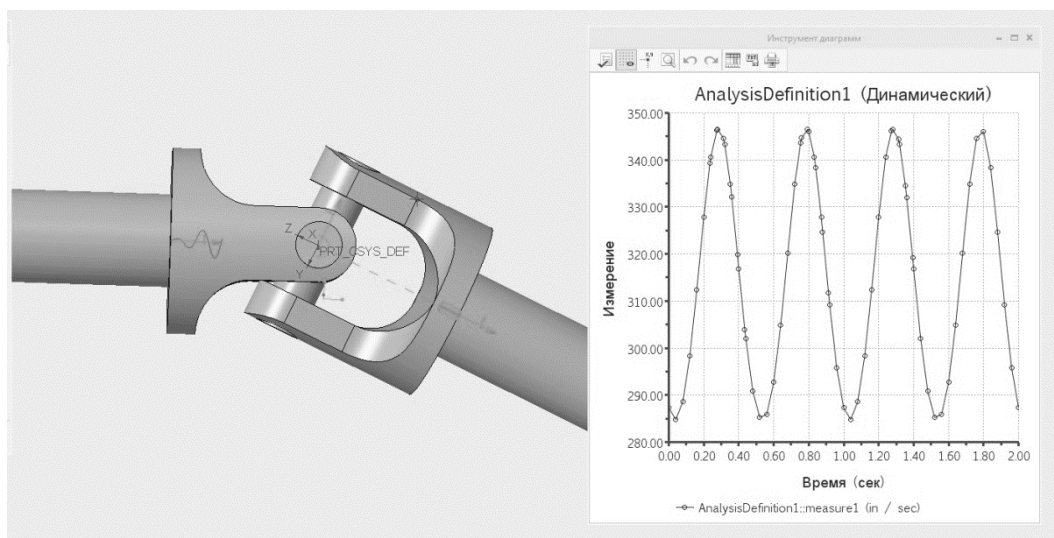


Рисунок 2 – График скорости выходного вала при угле  $25^\circ$

Стойки подвески должны быть регулируемы по сопротивлению сжатия и отбоя и обеспечить запланированный ход подвески.

В качестве основы стоек передней и задней подвески был выбран амортизатор КАМАЗ с ходом 350мм. Это разборный амортизатор, его сопротивление сжатия и отбоя обеспечивается отдельными наборами пружинных пластин, перекрывающих отверстия в поршне амортизатора. Меняя количество пластин, можно менять сопротивление амортизатора. Исходя из предполагаемой массы автомобиля и передаточного отношения подвески, в качестве упругого элемента стойки выбраны



две последовательно установленные пружины передней подвески классического ВАЗ. Для установки пружин к стакану амортизатора приварена нижняя опора пружины, точка сопряжения пружин размещена на подвижном слайдере, обеспечивающем скольжение пружин по стакану амортизатора. Верхняя опора пружины сделана закладной, легко съемной, позволяющей разобрать и собрать стойку в считанные минуты. (Рисунок 3). Для этого достаточно сжать пружины и извлечь верхнюю опору. Все 4 стойки одинаковые по конструкции, передние и задние различаются только настройкой сопротивления.

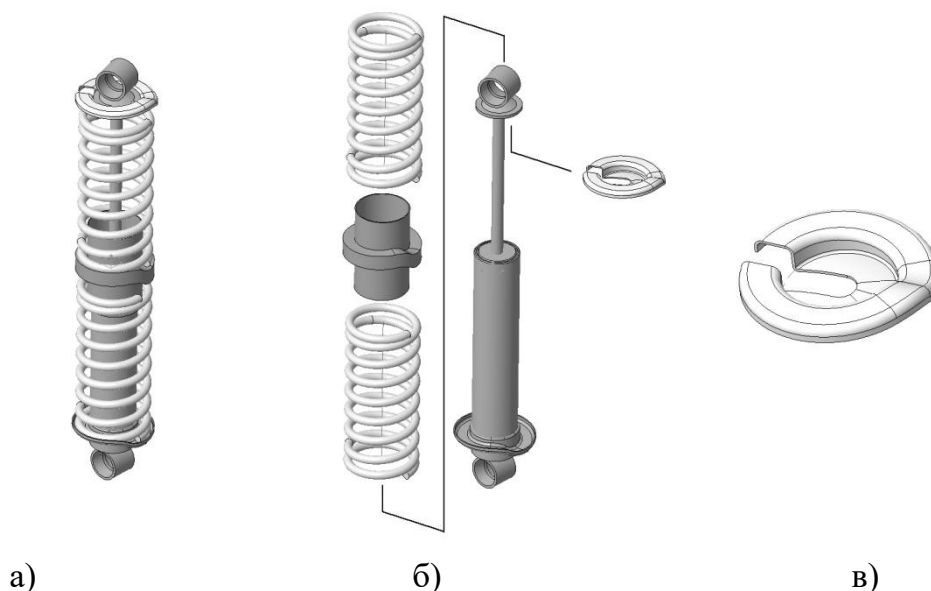


Рисунок 3 – Конструкция стойки подвески: а) стойка в сборе; б) процесс сборки стойки (разнесённый вид); в) закладная верхняя опора пружины

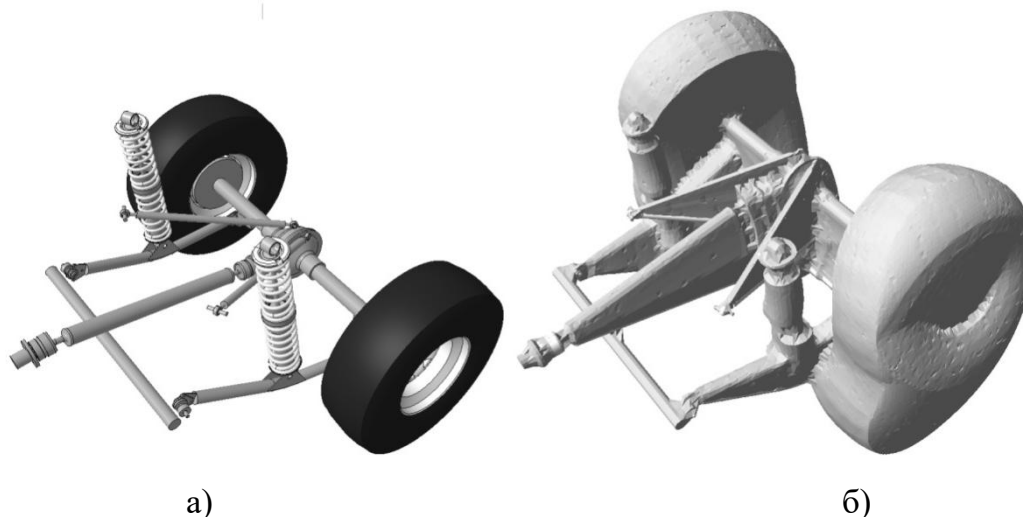
При проектировании геометрии задней подвески необходимо было:

- учитывать максимальный ход стоек, максимальные углы поворота ШС, максимальный угол ШРУСов;
- добиться минимального изменения длины карданного вала во всём диапазоне работы подвески, минимизировать подруливание задней оси.

Для анализа всех этих параметров в готовой параметрической 3Dмодели была создана анимация полного диапазона движения стоек, и проведен кинематический анализ работы всех элементов подвески. Анализ позволил найти оптимальные точки расположения рычагов, их длины, также убедиться, что не превышены максимальные углы поворота всех шарниров. Нами были построены траекторные кривые движения интересующих точек, после выбора геометрических параметров было построено облако перемещения подвески. (Рисунок 4). Это полигональный объект, за границы которого не выходит ни один подвижный элемент анимированной сборки, который был использован для проектирования рамы над задним мостом, чтобы предотвратить возможные контакты.

При разработке передней подвески требовалось реализовать запланированный ход. Для этого рычаги подвески следует делать максимально длинными, но не увеличивать ширину автомобиля. Поэтому оси качания рычагов нужно максимально смещать к центру машины. Смещение к центру осей рычагов должно сопровождаться смещением к центру внутренних шарниров рулевых тяг. Из наиболее доступных рулевых реек с близко расположенными шарнирами была выбрана рулевая рейка с

гидроусилителем от ВАЗ 2112. Поворотные кулаки были выбраны от автомобиля Нива. С помощью САДмоделирования были найдены расположения осей и длины рычагов передней подвески, причем нижние рычаги расположены на одной оси по центру автомобиля. Благодаря длинным рычагам удалось обеспечить запланированный ход подвески, не превышая максимальные углы поворота стандартных шаровых шарниров и рулевых наконечников Нива.



а) б)  
Рисунок 4 – Задняя подвеска: а) подвеска в сборе;  
б) облако перемещения задней подвески

### **Заключение**

В итоге проект был полностью реализован за 3,5 месяца. Такой результат получен благодаря широкому применению САДтехнологий: во время сборки не понадобилось переделывать, модифицировать конструкцию.

В условиях динамично развивающегося рынка САПР знание основ трехмерного моделирования, параметризации, создания чертежей в САД-системе является необходимым для инженера-конструктора. Технический специалист, кроме знаний в своей области, должен хорошо владеть навыками автоматизированного проектирования, это позволит легко, точно, а главное, быстро решать поставленные задачи в графическом редакторе или в расчетной системе.

В настоящее время идёт работа над новым проектом. Проработка эргономики рабочего места, оптимизация доступа к основным агрегатам для обслуживания и ремонта ведётся с использованием технологии виртуальной реальности (VR).

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Сауренко Т.Н., Чварков С.В. Экономическая политика в системе национальной безопасности Российской Федерации // Национальные приоритеты России. 2016. № 3 (21). С. 22-32.
2. Гасюк Д.П., Филатов И.Н. Информационное обеспечение процесса обоснования требований к уровню унификации продукции // Труды международного симпозиума "Надежность и качество". 2007. Т. 1. С. 15-18.
3. Тебекин А.В. Обеспечение качества жизни в городской среде с помощью технологий "умный город" / А.В. Тебекин, Е.Г. Анисимов [и др.] // Транспортное дело России. 2020. № 2. С. 11-17.

4. Солохов И.В. Проблемы научно-методического обеспечения межведомственного информационного взаимодействия // Военная мысль. 2017. № 12. С. 45-51.
5. Федотова А.М., Гасюк Д.П. Анализ рисков возникновения проблем с качеством технологической подготовки производства и разработка мероприятий по их снижению в условиях АО "НИИЭФА" // Металлообработка. 2021. № 1 (121). С. 50-54.
6. Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г., Босов Д.Б. Сетевые модели и методы ресурсно-временной оптимизации в управлении инновационными проектами.- Москва, 2006.- 117 с.
7. Гарькушев А.Ю., Селиванов А.А., Чварков С.В. Сущность и проблемы управления обеспечением безопасности и обороной государства // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. 2016. № 3 (93). С. 3-10.
8. Зегжда П.Д. Модели и метод поддержки принятия решений по обеспечению информационной безопасности информационно-управляющих систем / П.Д. Зегжда [и др.] // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. 2018. № 1. С. 43-47.
9. Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г., Быстров А.Г., Лобас Е.В. Метод оценивания обоснованности управленческих решений// Вестник Российской таможенной академии. 2008. № 2. С. 103-106.
10. Ведерников Ю.В. Модели и алгоритмы интеллектуализации автоматизированного управления диверсификацией деятельности промышленного предприятия / Ю.В. Ведерников, А.Ю. Гарькушев [и др.] // Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. 2014. № 5-6 (71-72). С. 61-72.
11. Ильин И.В. Математические методы и инструментальные средства оценивания эффективности инвестиций в инновационные проекты / И.В. Ильин [и др.]. - Санкт-Петербург, 2018.- 289 с.
12. Авдеев М.М. Информационно-статистические методы в управлении микроэкономическими системами / М.М. Авдеев [и др.].- Санкт-Петербург; Тула. 2001. 139 с.
13. Касяненко Е.О., Гасюк Д.П. Применение процессного подхода для оптимальной работы предприятия // В сборнике: Неделя науки СПбПУ: материалы научной конференции с международным участием. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. 2016. С. 26-29.
14. Косенко И.И., Кузнецова Л.В., Николаев А.В. Моделирование и виртуальное прототипирование: Учебное пособие. - Москва: Альфа-М: ИНФРА-М, 2012. - 176 с.
15. Вигер И.Н. Возможности технологии виртуального прототипирования на всех этапах жизненного цикла продукта // Журнал «Машиностроение и смежные отрасли». - 2016. - № 108. – С. 48-53.

Т.А. Рад<sup>1</sup>, В.М. Голод<sup>1</sup>, М.В. Иксанов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Санкт-Петербург, Россия, [radg1@yandex.ru](mailto:radg1@yandex.ru)

<sup>2</sup>НИЦ «Курчатовский институт» - ЦНИИ КМ «Прометей»,  
Санкт-Петербург, Россия

## ПРИМЕНЕНИЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ОТЛИВОК ИЗ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ ДЛЯ ИЗДЕЛИЙ МАШИНОСТРОЕНИЯ

### Аннотация

В работе с использованием термодинамического моделирования и методов математической статистики исследовано влияние химического состава литейного титанового сплава 5ВЛ (системы легирования Ti-Al) на его физико-химические и теплофизические характеристики. На основе проведённого анализа построены уравнения регрессии для температур ликвидуса и солидуса, интервала кристаллизации и скрытой теплоты кристаллизации в зависимости от содержания легирующих элементов и контролируемых примесей в пределах марочного состава.

*Ключевые слова:* литейные титановые сплавы, термодинамическое моделирование, математическая статистика, физико-химические и теплофизические свойства

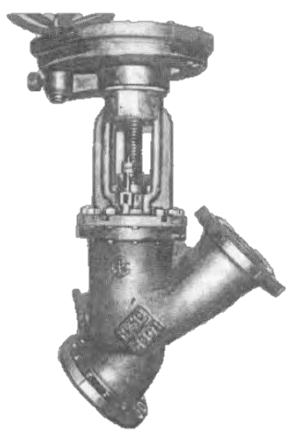
### Введение

На протяжении примерно полувека отливки из титановых сплавов, разработанных НИЦ «Курчатовский институт» - ЦНИИ КМ «Прометей», активно используются в изделиях судового [1] и энергетического [2, 3] машиностроения. В зависимости от условий эксплуатации отливок при их производстве применяют титановые сплавы различных систем легирования и классов – такие, как  $\alpha$ -сплав ТЛЗ (Ti-3.75Al) и псевдо- $\alpha$  сплав 5ВЛ (5.5Al-1.5V-1.5Mo-0.09C). Отливки из сплава ТЛЗ, имеющего удовлетворительную прочность и хорошую пластичность, составляют 85% от общего выпуска титановых отливок для изделий судового машиностроения – таких, как арматура, клапана, насосы и т.д. (рис. 1,а). Сплав 5ВЛ благодаря повышенным характеристикам жаропрочности применяются при изготовлении отливок для элементов изделий энергетического оборудования в ОАО «Калужский турбинный завод» (рис. 1б).

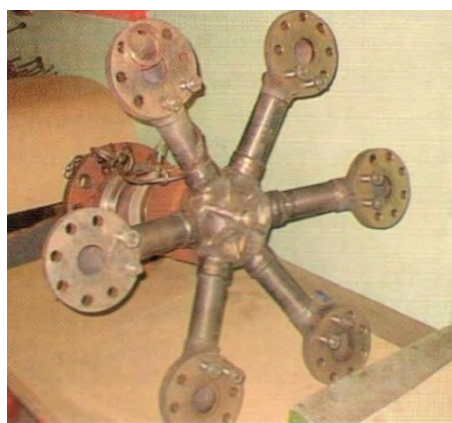
Несмотря на значительный возраст применяемых литейных титановых сплавов и технологии получения отливок из них в арсенале инструментов инженеров-технологов по разработке литниково-питающей системы фрагментарно используются современные достижения САД-, САЕ- и других программных комплексов. Для внедрения последних достижений технологического проектирования в производство титановых отливок, позволяющего повысить уровень принимаемых инженерами технологических решений, предложено [4] сформировать интегрированный программный комплекс по компьютерному моделированию литейных процессов при изготовлении отливок из титановых сплавов. В перспективе предлагаемый интегральный комплекс планируется сделать составной частью «цифровой» трансформации литейного производства, которая в перспективе позволит объединить

в единую связанную систему процессы проектирования отливок, разработки литейной технологии, подготовки и организации производства и т.д.

Одной из базовых функций подобного интегрального комплекса является термодинамическое моделирование равновесных фазовых превращений, позволяющее рассчитывать показатели физико-химических, термодинамических, теплофизических и литейных параметров титановых сплавов и их изменение в температурном интервале кристаллизации, включая его дальнейшее развитие для учёта неравновесного характера кристаллизации. Ранее [4,5] была разработана методика и проведён термодинамический анализ литейного сплава ТЛЗ, в также разработаны модели температурно-зависимых характеристик сплава, рекомендуемые в качестве информационного обеспечения в имеющихся системах компьютерного моделирования литейных процессов. В настоящей работе с использованием разработанной методики выполнен термодинамический анализ литейного титанового псевдо- $\alpha$  сплава 5ВЛ, построены модели его температурно-зависимых характеристик и проведён сравнительный анализ результатов, полученных для сплава 5ВЛ, с ранее полученными моделями сплава ТЛЗ.



а)



б)

Рисунок 1 – Общий вид изделий (отливок): а) клапан с корпусом из сплава ТЛЗ [1], б) патрубки подвода пара к соплам [3].

### Материалы и методы исследования

Литейный сплав 5ВЛ относится к классу псевдо- $\alpha$  титановых сплавов, содержащих 8-10 %  $\beta$ -фазы, и использует систему легирования Ti-Al-V-Mo-C. Кроме легирующих элементов, при расчёте характеристик сплава методом термодинамического моделирования учитывали содержание контролируемых и регламентируемых примесей, как негетовых (Fe и Si), так и гетовых (O, N, H), что связано с их высоким влиянием на характеристики сплава [6, 7]. Таким образом, при проведении термодинамических расчётов для сплава 5ВЛ в качестве исходных данных задавали значения для 9 компонентов сплава.

При изучении покомпонентного влияния химического состава на характеристики сплава 5ВЛ применяли методы, описанные и использованные при термодинамическом анализе сплава ТЛЗ [5]. Метод основан на получении статистических моделей для характеристик сплава в зависимости от химического состава путём разработки статистических моделей с использованием методов математической статистики и планирования экспериментов [8-9] на основе программного комплекса термодинамического моделирования титановых сплавов *POLY THERM-Ti*, разработанного в СПбПУ Петра Великого [10].

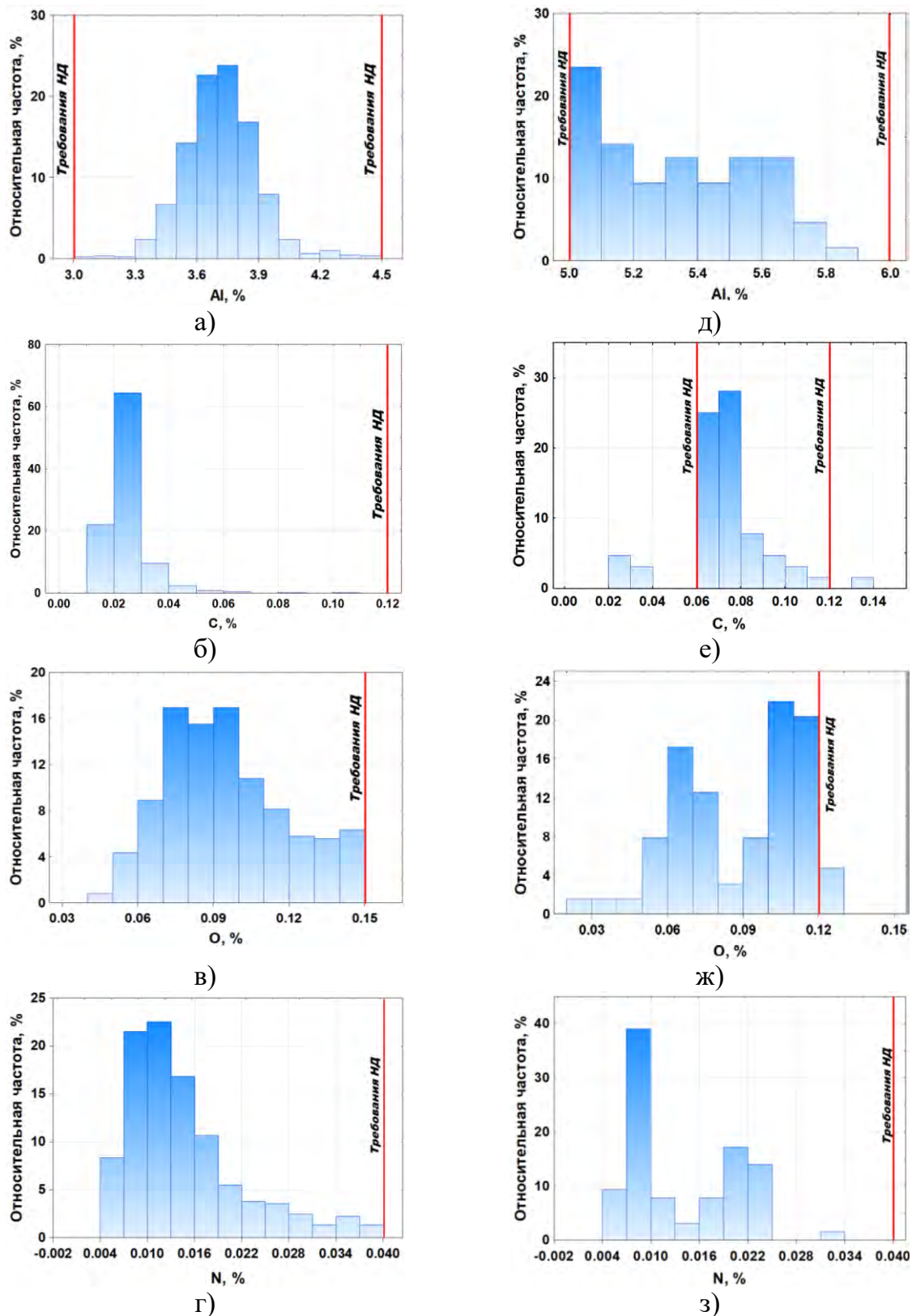


Рисунок 1 – Гистограммы распределения содержания алюминия (а, д), углерода (б, е), кислорода (в, ж) и азота (г, з) в отливках из сплавов ТЛЗ (а-г) и 5ВЛ(д-з)

Для детального анализа и визуализации рассматриваемых результатов статистической обработки на рис. 1 приведены гистограммы распределения некоторых компонентов сплава (Al, C, O, N) в отливках сплава 5ВЛ в сравнении со сплавом ТЛЗ. Анализ гистограмм сплава 5ВЛ показывает, что все распределения

носят асимметричный характер и отличаются между собой. Распределение легирующих элементов Al (рис. 2,д) и С (рис. 2,е) охватывает весь допустимый интервал легирования и сосредоточено у нижней границы. Распределение О (рис. 2,ж) и N (рис. 2,з) имеет два локальных максимума, что при детальном анализе позволяет их связать с годом изготовления отливок.

Сравнительный анализ гистограмм распределения для сплавов ТЛЗ и 5ВЛ свидетельствует о существенных различиях в распределении алюминия (рис. 2, а и 2,д), что может быть связано с вероятным нарушением технологического процесса либо при изготовлении отливок, либо при производстве шихтовых материалов.

### Результаты и их обсуждение

С помощью программного комплекса термодинамического моделирования «POLYTHERM-Ti» для сплава 5ВЛ определен набор базовых физико-химических ( $t_L$ ,  $t_S$ ,  $\rho_L$ ,  $\rho_S$ ) и теплофизических ( $c$ ,  $L$ ) характеристик сплавов.

Результаты статистического анализа данных термодинамического моделирования сплава 5ВЛ позволяют количественно оценить влияние варьирования химического состава сплава в пределах марочного состава на его *равновесные* характеристики. Наибольшее влияние химический состав сплава оказывает на температуры ликвидуса и солидуса, что может приводить к изменению интервала кристаллизации в пределах от 20 до 75 К. Влияние химического состава на значение скрытой теплоты кристаллизации, варьирующей в пределах от 1462 до 1710 МДж/м<sup>3</sup>, изменяется на 15%. Таким образом, использование осреднённых значений вместо фактических при проведении компьютерных расчётов может приводить к значительным отклонениям в результатах.

При совместном использовании аппарата термодинамического моделирования, методики планирования экспериментов и средств математической статистики для сплава 5ВЛ получены регрессионные уравнения (1-7), в которых опущены статистически незначимые факторы:

$$t_L = 1708,0 + 3,53x_1 - 514,71x_2 + 28,8x_3 - 13,14x_4 + 1440,00x_5 - 12,26x_6 - 18,18x_7 + 3,76x_8 - 21,36x_9 - 88,24x_1x_2 + 1000,00x_2x_5 - 1440,00x_2x_9 \text{ (}^\circ\text{C)}; \quad (1)$$

$$t_S = 1652,45 + 1,76x_3 - 38,00x_4 + 8000,00x_5 - 0,95x_6 - 47,82x_7 + 1,48x_8 + 27,12x_9 - 8000,00x_2x_9 - 36,95x_4x_8 \text{ (}^\circ\text{C)}; \quad (2)$$

$$\Delta t_{LS} = 76,35 - 911,76x_2 + 24,95x_4 - 6560,00x_5 + 2,26x_8 - 47,21x_9 + 911,76x_2x_5 - 6560,00x_2x_9 + 36,95x_4x_8 \text{ (}^\circ\text{C)}; \quad (3)$$

$$L = 1620,46 - 3643,53x_2 + 445,6x_3 + 266,38x_4 + 22530,00x_5 + 32,82x_8 - 173,92x_9 + 3643,53x_2x_5 + 22530,00x_2x_9 \text{ (МДж/м}^3\text{)}; \quad (4)$$

$$\rho_L = 4104,46 - 35,62x_1 - 123,8x_3 + 25,00x_9 \text{ (кг/м}^3\text{)}; \quad (5)$$

$$\rho_S = 4154,90 - 33,32x_1 + 49,14x_4 + 15,32x_8 + 28,44x_9 \text{ (кг/м}^3\text{)}; \quad (6)$$

где содержание компонентов в сплаве в вес. %:  $x_1$  – Al,  $x_2$  – N,  $x_3$  – O,  $x_4$  – Fe,  $x_5$  – H,  $x_6$  – C,  $x_7$  – Si,  $x_8$  – V,  $x_9$  – Mo.

Практическое применение полученных моделей (уравнения 1–6) для температурно-зависимых характеристик сплавов 5ВЛ и ТЛЗ [4] позволяет радикально модифицировать информационное обеспечение для различных систем

компьютерного моделирования литейных процессов (Полигон, LWMFlow, POLYCAST, ProCast и др.).

Непосредственный интерес представляет изучение покомпонентного влияния химического состава для различных титановых сплавов, что может быть использовано при разработке новых литейных титановых сплавов на стадиях поисковых работ и особенно актуально для развития экономнолегированных титановых сплавов, а также оптимизации составов существующих сплавов.

### **Заключение**

В работе путём совместного использования термодинамического моделирования и методов статистической обработки данных планируемого эксперимента построены регрессионные модели зависимости ряда равновесных физико-химических и теплофизических характеристик многокомпонентного литейного титанового сплава 5ВЛ от его химического состава. Полученные модели позволили оценить степень влияния каждого из компонентов сплава на исследуемые характеристики, которые непосредственно влияют на ход литейных процессов.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Ушков С.С. и др. Производство и применение литых изделий из сплавов на основе титана // Вопросы материаловедения. - 1999. - №3. - С. 126-137.
2. Кудрявцев А.С., Молчанова Н.Ф., Травин В.В. Высокопрочные свариваемые литейные титановые сплавы для энергетического оборудования // Вопросы материаловедения. - 2009. - №3. - С. 162-171.
3. Кудрявцев А.С., Молчанова Н.Ф., Травин В.В. Свариваемые литейные титановые сплавы в элементах оборудования энергетических комплексов // Титан. - 2009. - №2. - С. 47-53.
4. Рад Т.А. и др. Термодинамический анализ литейных титановых сплавов - основа информационного обеспечения при разработке оптимальной литейной технологии // Литьё и металлургия. - 2022. - №1. - С. 25-31.
5. Рад Т.А. и др. Количественный термодинамический анализ влияния химического состава литейного титанового сплава ТЛЗ (система Ti-Al) на его характеристики. // Письма о материалах - принято к опубликованию.
6. Иксанов М.В. Компьютерный термодинамический анализ литейного титанового сплава системы Ti-Al-V / М.В. Иксанов, В.М. Голод // Литейное производство сегодня и завтра; Сб. науч. тр. - СПб.: Изд-во Культ-информ-пресс, 2018. - С. 340-346.
7. Nastac L. Advances in investment casting of Ti-6Al-4V alloy: a review / L. Nastac, M. N. Gungor, I. Ucoq et al. // Int. J. Cast Metals Research. - 2006. - Vol. 19, № 2. - P.73 - 93.
8. Адлер Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский. - М.: Наука, 1976. - 280 с.
9. Новик Ф.С. Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования экспериментов / Ф.С. Новик, Я.Б. Арсов. - М.: Машиностроение, 1980. - 304 с.
10. Савельев К.Д., Голод В. М. Программный комплекс «POLYTHERM-Ti» // Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2018618842 от 20.07.2018 г.



И.А. Васильев  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Санкт-Петербург, Россия, [vasiliev\\_ia@spbstu.ru](mailto:vasiliev_ia@spbstu.ru)

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ ДЛЯ ДЕТАЛЕЙ ИЗ МАЛОУГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ

### Аннотация

Проанализированы результаты экспериментального исследования трещиностойкости сталей в условиях отрицательных температур. Получены параметры напряженно-деформированного состояния материала в области трещины в момент разрушения. Предложен параметр  $S$ , как базовая константа материала, и получено его значение для малоуглеродистых низкопрочных сталей  $S=3,75\pm 0,1$ .

*Ключевые слова:* прочность, напряжения отрыва, хрупкое разрушение, нелинейная механика разрушения, метод конечных элементов, упругопластическая деформация, жесткость напряженного состояния.

### Введение

Освоение арктического региона требует использования различного технологического оборудования и возведением сооружений. Несущую функцию подавляющего большинства таких объектов выполняет металлическая конструкция. Подтверждение несущей способности металлических конструкций, эксплуатируемых в условиях климатических температур на этапе проектирования не ограничивается только базовыми проверками на прочность, статическую и динамическую жесткость, устойчивость и пр. При проектировании конструкций, эксплуатируемых при отрицательных температурах, необходима оценка возможности хрупкого разрушения для чего используются критерии линейной и нелинейной механики разрушения ( $K_{Ic}$ ,  $J$ -интеграл,  $CTOD$ ). Однако применение данных методов требуют больших инженерных ресурсов, что обычно не применимо при проектировании строительной и подъемной техники и других сооружений не специального назначения. Основным нормативным инструментом обеспечения несущей способности конструкций при низких температурах на этапе проектирования в настоящее время является выбор стали с определенным значением ударной вязкости [1, 2], что не учитывает конструктивно-технологических особенностей конструкции, концентрации напряжений, остаточных сварных напряжения и пр.

На сегодняшний день в научной литературе опубликованы различные инструменты механики разрушения, включающие в себя, поли-параметрические методики оценки хрупкого и квазихрупкого разрушения [3-5]. Однако большинство из них имеет те же недостатки, с точки зрения проектирования неспециального оборудования, что и классические инструменты нелинейной механики разрушения. Разрабатываемая инженерная методика оценки прочности конструкций, эксплуатируемых в условиях низких климатических температур, основана на локальном подходе Нейбера-Новожилова и обобщенной теории хрупкого разрушения, сформулированной Л. А. Копельманом [6]:

$$\sigma_e \geq \sigma_T(T), \quad \sigma_1 \geq S_c \quad (1)$$

где  $\sigma_e$  и  $\sigma_1$  – интенсивность напряжений и первое главное напряжение;  
 $\sigma_T$  и  $S_c$  – предел текучести и напряжение отрыва для данного материала.

При этом оба условия должны выполняться одновременно, иначе, возможно значительное пластическое течение и, как следствие, притупление вершины трещины. В таком случае разрушение развивается не по хрупкому сценарию.

В рамках инженерного расчета работа с первым условием не представляет сложности, так как критерием данного условия служит предел текучести – справочная величина. Второе условие, не разработано в достаточной степени для применения в инженерной практике.

Актуальность разрабатываемой методики с применением локального критерия прочности подтверждается возможностью её применения в конечно-элементном анализе, где проблема возникновения локальных зон с высоким уровнем напряжений встречается достаточно часто, а классические теории прочности не позволяют находить оптимальное по металлоёмкости решение.

Целью данного этапа работы является определение величины напряжений нормального отрыва  $S_c$  для конструкционных сталей, который является критерием прочности в методике прогнозирования хрупкого разрушения элементов конструкции. Главной задачей работы ставилось определение критических значений напряженно-деформированного состояния в области вершины трещины в момент разрушения.

### Методы

В настоящей работе использовались, представленные в научной литературе, данные экспериментов по малоуглеродистым нелегированным сталям с пределом текучести не более 310 МПа. К этим данным относятся температурные зависимости критического коэффициента интенсивности напряжений  $K_c(T)$  и предела текучести  $\sigma_T(T)$  в диапазоне температур  $T$  от минус 200° С до 20°С, геометрические параметры образцов и другие условия эксперимента. На основании этих данных была подготовлена серия конечно-элементных (КЭ) моделей соответствующей формы и размеров [7–9]. В источнике [9] авторы используют специальное обозначение сталей LB, LD, HA и HC, согласно приведённому составу, соответствуют типовой конструкционной малоуглеродистой стали с разной термообработкой и, как следствие, разным размером зерна. Большая часть рассмотренных результатов была получена на компактных образцах CTASTM. Также использовались плоские пластины с двумя краевыми пропилами [8]. В таблице 1 приведены данные рассмотренных материалов.

Таблица 1– Данные испытанных образцов.

№ п/п	Марка или обозначение стали	$\sigma_T$ , МПа	Тип образца	Толщина образца, мм	Размер зерна, мкм	Источник
1	C10	201	CT ASTM	12,5	64	7
		286		12,5	20	
3	22К	309	9p	20	н/д	8
4	LB	274	CT ASTM	15	18,7	9
5	LD	209			56,2	
6	HA	298			14,3	
7	HC	207			48,7	

Во всех подготовленных КЭ моделях был одинаковый характерный размер элементов типа Brick в области вершины трещины, равный 0,17x0,17мм. Модель материала задавалась билинейной диаграммой с пределом текучести при температуре эксперимента и модулем пластического упрочнения, определяемого по формуле [10]:

$$G_p = \frac{1,1 \cdot \sigma_B - \sigma_T}{0,5 \cdot \delta} \quad (2)$$

В результате КЭ анализа были получены значения интенсивности напряжений  $\sigma_i$ , первого главного напряжения  $\sigma_1$ , а также величина пластических деформаций  $e_{pl}$ . Значения указанных параметров НДС вычислялись как среднее в расчетной зоне 0,5x0,7 мм в области вершины трещины. Обоснование размера зоны усреднения дается в работе [10].

Для унификации результатов анализа при различных условиях, введены безразмерные параметры:

$$s_1 = \frac{\sigma_1}{\sigma_T(T)} = \frac{\sigma_1}{\sigma_T \cdot \gamma(T)}, \quad (3)$$

$$k = \frac{K}{\sigma_T \cdot \gamma(T) \cdot \sqrt{\pi \cdot r_0}} \quad (4)$$

где  $\gamma(T)$  – коэффициент повышения предела текучести с понижением температуры [11];

$K_1$  – коэффициент интенсивности напряжений;

$r_0$  – размер зоны усреднения вдоль берега трещины,  $r_0=0,5$ мм.

По результатам КЭ анализа построены графики зависимости  $s_1(k)$ , коэффициента жесткости НДС  $\eta(k)$  и пластической деформации  $e_{pl}(k)$ , на рис.1 представлены результаты для стали С10 с зерном 20 и 64 мкм, точками обозначены моменты разрушения образца.

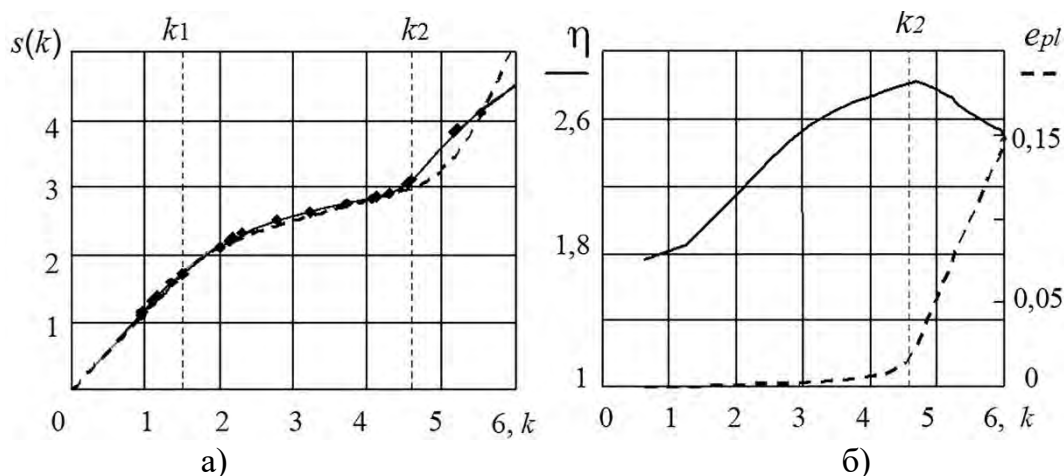


Рисунок 1: а) – график функции  $s(k)$ ,  $\blacklozenge$  - точки, соответствующие разрушению образца; зависимость коэффициента жесткости напряженно-деформированного состояния; б) – график зависимости коэффициента жесткости НДС  $\eta(k)$

Для формализации левой части второго условия (1) в предшествующем исследовании была получена математическая модель  $s_1(k)$  [12] и показана штриховой линией на рисунке 1. Границы  $k_1$  и  $k_2$  определялись как граница линейного поведения материала в зоне усреднения и как граница, соответствующая максимуму коэффициента жесткости напряженно-деформированного состояния рис. 1, б.

В данном исследовании предполагается, что напряжения отрыва  $S_c$  содержат в себе некую базовую величину  $S_0$  и переменную величину  $S_{pl}$ , зависящую от величины пластических деформаций в зоне предразрушения, то есть:

$$S_c = S_0 + S_{pl}. \quad (5)$$

На первом этапе при  $k < k_1$  не выполняется первое условие (1), следовательно хрупкое разрушение не происходит. На втором этапе, при  $k_1 < k < k_2$ , пластические деформации в области вершины трещины не превышают 1%, следовательно можно сделать допущение о пренебрежении величиной  $S_{pl}$ , тогда  $S_c = S_0$ . Следующим предположением является то что  $S_0$  является постоянной величиной для определённого материала и может быть выражена как:

$$S_0 = C \cdot \sigma_T, \quad (6)$$

где  $C$  – физическая константа материала. Подставив выражения (2) и (3) в выражение (1), получим преобразованный вид второго условия хрупкого разрушения:

$$s_1(k) \cdot \gamma(T) \geq C. \quad (7)$$

### Результаты и обсуждение

Используя, критические значения  $s_{1c}(k)$  и значения  $\gamma(T)$  при температуре разрушения, можно получить соответствующее значение константы  $C$  (рис.2).

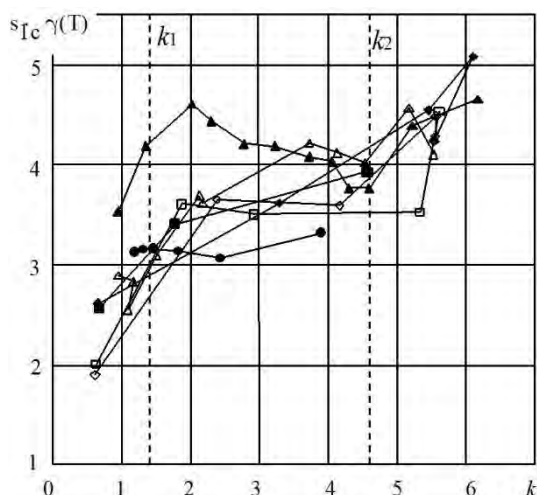


Рисунок 2. – Зависимость критических значений  $s_{1c} \cdot \gamma(T)$  от температуры испытаний: ● – сталь 22К; ▲, Δ – сталь С10 (зерно 64 и 20мкм); ■ – сталь LD; □ – сталь LB; ◆ – сталь НС; ◇ – сталь НА.

В таблице 2 приведены усреднённые значения  $C = s_{1c}(k) \cdot \gamma(T)$ , полученные по разрушениям на втором этапе нагружения. Дополнительно определено значение параметра  $C = 3,8$  для конструкционной стали Ст3 по графику в работе [13].

Таблица 2. – Средние значения параметра  $C$ .

№ п/п	Марка или обозначение стали	$s_{1c}(k) \cdot \gamma(T)$
1	C10 (64 мкм)	4.2
	C10 (20мкм)	4.2
3	22К	3.2
4	LB	3.55
5	LD	3.65
6	НА	3.6
7	НС	3.6

По данным значений, представленных в таблице 2, установлено, что для малоуглеродистых нелегированных сталей параметр  $C$  не зависит от предела текучести  $\sigma_T + 20^\circ\text{C}$  (рис.3). Для сталей с пределом текучести от 200МПа до 310МПа среднее значение данного параметра может быть принято равным  $3,75 \pm 0,1$ .

Предложенный параметр  $C$  демонстрирует заметное постоянство своего значения в диапазоне значений пределов текучести малоуглеродистых нелегированных сталей (рис.3).

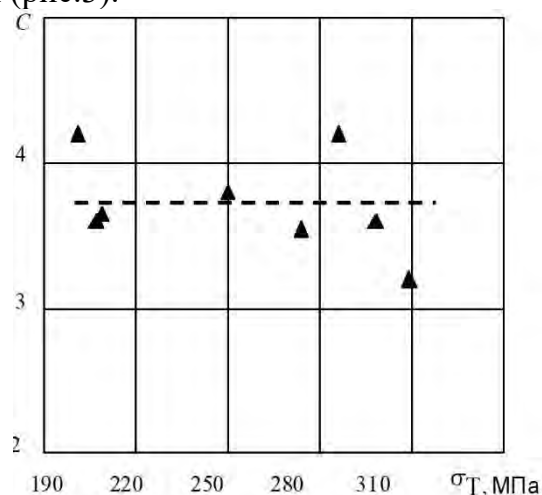


Рисунок 3 – Зависимость параметра  $C$  от предела текучести материала при  $+20^\circ\text{C}$ .

Это даёт основание полагать, что предложенный параметр может являться универсальной характеристикой материала для применения локального подхода к оценке прочности. Для исследованного типа сталей значение параметра  $C$  может быть принято равным  $3,75 \pm 0,1$  для применения в разрабатываемой методике с последующей верификацией.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-38-90022.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 32578-2013. Краны грузоподъемные. Металлические конструкции. Требования к материалам. Введен 2015.06.01. М., 2015, 8с.
2. ISO 20332-2015 Cranes - Proof of competence of steel structures, 2016, 2nd edition, p.92.

3. Чеврычкина, А.А., Груздков А.А., Петров Ю.В. Применение нелокальных критериев разрушения в задачах с неоднородным полем напряжений. Физика твердого тела, 2017, том 59, вып. 8. с.1570-1575
4. Матвиенко, Ю.Г. Тенденции нелинейной механики разрушения в проблемах машиностроения. – М.–Ижевск : Институт компьютерных исследований, 2015. - 56 с.
5. Шлянников, В.Н., Решение задач нелинейного деформирования и разрушения материалов при сложном напряженном состоянии, Физическая мезомеханика, 2012 том 1, С.57-67.
6. Копельман, Л.А. Основы теории прочности сварных конструкций. – СПб.: «Лань». 2010 – 464 с.
7. Shigeharu Hinotani, Armin Krabiell, Winfried Dahl. Zum Einfluß von Temperatur und Beanspruchungsgeschwindigkeit auf die Zähigkeitskennwerte des Stahls C10 mit unterschiedlicher Korngröße. ArchivfürdasEisenhüttenwesen. 1982 (53). P.231-237.
8. Васютин, А. Н. Опыт определения предела трещиностойкости материала для расчета разрушающего напряжения. - В кн. Унификация методов испытаний металлов на трещиностойкость. Вып. 2.- М. Изд-во стандартов, 1982, с. 59-64.
9. M.C. Tunncliffe, The fracture toughness of low carbon steels: he effects of grain size and temperature, 1991, p.452.
10. Соколов, С.А., Грачев А.А., Васильев И.А. Анализ прочности элемента конструкции с трещиной в условиях отрицательных климатических температур. Вестник машиностроения. –2019, № 11, с. 42-46.
11. Соколов, С.А., Васильев И.А., Тулин Д.Е. Оценка повышения предела текучести строительных сталей в условиях отрицательных температур, Деформация и разрушение материалов. 2021. №7. С.30 – 34.
12. Соколов, С.А., Васильев И.А., Грачев А.А. Математическая модель упругопластического напряженного состояния материала в вершине трещины. Деформация и разрушение материалов. 2020. № 8. С.2–4.
13. Копельман, Л.А., Сопrotивляемость сварных узлов хрупкому разрушению, М., 1978, 232с.

## ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ РОСТА ПОКРЫТИЙ ОКСИД ИНДИЯ-ОЛОВА НА УСТАНОВКЕ РЕАКТИВНОГО МАГНЕТРОННОГО РАСПЫЛЕНИЯ

### Аннотация

Тенденция развития индустрии материаловедения и микроэлектроники, в частности, идет на путь внедрения в процесс синтеза и определения характеристик материалов подходы, сочетающие машинное обучение и работу с большим набором данных. В работе рассматривается подход решения задач точного синтеза на примере синтеза пленок оксид-индия олова (ИТО). В процессе изучения физики роста пленок ИТО в процессе реактивного магнетронного распыления выделяются ключевые свойства материала и параметры синтеза, влияющие на получаемый результат.

Описан алгоритм применение метода Байесовской оптимизации, который позволит увеличить скорость синтеза материалов с желаемым результатом (заданными свойствами) и упростить их получения. Кратко будут подведены итоги подхода и поставлены задачи на будущие исследования.

*Ключевые слова:* оксид индия-олова, магнетронное распыление, машинное обучение, байесовская оптимизация.

### Введение

В последнее время наблюдается непрерывный рост в сферах разработки и применения прозрачных полупроводниковых оксидов [1, 2]. Одним из самых перспективных из них является оксид индия-олова (ИТО – Indium Tin Oxide). Он представляет собой твердый раствор оксидов индия (III) и олова (IV) с химической формулой  $(In_2O_3)_{0.9} - (SnO_2)_{0.1}$ . Популярность материал получил за счет своих высоких электрических и оптических свойств, благодаря чему широко применяется в качестве [1-5]:

- прозрачных проводящих электродов в дисплеях,
- материала в органических и неорганических светоизлучающих диодах,
- отражателя ИК излучения в лазерах,
- покрытия на светопоглощающих элементах (солнечные панели).

Интерес вызывает разновидность таких покрытий как нитевидные, обладающие за счет своих геометрических размеров дополнительными преимуществами и применениями.

Оказалось, что напылить материал как в виде тонкой пленки, так и в виде наноструктурированного покрытия возможно с помощью обычного реактивного магнетронного распыления (МР) [3, 4, 5].

Управление составом и свойствами пленок осуществляется изменением составов и парциальных давлений газов (реактивных, инертных), параметров магнетронного разряда, температуры подложкодержателя и несколькими другими. Для получения желаемого результата (определенного состава и свойств пленки)

необходимо подбирать множество параметров ручным способом. Решение подобной задачи требует долгого времени и высококвалифицированных специалистов в тематике вопроса.

Предлагается создание модели машинного обучения, позволяющей по желаемому результату (свойствам пленки) предсказывать необходимые параметры распылительной системы. Таким образом планируется устранить приведенную выше проблему – необходимость ручного подбора параметров распыления.

### Методы

Для достижения поставленной цели необходимо ввести требования к будущей системе, для успешного решения поставленной задачи:

- не требует большого числа данных – каждая новая точка добывается через проведение эксперимента и последующего измерения полученных параметров, что может занимать от 30 минут до нескольких часов;

- возможность оптимизации функции средней размерности обычно необходимо отслеживать до 10 параметров процесса и около 3 свойств получаемых пленок;

- возможность оптимизации функции с неизвестной зависимостью.

Анализируя критерии к системе и работы по похожим тематикам была выделена модель Байесовской оптимизации. Это метод машинного обучения, предназначенный для оптимизации целевой функции  $f(x)$ , где оценка нового значения занимает значительное время. Основная задача, которую решает метод, это поиск максимального значения целевой функции. Алгоритм является хорошо применимым для функций средней размерности (до 20 параметров), представляющих собой совершенно “черный ящик” (неизвестная зависимость), не дифференцируемых, так как используется только само значение функции  $f(x)$  [6, 7].

Рассмотрим метод подробнее, он состоит из двух частей [6]:

- Гауссовская регрессия – используется для моделирования целевой функции. Она описывает распределение вероятностей значений функции  $f(x)$  в неизведанных точках  $x$  на основе уже известных данных;

- Функция отбора – на основе построенного Гауссовской регрессией распределения предсказывает следующее значение  $x$ , где находится потенциальный оптимум. В отличие от первого компонента имеется множество возможных реализаций: ожидаемое улучшение; поиск энтропии; градиент знаний и т. д.

Способ широко применяется в большом круге задач, среди которых [8]: сенсорные сети, автоматическая настройка алгоритмов, глубокое обучение, генный дизайн.

Так же этот подход уже использовался для решения задач подобных задач и показал себя успешно. Так в [9] оптимизировали подвижность дырок в материале «spiro-OMeTAD» в зависимости от смешивания различного количества растворов NTMs, легирующих добавок, пластификаторов и времени отжига. В статье параллельно происходит оптимизация целевого параметра на двух выборках. Обе выборки сходятся в одном глобальном максимуме, что говорит о хорошей воспроизводимости метода.

В работе [10] модель использовалась для минимизации сопротивления пленок  $TiO_2$ , легированных Nb, в зависимости от давления реактивного газа ( $O_2$ ) в процессе реактивного магнетронного распыления. В качестве изначальных данных сделано измерения: по краям (точки  $2 \cdot 10^{-4}$  и  $3 \cdot 10^{-3}$  Па) и в середине ( $2.7 \cdot 10^{-3}$  Па) диапазона изменения давления  $O_2$ . В результате минимальные значения сопротивления при



использовании мишеней  $Ti_{0.94}Nb_{0.06}O_2$  и  $Ti_{1.98}Nb_{0.02}O_3$  удалось достичь через 11 и 15 шагов соответственно.

Работы [11-13] решают похожую проблему, однако используют методы, для которых либо необходим большой набор экспериментальных данных или уже имеется известная модель процесса. Данные условия противоречат установленным требованиям.

### Результаты и обсуждение

В результате анализа физики процесса роста выяснен механизм роста нитевидных структур ИТО в методе МР. Им является самокаталитический процесс роста пар-жидкость-твердое (ПЖТ). Так первоначально пары индия, олова и кислорода осаждаются на подложке в виде капель. Далее центром роста становятся сами капли, где рост нанокристаллов начинается на границе жидкость-твердое при перенасыщении жидкости. Кроме диффузии внутри капли к твердой границе также замечена поверхностная диффузия по наноструктуре внутрь капли, что увеличивало скорость роста. Таким образом образуются нитевидные структуры со сферической каплей на их конце (рисунок 1) [4].

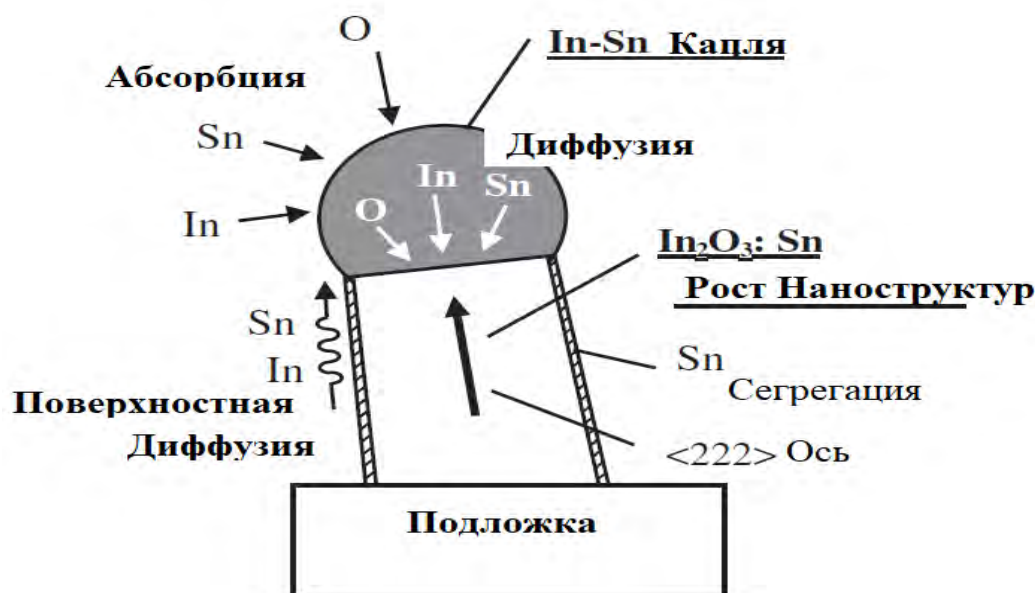


Рисунок 1 – Описание роста нанонитей ИТО [4]

Выделены ключевые свойства нитевидных пленок:

- сопротивление ( $I_R$ ) – имеется в виду объемное сопротивление ( $Om \cdot cm$ ), которое определяется четырехзондовым методом;
- коэффициент пропускания в видимом диапазоне ( $I_{TC}$ ) – определяется спектрофотометром, где на выходе получаем спектр пропускания;
- коэффициент отражения в инфракрасном диапазоне ( $I_{RC}$ ) – по аналогии с коэффициентом пропускания определяется спектрофотометром, где на выходе уже анализируем спектр отражения.

Описаны важные параметры процесса роста пленок методом МР:

- расходы реактивного и рабочего газов ( $O_2$  ( $O_O$ ) и  $Ar$  ( $O_A$ ), соответственно) – значения парциальных давлений в Па;
- нагрев подложки ( $O_{ST}$ ) – температура подложки в градусах Цельсия;

- мощность распыления ( $O_p$ ) – мощность (Ватты), подаваемая на систему магнетронного распыления;

- время напыления ( $O_T$ ) – время (секунды), в течение которого будет происходить процесс напыления.

Определен алгоритм решения поставленной задачи (рисунок 2). Для работы желателен набор первоначальных данных для построения первоначального вероятностного распределения целевой функции. Байесовская оптимизация строит по данным модель целевой функции  $f(x)$ . После чего функция отбора выдает следующее значение потенциального оптимума  $x_{opt}$ . Далее необходимо вычислить значение  $f(x_{opt})$  в предсказанной точке и обновить набор изведанных данных.

```
Создать начальный набор данных  $n_0$ 
Установить  $n = n_0$  и максимальное число итераций  $N$ 
Пока разница между размерами наборов  $n$  и  $n_0 \leq N$  делать:
    Обновить распределение вероятностей значений  $f(x)$  на основе  $n$ 
    Вычислить с помощью функции сбора новое значение  $x_{opt}$  на основе функции распределения
    Вычислить значение  $f(x_{opt})$ 
    Обновить набор  $n$ 
Ответом будет значение из  $n$  с наибольшим  $f(x)$ 
```

Рисунок 2 – Базовый алгоритм работы байесовской оптимизации

Применимо к поставленной задаче синтеза нитевидного ИТО оптимизируемыми параметрами являются ключевые свойства пленок  $I_R$ ,  $I_{TC}$ ,  $I_{RC}$  (общее обозначение как OUT), а входными параметрами модели – параметры процесса роста  $O_O$ ,  $O_A$ ,  $O_{ST}$ ,  $O_p$ ,  $O_T$  (общее обозначение как IN). Таким образом практический алгоритм выглядит как:

1. создание начального набора данных через измерения параметров OUT при различных входных параметрах процесса IN, размер начальных данных может иметь любой размер, отличный от 0;
2. анализ моделью полученных данных;
3. на основе созданной модели целевой функции OUT предсказываются новые значения  $IN^{min}$ , где предположительно находится глобальный оптимум;
4. проведение эксперимента с параметрами  $IN^{min}$  для вычисления значений  $OUT^{min}$ ;
5. обновляется банк изведанных данных данными, на основе пунктов 4 и 5;
6. повторение пунктов 2-5 пока не удовлетворимся значением параметра  $OUT^{min}$ .

Так как имеется несколько свойств пленок, для их параллельной оптимизации необходима замена на суперпозицию свойств. Так для получения минимального  $I_R$ , максимальных  $I_{TC}$  и  $I_{RC}$  необходимая замена указана на формуле 1:

$$I_{sum} = \alpha I_R - \beta I_{TC} - \gamma I_{RC} \quad (1)$$

где  $I_{sum}$  – суперпозиция свойств (число, которое необходимо оптимизировать), коэффициенты  $\alpha, \beta$  и  $\gamma$  – позволяют ставить приоритеты оптимизации между свойствами.

## Заключение

Описан подход к решению задачи синтеза материалов с заданными свойствами с помощью применения метода Байесовской оптимизации. Способ подходит для применения к оптимизации: неизвестных зависимостей, при отсутствии большого набора экспериментальных данных, при работе с несколькими параметрами.

В качестве примера приведен алгоритм оптимизированного синтеза нитевидных пленок ИТО в зависимости от параметров процесса МР. Для этого изучена физика процесса и впоследствии выделены ключевые свойства пленок и влияющие на них параметры роста.

Направление дальнейших исследований пойдет в сторону практических экспериментов с создающейся в текущий момент установкой МР и с применением описанного в работе метода оптимизации для синтеза нитевидных пленок ИТО с заданными свойствами.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сахаров, Ю. В., Ефимович, Т. П., Жидик, Ю. С. Исследование механизмов электропроводности пленок оксида индия, легированного оловом // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2015. - №. 3 (37).
2. Жидик, Ю. С. и др. Структура и свойства тонких пленок оксида индий-олово, полученных методом реактивного магнетронного распыления // Прикладная физика. - 2020. - №. 2. - С. 59.
3. Takaki, S., Aoshima, Y., Satoh, R. Fabrication of indium tin oxide whiskers by sputtering // Japanese journal of applied physics. - 2006. - Т. 45. - №. 4R. - С. 2714.
4. Takaki, S., Aoshima, Y., Satoh, R. Growth mechanism of indium tin oxide whiskers prepared by sputtering // Japanese journal of applied physics. - 2007. - Т. 46. - №. 6R. - С. 3537.
5. Yamamoto, N. et al. Formation of ITO nanowires using conventional magnetron sputtering // ECS Solid State Letters. - 2014. - Т. 3. - №. 7. - С. P84.
6. Frazier, P. I. A tutorial on Bayesian optimization // arXiv preprint arXiv:1807.02811. – 2018.
7. Shahriari, B. et al. Taking the human out of the loop: A review of Bayesian optimization // Proceedings of the IEEE. - 2015. - Т. 104. - №. 1. - С. 148-175.
8. GPyOpt, [Электронный ресурс]: Why is GpyOpt?. URL: <https://sheffieldml.github.io/GpyOpt> (дата обращения: 01.03.2022).
9. MacLeod, B. P. et al. Self-driving laboratory for accelerated discovery of thin-film materials // Science Advances. - 2020. - Т. 6. - №. 20. - С. eaaz8867.
10. Shimizu, R. et al. Autonomous materials synthesis by machine learning and robotics // APL Materials. - 2020. - Т. 8. - №. 11. - С. 111110.
11. Ding, Y. et al. Machine learning-based modeling and operation for ALD of SiO<sub>2</sub> thin-films using data from a multiscale CFD simulation // Chemical Engineering Research and Design. - 2019. - Т. 151. - С. 131-145.
12. Nikolaev, P. et al. Discovery of wall-selective carbon nanotube growth conditions via automated experimentation // ACS nano. - 2014. - Т. 8. - №. 10. - С. 10214-10222.
13. Ren, F. et al. Accelerated discovery of metallic glasses through iteration of machine learning and high-throughput experiments // Science advances. - 2018. - Т. 4. - №. 4. - С. eaq1566.

А.М. Шевелев<sup>1</sup>, А.А. Ульянов<sup>1</sup>, А.М. Борышнев<sup>1</sup>, В.И. Новиков<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Санкт-Петербург, Россия, [anton.2002.07@gmail.com](mailto:anton.2002.07@gmail.com)

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный  
университет, Санкт-Петербург, Россия

## МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОвого ПОЛЯ В ЭЛЕМЕНТАХ ГИДРОСЪЕМНИКА ДЛЯ СТРУЙНОЙ ЦЕМЕНТАЦИИ ГРУНТОВ

### Аннотация

В работе рассматриваются вопросы моделирования распределения значений температуры, возникающей в процессе эксплуатации конструктивного узла «буровой став», применяемого в технологии струйной цементации грунтов. Описаны твердотельная модель участка бурового става (гидросъемника) и полученное методом конечных элементов в среде ANSYS, распределение температурного поля в элементах данной конструкции сверхвысокого давления. Результаты моделирования позволяют определить наиболее термически нагруженные детали и в дальнейшем выработать мероприятия по ее уменьшению.

*Ключевые слова:* струйная цементация, буровой став, уплотнительный элемент, тепловое поле, моделирование, метод конечных элементов.

### Введение

В настоящее время в области инъекционных технологий для закрепления неустойчивых грунтов, доминирующие позиции занимает технология струйной цементации (СЦГ или общепринятое английское наименование – jet-grouting). Основное количество публикаций, посвященных данной технологии, как правило, рассматривает проблемы применения СЦГ в различных частных случаях [1, 2], а также изменения и прогнозирование прочностных характеристик получаемого грунтобетона и конструкции в зависимости от технологических параметров процесса цементации [3]. Стоит отметить, что за последние годы произошло увеличение материалов рассматривающих некие частные вопросы или какие-либо иные возможности применения СЦГ [4], однако все также довольно незначительное количество работ освещают проблемы конструирования оборудования для данной технологии [5, 6], несмотря на то, что проектирование устройств для СЦГ является крайне востребованным, особенно в свете того, что практически все оборудование иностранного производства

Конструктивная схема, используемого при СЦГ оборудования представляет собой цепочку: источник высокого давления, средства передачи высоконапорной струи цементного раствора, технологический инструмент (гидромонитор). Поскольку для реализации процесса требуется вращательное движение гидромонитора, но в то же время источник высокого давления должен находиться в неподвижном состоянии, то необходимо соответствующее передающее звено и таким звеном в передающих магистралях является гидросъемник (вертлюг), как часть конструктивного узла «буровой став», применяемого в технологии струйной цементации грунтов, который из-за специфики условий эксплуатации наиболее часто, нежели другие элементы, выходит из строя [5, 7]. Это связано в первую очередь со значительным

тепловыделением, происходящим при работе бурового вала, вынужденного вращаться в контакте с неподвижными уплотнительными элементами и таким образом актуальным является моделирование распределения теплового поля в элементах гидросъемника.

### Методы

Современные системы автоматизированного проектирования, используемые для решения прикладных задач при моделировании различных физико-механических нагрузок, основаны на методе конечных элементов, т.е. на численном методе решения дифференциальных уравнений в частных производных или интегральных уравнений, которые необходимо решить в ходе проектирования. Такой подход хорошо себя зарекомендовал и повсеместно применяется для решения задач теплообмена и механики деформируемого твёрдого тела, гидро- или электродинамики. Существует специализированные программы – ANSYS, MIDAS, FEMAP, направленные на моделирование конкретных задач на достаточно точном уровне, таким образом, позволяя оценить влияние воздействия интересующих факторов на рассматриваемую систему.

Создание твердотельной модели было реализовано в программной среде ANSYS, так как данный программный комплекс позволяет учитывать разнообразные конструктивные нелинейности, и дает возможность решить общий случай теплопередачи. Построенная 3D-модель (рисунок 1) представляет гидросъемник, состоящий из вращающегося бурового вала  $\varnothing 100$  мм с внутренним глухим отверстием  $\varnothing 60$  мм и двумя отверстиями диаметрами по 20 мм, через которые проводится подача водно-цементной смеси во внутреннюю полость и неподвижных корпуса, уплотнительных элементов и крышек с зажимающими болтами.

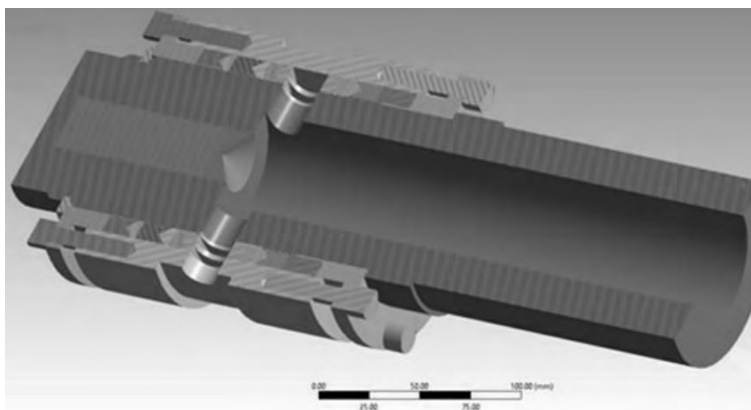


Рисунок 1 – 3D-модель гидросъемника в продольном сечении

Построение конечно-элементной модели проведено элементами с максимальной длиной стороны 1.5 мм, таким образом, была сгенерирована сетка с максимальными коэффициентами сгущения на поверхности и разрежения в объеме – 1 и 1.5 соответственно, вид которой представлен на рисунке 2. Конечно-элементарная сетка содержит 7,13 миллионов узлов и 4,5 миллиона элементов. В качестве материалов, заданы физико-механические характеристики: металлическим частям стали 40X13, для уплотнительных элементов – полимера «капролон» (ПА-6). Термическая нагрузка задавалась в местах контакта уплотнительных элементов и вала, исходя из известной тепловой мощности [8], выделяющейся при давлении рабочей жидкости (водно-цементной смеси) в 60 МПа.

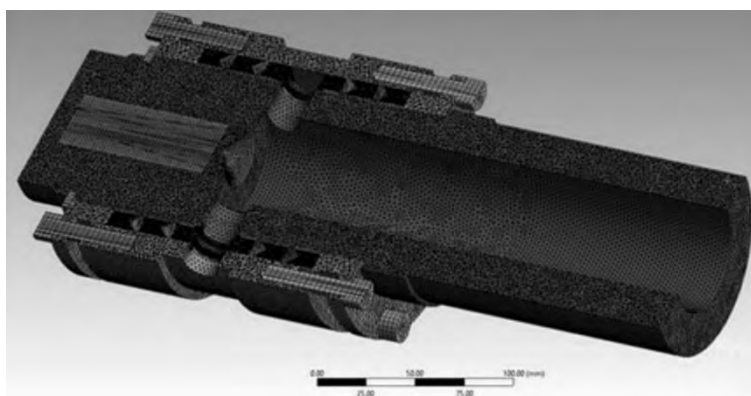


Рисунок 2 – Вид гидросъемника с расчетной сеткой

### Результаты и обсуждение

Полученные результаты моделирования теплового поля позволяют оценить состояние рассматриваемого конструктивного узла сверхвысокого давления с точки зрения распределения, возникающих в процессе его эксплуатации, температур. Качественно результаты совпадают с данными, полученными при предварительном расчете [8, 9]. Распределение температурного поля в продольном сечении детали (рисунок 3) иллюстрирует накопление тепла в зоне контактных поверхностей, особенно со стороны «левого» (относительно входного отверстия для водно-цементной смеси) уплотнительного элемента. Это связано с тем, что с «правой» стороны, выделившееся в процессе трения между вращающимся металлическим валом и неподвижным уплотнительным элементом из полимера, тепловая энергия переходит в водно-цементную смесь, протекающую по центральному отверстию  $\varnothing 60$  мм, таким образом, производя его охлаждение, в то время как со стороны «левого» уплотнительного элемента происходит накопление тепла и соответственно больший нагрев элементов гидросъемника, что приводит к повышенному износу в условиях сухого трения, к уменьшению времени работы всего узла и соответственно увеличению эксплуатационных затрат.

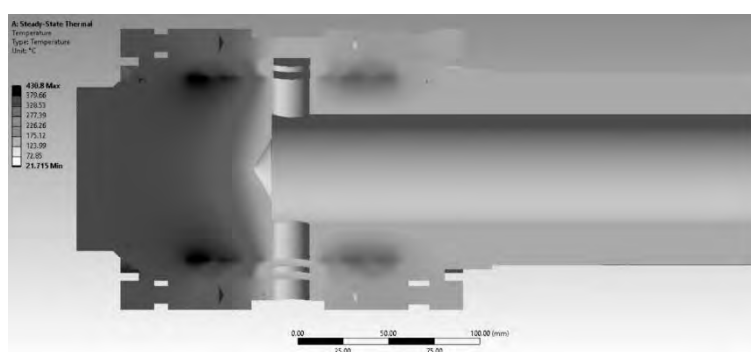


Рисунок 3 – Распределение значений температуры в гидросъемнике

### Заключение

Использование современных расчетных методов, применяемых в вычислительных комплексах, дает возможность не прибегать к довольно кропотливой и трудозатратной процедуре натурных испытаний, а проводить исследования основного набора характеристик, проектируемых объектов и изменять их конструкцию, не прибегая к использованию экспериментальных образцов.

Результаты моделирования показывают, что при выборе материалов для изготовления гидросъемника, следует учитывать тепловую нагрузку, возникающую в процессе эксплуатации и дать рекомендации по оптимизации как при выборе параметров эксплуатации устройства, так и применяющихся материалов уплотняющих элементов и металлических частей гидросъемника.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ludemann S.M., Garcia R.S., Barbosa M.G.T., Cavalcante A.L.B. A Contingency Solution using Jet Grouting Barrier for a Dam under Risk of Piping in Brazil // *Soils and Rocks*, São Paulo. - 2018. - V. 41 (1). - P. 17. <https://doi.org/10.28927/SR.411017>
2. Merlini D., Stocker D., Falanesca M., Schuerch R. The Ceneri Base Tunnel: Construction Experience with the Southern Portion of the Flat Railway Line Crossing the Swiss Alps // *Engineering*. - 2018. - V. 4. - P. 235. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2017.09.004>
3. Toraldo C., Modoni G., Croce P. Reliable definition of the characteristic strength of jet grouted soils by Random Field Theory // *Procedia Engineering*. - 2016. - V. 158. - P. 416. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.08.465>
4. Veropalumbo R., Russo F., Viscione N., Biancardo S.A. Rheological Properties Comparing Hot and Cold Bituminous Mastics Containing Jet Grouting Waste // *Advances in Materials Science and Engineering*. - Volume 2020. - Article ID 8078527. 16 p. <https://doi.org/10.1155/2020/8078527>
5. Гарипов М.В., Головин К.А. Разработка конструкции расширителя прокалывающей установки для закрепления неустойчивых горных пород // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. - 2013. - № 1. - С. 326.
6. Yuan Y., Shen S.L., Wang Z.F., Wu H.N. Automatic Pressure-Control Equipment for Horizontal Jet-grouting // *Autom. Constr.* - 2016. - V. 69. - P. 11.
7. Новиков В.И. Повышение надежности передающего устройства сверхвысокого давления, применяемого при струйной цементации грунтов // *Надежность и долговечность машин и механизмов: Материалы XI Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 30-й годовщине МЧС России и 75-й годовщине Победы в Великой Отечественной войне 1941-1945 годов*. - Иваново, 2020. - С. 67-71
8. Новиков В.И., Пушкарев А.Е., Манвелова Н.Е. Моделирование теплового баланса в процессе эксплуатации элементов гидросъемника бурового става для струйной цементации грунтов // *Научно-технический вестник Брянского государственного университета*. 2020. № 3. С. 404. <https://doi.org/10.22281/2413-9920-2020-06-03-404-410>
9. Новиков В.И., Пушкарев А.Е., Щербаков А.П., Кузьмин О.В. Особенности расчета теплового баланса гидросъемника с учетом влияния на шероховатость поверхности электролитно-плазменного полирования // *Металлообработка: научно-производственный журнал*. 2020. № 4. С. 16. <https://doi.org/10.25960/mo.2020.4.16>

А.Ю. Васянин<sup>1,2</sup>, А.Н. Шубин<sup>2</sup>, К.В. Елисеев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Санкт-Петербург, Россия, [vasyanin.ayu@edu.spbstu.ru](mailto:vasyanin.ayu@edu.spbstu.ru)

<sup>2</sup>АО «ОДК-Климов», Санкт-Петербург, Россия

## ИССЛЕДОВАНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА НЕРАВНОМЕРНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАГРУЗКИ В ЗАЦЕПЛЕНИЯХ ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ

### Аннотация

Рассмотрен метод нахождения коэффициента неравномерности по ширине зубчатого венца в зацеплении с помощью численной модели. Расчет коэффициента осуществляется посредством анализа возникающих в результате статического расчета сил реакции на поверхностях контактирующих зубьев.

*Ключевые слова:* Коэффициент неравномерности распределения нагрузки, метод конечных элементов, компьютерное моделирование.

### Введение

При проектировании авиационных редукторов одной из основных задач является точный расчет конструкции на прочность и надежность. Зубчатые передачи главных редукторов летательных аппаратов являются одними из наиболее ответственных деталей, поскольку при разрушении могут привести не только к нарушению функций редуктора, но и к катастрофическим последствиям для воздушного судна. Задача проектирования и производства зубчатых колес, обладающих достаточной статической и динамической прочностью, а также циклической долговечностью является крайне актуальной.

Как показала практика, выход из строя высоконагруженной зубчатой пары может быть связан с некорректным учетом коэффициента неравномерности распределения нагрузки по ширине зубчатого колеса [1,2]. Неравномерность распределения нагрузки зависит от неточности изготовления и установки передачи, а также от упругих деформаций под нагрузкой элементов передачи (валов, опор корпусов передачи, подшипников, тел колес и самих зубьев). Аналитический расчет всех упомянутых упругих деформаций представляет собой трудоемкую задачу, поэтому в существующих методиках приведены расчеты только в условиях изгибов валов, кручение тела шестерни под действием нагрузок в зацеплении передачи и перекосы осей. Для данных случаев в литературе [1,2,3,4] приведены соответствующие расчетные зависимости или диаграммы.

В авиационных редукторах зачастую скорости вращения зубчатых колес высоки, что сказывается вследствие центробежных нагрузок на деформированном состоянии колес, а из-за высоких требований к массовым характеристикам их диафрагмы выполняются тонкими. При использовании косозубого зацепления в таких условиях становятся существенными деформации под действием осевой составляющей сил в зацеплении. Корректная аналитическая оценка неравномерности колес в таких условиях становится маловероятной и тяжело достижимой. Наиболее корректный результат оценки может быть получен при использовании метода конечных элементов (МКЭ) [5].



## Методы

Расчетная модель представляет из себя зубчатую пару z23 и z59 силовой ветки редуктора. Колесо z59 установлено на шлицевом валу шестерни z29. Зубчатые колеса расположены в редукторе в соответствии со сборочной документацией. Геометрия конструкции представлена на рисунке 1. В таблице 1 указаны свойства материала шестерен.

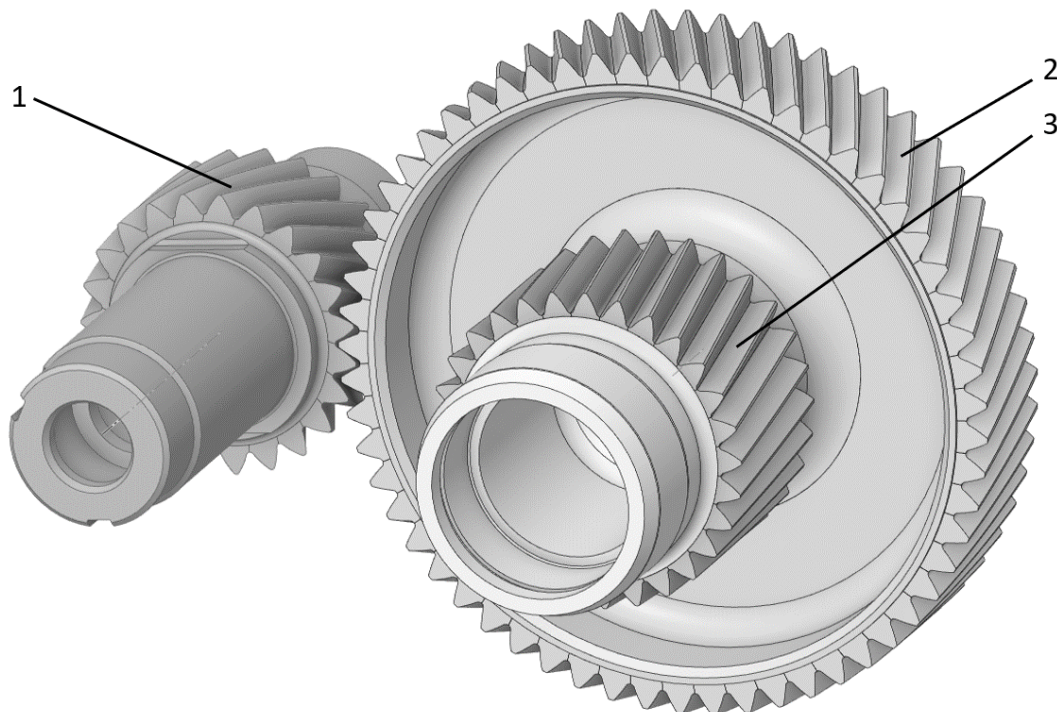


Рисунок 1 – Сборка: 1 – зубчатое колесо z23, 2 – зубчатое колесо z59, 3 – зубчатое колесо z29

Таблица 1 – Свойства материала

Наименование	16ХЗНВФМБ-Ш
Плотность, кг/мм <sup>3</sup>	7860
Модуль упругости, кгс/мм <sup>2</sup>	19000

Расчет проводится методом конечных элементов (МКЭ) в программной системе AnsysWorkbench. Для корректного получения напряжений на поверхности контактирующих тел важно качество генерируемых конечных элементов. При построении сетки используются по возможности метод *Sweep* с целью генерации регулярных гексаэдров и призм, рисунок 2а. Так как целью является исследование пятна контакта шестерни и колеса, часть зубьев, находящихся в зацеплении разбита на более мелкие элементы, рисунок 2б. Построенная КЭ сетка содержит 155879 элементов и 378480 узлов. КЭ проверялись на качество с использованием метрики сетки *ElementQuality*, значение в зоне контактирующих зубьев не ниже 0.25.

В зацеплении зубчатых колес требуется создать нелинейный контакт. Обычно принимают, что при контакте деталей из стали коэффициент трения находится в диапазоне 0,1–0,3. Учитывая высокое качество поверхности зуба, воздействие вибраций в редукторе и использование смазки, в данном расчете задано нулевое значение.

Заданы следующие кинематические граничные условия опорных поверхностей роликовых подшипников:

- поверхности рассматриваются абсолютно жесткими телами, перемещения перпендикулярно валу отсутствуют;
- осевые повороты не ограничены;
- два оставшихся поворота также не ограничены для имитации подшипника, имеющего зазоры между роликами и обоймой.

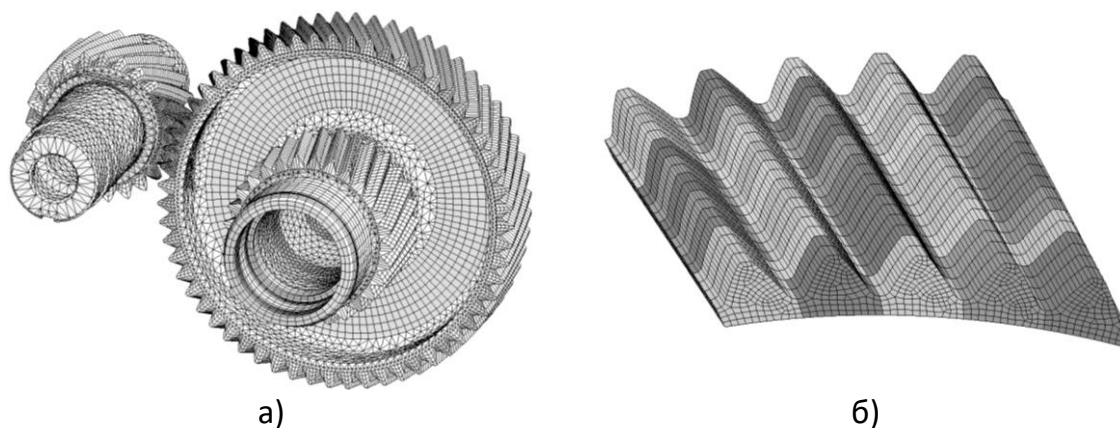


Рисунок 2 – Конечно-элементная модель: а) общий вид; б) КЭ сетка контактирующих зубьев

На каждом валу установлены также шариковые подшипники, которые воспринимают осевую нагрузку. Задана центробежная нагрузка на валах, соответствующая частоте вращения 40275 об/мин и 15700 об/мин. На шестерне z23 задан поворот вокруг оси на 5 градусов с шагом 0,5 для прохождения зубьями всех фаз контакта. В качестве момента сопротивления были заданы составляющие силы зацепления на колесе z29.

Оценку коэффициента неравномерности можно сделать по результатам решения контактной задачи для каждого промежуточного угла поворота на основе анализа сил реакции контактирующих поверхностей. Для удобства обработки получаемого результата зубья разделяются по ширине венца на 10 одинаковых участков. После проведения расчета запрашивается сила реакции на каждом участке зубьев для различных фаз зацепления.

### Результаты и обсуждение

В расчетных методиках принято использовать коэффициент начальной неравномерности нагрузки (до приработки, которая происходит в результате истирания или пластической деформаций в зубьях и зависит от твердости поверхностей зубьев, от степени равномерности передаваемой нагрузки, от времени работы, окружной скорости и других факторов), зависящий от неточности изготовления, монтажа передачи и упругих деформаций [2]. Так как данные зубчатые передачи подвергаются процессу цементации и последующей шлифовке, то процесс притирки допустимо не учитывать из-за высокого качества получаемой твердой поверхности, а как следствия малого влияния на форму зуба.

Коэффициент неравномерности распределения нагрузки в данном случае рассчитывается по формуле (1).

$$K_{H\beta} = \frac{\omega_{max}}{\omega_m}, \quad 1)$$

где  $\omega_{\max}$  – максимальная нормальная удельная нагрузка,  
 $\omega_m$  – средняя нормальная удельная нагрузка

Таблица 2 – Результаты расчета

Шаг зацепления	1	2	3	4	5	6	7
$\omega_{\max}$ , Н	1157,5	1171,9	1171,4	1227,8	1227,0	1227,2	1225,2
$\omega_m$ , Н	660,8	662,9	663,0	665,1	665,2	667,8	667,9
$K_{H\beta}$	1,752	1,768	1,767	1,846	1,845	1,838	1,834

На рисунке 3 представлено распределение контактного давления на зубьях.



Рисунок 3 – Распределение контактного давления на 4 шаге зацепления

Из полученных коэффициентов для дальнейшего расчета на контактную прочность выбирается наибольший. Для снижения неравномерности распределения нагрузки и компенсации деформаций детали могут вводиться модификации линии угла наклона зуба и бочкообразности.

### Заключение

В связи с ростом требований к мощностным характеристикам авиационных редукторов значительно возрастает проблема снижения общей массы воздушного судна. Повышение точности численного моделирования, учет возможных сопутствующих эффектов, позволит снизить требования к запасу прочности[].

В данной статье показана перспективность применения метода конечных элементов для нахождения коэффициента неравномерности распределения нагрузки по ширине зубчатого венца с учетом пластических деформаций сложного вала, полотна и обода.

Необходимо проведение дальнейших расчетов, в том числе в динамической постановке, для уточнения получаемых результатов. Разработка упрощенного метода нахождения коэффициента неравномерности также является одной из важнейших задач.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пыж, О.А. Редукторы судовых турбоагрегатов. / Пыж О.А, Гаркави Л.М., Державец Ю.А., Гальпер Р.Р.; – Ленинград: Судостроение, 1975. - 272 с.
2. Биргер, И.А. Расчет на прочность деталей машин: Справочник / Биргер И.А., Шорр Б.Ф., Иосилевич Г.Б., – 4-е изд., М.: Машиностроение, 1993. - 640 с.
3. Балашов, Б.А. Редукторы энергетических машин: Справочник / Балашов Б.А., Гальпер Р.Р., Гаркави Л.М., Державец Ю.А., Подольский М.Е., Руденко Е.П., Филаткин А.Ф., Филипенков А.Л.; – Ленинград: Машиностроение, 1985. - 232 с.
4. ГОСТ 21354-87. Передачи зубчатые цилиндрические эвольвентные внешнего зацепления. Расчет на прочность: государственный стандарт союза ССР: дата введения 1989-01-01 / Государственный комитет СССР по стандартам. – Изд. Официальное. – Москва: Издательство стандартов, 1989.
5. Инженерный анализ в ANSYS Workbench: учеб. пособ. / Бруйка В.А., Фокин В.Г., Солдусова Е.А.; – Самара: Самар. Гос. Техн. Ун-т, 2010-271 с. – ISBN 978-5-7964-1392-0.
6. Федотова А.М., Гасюк Д.П. Анализ рисков возникновения проблем с качеством технологической подготовки производства и разработка мероприятий по их снижению в условиях АО "НИИЭФА" // Металлообработка. 2021. № 1 (121). С. 50-54.

И.В. Васильев, Д.О. Васильев  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Санкт-Петербург, Россия, vasiliev2.iv@edu.spbstu.ru

## **АДАПТИВНЫЙ РАЗВАЛ ПЕРЕДНЕЙ ПОДВЕСКИ АВТОМОБИЛЯ**

### **Аннотация**

В данной работе рассмотрены причины установки постоянного отрицательного развала передних колёс и недостатки такого решения. Предлагается способ модификации классической двухрычажной подвески, путём внедрения гидроприводов или червячного соединения с эксцентриковым валом в конструкцию подвески.

*Ключевые слова:* развал передней подвески, двухрычажная подвеска, гидропривод, червячное соединение, эксцентриковый вал.

### **Введение**

При прохождении поворотов на высоких скоростях автомобиль склонен к возникновению крена, при этом на внешнем, опорном, колесе создается положительный развал. Это приводит к уменьшению пятна контакта шины с трассой и, как следствие, меньшему сцеплению с дорогой. Для решения этой проблемы гоночные болиды настраивают с изначальным отрицательным развалом, который компенсирует эффект крена автомобиля в момент поворота. Однако при таком решении колёса с отрицательным развалом обладают на прямых участках меньшим сцеплением и повышенным износом.

Цель данного исследования имеет следующую формулировку: для автомобиля серийной группы разработать модель передней подвески, которая должна обеспечивать перпендикулярное к дороге положение колёс при любых условиях.

В представленной работе рассматривается концепция гоночного болида на основе автомобиля серийного производства, участвующего в спортивных гоночных соревнованиях, на подобии, серии WTCC (WorldTouringCarCup) [1]. Ежегодно участие в подобных соревнованиях принимают многие именитые автопроизводители, такие как Mercedes, Audi, Ford, Citroen, Lada АвтоВАЗ и многие другие. Команды каждой из этих автомобильных марок стремятся наилучшим образом оснастить, настроить и улучшить свой болид, но зачастую, улучшая один параметр, ухудшают другой. Так, например, как указывалось ранее, устанавливают отрицательный развал, улучшая поворачиваемость автомобиля, но ухудшая его эффективность разгона и торможения на прямых; изменяя сходжение колёс, улучшают сцепление с дорогой и поднимают температуру покрышек, но жертвуют ресурсом шин. Новая система не будет исключением, улучшая характеристики подвески, ожидается, что необходимо будет увеличить массу автомобиля.

### **Методы**

При моделировании, для создания образца подвески с адаптивным развалом, за основу взята конфигурация двухрычажной подвески, устанавливаемой на большинство серийных автомобилей [2]. Такой тип подвески обладает рядом положительных качеств, а именно высокая надежность, ремонтпригодность,

обеспечение хорошей управляемости автомобиля, простота регулировки. 3D модель подвески, представленная ниже на рисунке 1, была построена в программе PTC Creo Parametric.

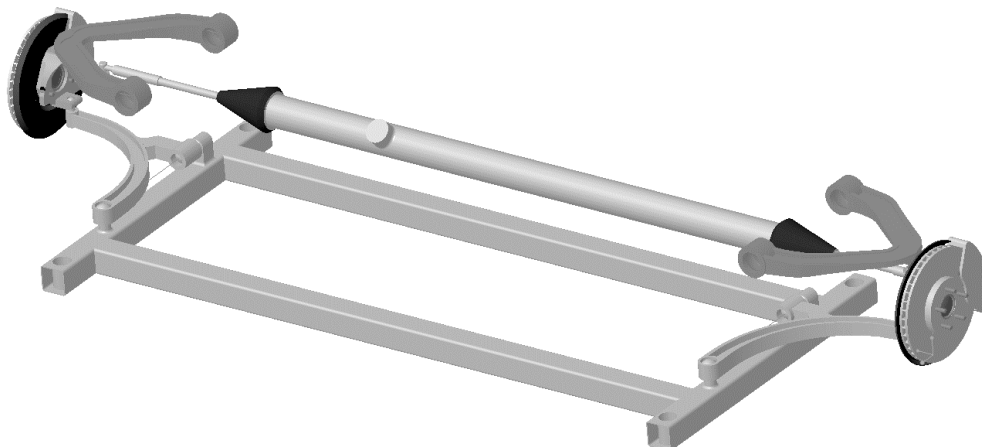


Рисунок 4 – Общий вид двухрычажной передней подвески

За счет наличия двух рычагов, в качестве опор поворотного кулака, обуславливается простота регулировки развала колеса. Для создания эффекта адаптивного развала, при такой компоновке, необходимо производить перемещение крепления кулака к верхнему рычагу в плоскости самого рычага. Поэтому решено рассматривать вариант с изменением длины верхнего рычага в моменты входа и выхода из поворота. Новая система в момент поворота руля начнет удлинять рычаг внутреннего колеса, тем самым создавая положительный развал, и укорачивать рычаг внешнего колеса, создавая отрицательный развал, что позволит скомпенсировать эффект крена автомобиля. При регулировке болидов перед стартом максимальный отрицательный угол наклона колёс устанавливается равным  $5^\circ$ . Исходя из этого и размеров построенной модели, получено, что для обеспечения отклонения в  $5^\circ$  необходимо изменить длину верхнего рычага на 17 мм. Однако максимальные значения достигаются крайне редко, поэтому при дальнейшем анализе принято считать, перемещения рычага в одном направлении будут составлять 15 мм, и, соответственно, 30 мм. общего хода.

Для реализации подобной системы в качестве первого варианта рассматривается перемещение рычага за счет гидроцилиндров [3]. Гидропривод обладает:

- значительной жёсткостью механических характеристик (что позволит обеспечить высокую точность позиционирования);
- хорошими динамическими свойствами, за счет малой инерционности подвижных частей и высоким модулем упругости рабочей жидкости;
- высокими массогабаритными показателями, превосходящими аналогичные показатели других типов приводов.

КПД гидравлической системы рассчитывается по формуле (1):

$$\eta_{\text{г.общ.}} = \eta_{\text{г.}} \cdot \eta_{\text{мех.}} \cdot \eta_{\text{об.}} \quad (1)$$

где  $\eta_{\text{г.общ.}}$  – Общий КПД гидравлической системы;

$\eta_{\text{г.}}$  – Гидравлический КПД (0,9...0,98);

$\eta_{\text{мех.}}$  – Механический КПД;

$\eta_{\text{об.}}$  – Объёмный КПД (0,84...0,92);

Механический КПД вычисляется произведением механических КПД всего последовательно соединённого гидрооборудования, формула (2):

$$\eta_{\text{мех.}} = \eta_{\text{мех.н.}} \cdot \eta_{\text{мех.р.}} \cdot \eta_{\text{мех.гд.}} \quad (2)$$

где  $\eta_{\text{мех.н.}}$  – Механический КПД насоса (0,8...0,92);

$\eta_{\text{мех.р.}}$  – Механический КПД распределителя. Так как механические потери в гидрораспределителях весьма малы, значения  $\eta_{\text{мех.}}$  принимают равными 0,98...0,99;

$\eta_{\text{мех.гд.}}$  – Механический КПД гидродвигателя (0,92...0,98). Меньшие значения рекомендованы для систем с давлением жидкости меньше 10Мпа, а большие при давлении больше 20 МПа;

В качестве предварительной оценки подставим в большинстве случаев средние значения КПД из диапазонов возможных показателей, таким образом получаем:

$$\eta_{\text{мех.}} = 0,86 \cdot 0,985 \cdot 0,92 = 0,78 \quad (3)$$

Полученный в уравнении (3) механический КПД подставим в формулу (1):

$$\eta_{\text{г.общ.}} = 0,94 \cdot 0,78 \cdot 0,88 = 0,645 \quad (4)$$

В качестве второго возможного варианта реализации рассматривается механический вариант системы в виде червячного механизма [4] с эксцентриковым валом, соединённым с червячным колесом. Такой способ будет иметь следующие преимущества:

Значение КПД червячного механизма может превышать значение данной характеристики гидросистем, для оценочного представления воспользуемся средними из представленных диапазонов значениями КПД в формуле 5;

$$\eta_{\text{ч.общ.}} = \eta_{\text{ч.пер.}} \cdot \eta_{\text{эл.пр.}} = 0,785 \cdot 0,825 = 0,648 \quad (5)$$

где  $\eta_{\text{ч.общ.}}$  – Общий КПД механической (червячной) системы;

$\eta_{\text{эл.пер.}}$  – КПД червячной передачи (0,75...0,82);

$\eta_{\text{эл.пр.}}$  – КПД электропривода механизма (0,75...0,9);

- Высокие динамические показатели системы;
- Высокая кинематическая точность;
- Возможность получения самотормозящей передачи (движение передаётся только от червяка к колесу);
- Сравнительно не большие значения массы системы;
- При правильной настройке система будет способна не только на регулировку развала колёс, но и на изменение расположения центра крена, снижая его негативные воздействия.

### Результаты и обсуждение

Подвеска с адаптивным развалом колёс, увеличит массу гоночного болида (по предварительным оценкам механическая система увеличит массу на 25-35 кг., а

гидравлическая на 30-45 кг., в случае изначального наличия другой гидросистемы, использующей ту же жидкость, можно их объединить, уменьшив тем самым добавляемую массу), но взамен должна будет обеспечить высокое сцепление на любых участках трассы, за счет постоянного максимального пятна контакта покрышек с дорогой. Отдельно стоит рассматривать и такую ситуацию, когда, согласно техническому регламенту, в автомобиль добавляют балласт для приведения автомобиля к минимально возможной массе, соответствующего ему класса, в таком случае масса системы адаптивного развала не будет оказывать негативного влияния.

### **Заключение**

В ходе дальнейших разработок будут доработаны и более детально изучены описанные способы реализации, а также рассмотрены альтернативные варианты реализации адаптивного развала и проведено сравнение их характеристик с гидравлической и механической системами.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. «Технические Требования к автомобилям участников TRC PRO 2021» [Электронный ресурс] Официальный сайт соревнований TRC в РФ [turboracingcup.ru](https://turboracingcup.ru/), 07.05.2022. Режим доступа: <https://turboracingcup.ru/>
2. Ролле, В. Е.; Семенов, А. Г. Теория движения наземных транспортных средств. Расчет плавности хода колесных машин: учебное пособие / В. Е. Ролле, А. Г. Семенов; - СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2018. - 308 с.
3. Броднев, П. Н. Динамика и регулирование гидро- и пневмосистем. Оборудование силовых каскадов гидравлических и электрогидравлических систем автоматического управления: учебное пособие / П. Н. Броднев, Н. М. Вайсман, В. П. Сорокин; - СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. - 95 с.
4. Заборский, Е. В. Детали машин и основы конструирования. Изучение конструкции червячного редуктора: методические указания к выполнению лабораторной работы / Е. В. Заборский, Е. А. Тарасенко; - СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2016. - 59 с.



Э.А. Никольская, К.В. Елисеев  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Санкт-Петербург, Россия, [nikolskaya.eleonora2001@mail.ru](mailto:nikolskaya.eleonora2001@mail.ru)

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ КОЛЕСА ПРИ ДВИЖЕНИИ ПО РЕЛЬСУ С ДЕФЕКТАМИ ПОВЕРХНОСТИ

### Аннотация

При движении колеса по участкам рельса с поверхностными дефектами можно ожидать появление повышенных напряжений как в колесе, так и в рельсе. Построена численная модель, содержащая одиночное колесо, с ее помощью решается задача динамического взаимодействия с учётом контакта.

*Ключевые слова:* железнодорожный путь, дефекты, анализ напряжений, метод конечных элементов, численное моделирование.

### Введение

Во время движения состава происходит постоянный контакт колес с рельсами пути. При проезде различных участков с локальными несовершенствами поверхности (эксплуатационные дефекты поверхности, стыки, стрелочные переводы и др.) можно ожидать существенные изменения условий контакта с ростом контактных напряжений, изменением пятна контакта, появлением нескольких контактных зон.

Цель работы состоит в анализе напряжений, которые возникают при движении колеса по рельсу с дефектами на поверхности, к которым отнесены стыки рельсов и дефекты при износе, который возникает в результате буксования [1]. Расчеты проведены для скоростей 5 и 50 км/ч, объектом являются колесо цельнокатаное диаметром 957 мм, ГОСТ 10791-2011 [2] и рельс Р65 по ГОСТ 8161-75 [3].

Анализ проводится методом конечных элементов. Создано несколько численных моделей. Проведен анализ возникающих напряжений.

### Методы

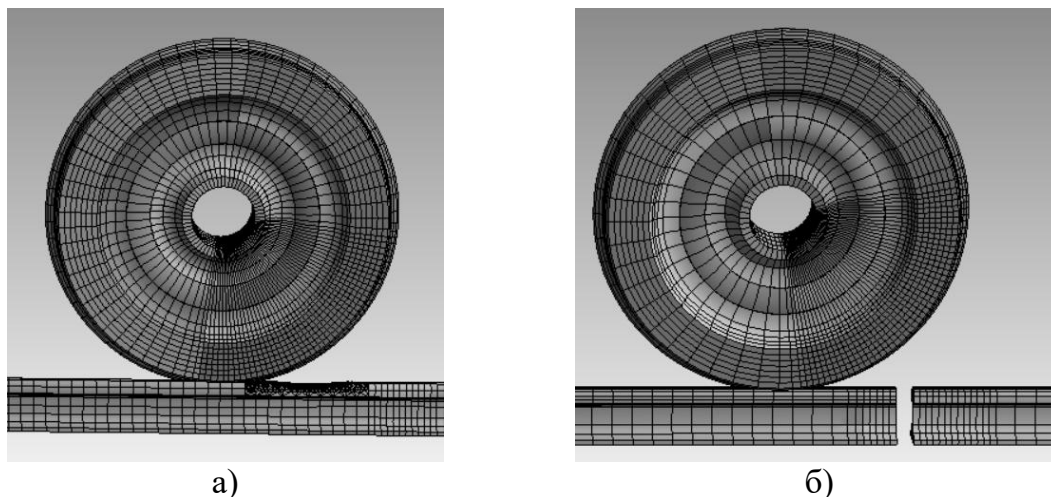
Расчеты проводились в программе конечно-элементного (КЭ) анализа ANSYS [4]. При подготовке численных моделей предложено следующее. Рассмотрено одиночное колесо,двигающееся по рельсу с постоянной скоростью, рассмотрены варианты 5 и 50 км/ч. Поверхность, соприкасающаяся с осью считается абсолютно жестким телом, на нем задаётся линейная скорость и приложена вертикальная сила 31250Н, действующая со стороны вагона. Фрагмент рельса жестко закреплен по подошве.

Отдельно следует отметить задание начальных условий, так как задача решается в динамической постановке. В начальный момент времени колесо должно двигаться вдоль пути с заданной линейной скоростью с одновременным вращением, скорости должны быть согласованы. Это возможно организовать включением специальной команды в дополнительном модуле макросов на встроенном языке APDL.

Начальные напряжения не учитываются. Предполагается, что на начальном участке движения колесо будет взаимодействовать с рельсом и решение выйдет на

установившийся уровень значений, области с дефектами находятся на некотором удалении от начала участка.

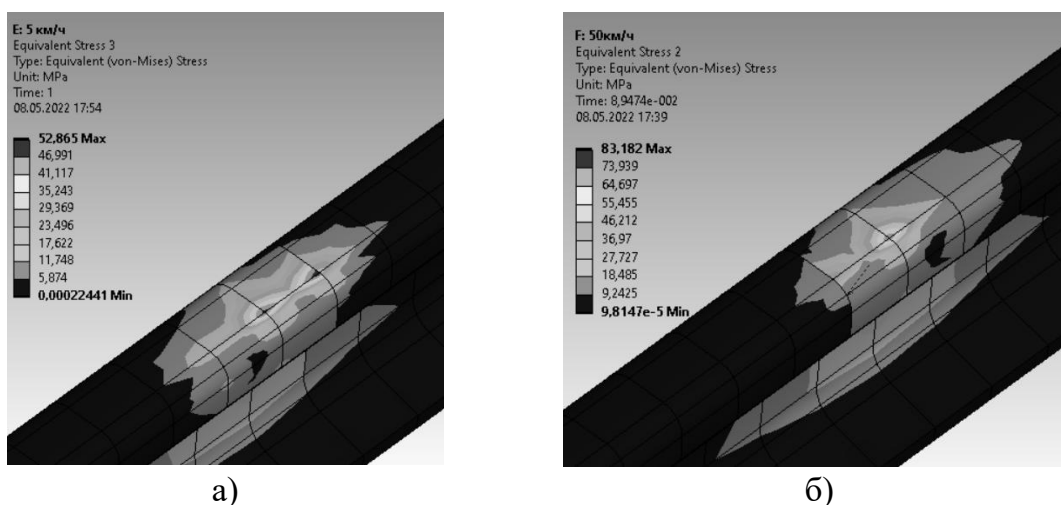
Было разработано несколько моделей одиночного колеса и рельсов с разными дефектами. Первый дефект – износ в результате буксования, радиусом 760 мм. Второй – стык шириной 50мм. Была создана конечно-элементная сетка, которая сгущалась около дефекта и в месте предполагаемого контакта колеса с несовершенной поверхностью рельса. В месте сгущения сетки характерный размер элементов – 20мм, во всех остальных местах на колесе и на рельсе – 60мм и 40мм соответственно. Всего 61тыс. узлов и 18тыс. элементов. КЭ-сетка представлена на рисунке 1.



а) б)  
Рисунок 1 – Модель колеса и рельсов с КЭ-сеткой:  
а) износ в результате буксования, б) стык

### Результаты и обсуждение

Вначале был произведен расчет для модели без дефектов на поверхности, с которым впоследствии сравниваются результаты остальных расчетов. Распределение эквивалентных напряжений Мизеса в этом случае представлены на рисунке 2.



а) б)  
Рисунок 2 –Напряжения Мизеса, МПа: а) при скорости 5км/ч, б) при скорости 50 км/ч

Далее были проведены аналогичные расчеты для проезда дефектов в виде дефекта износа при буксовании и стыка. Результаты представлены на рисунке 3 и 4 соответственно.

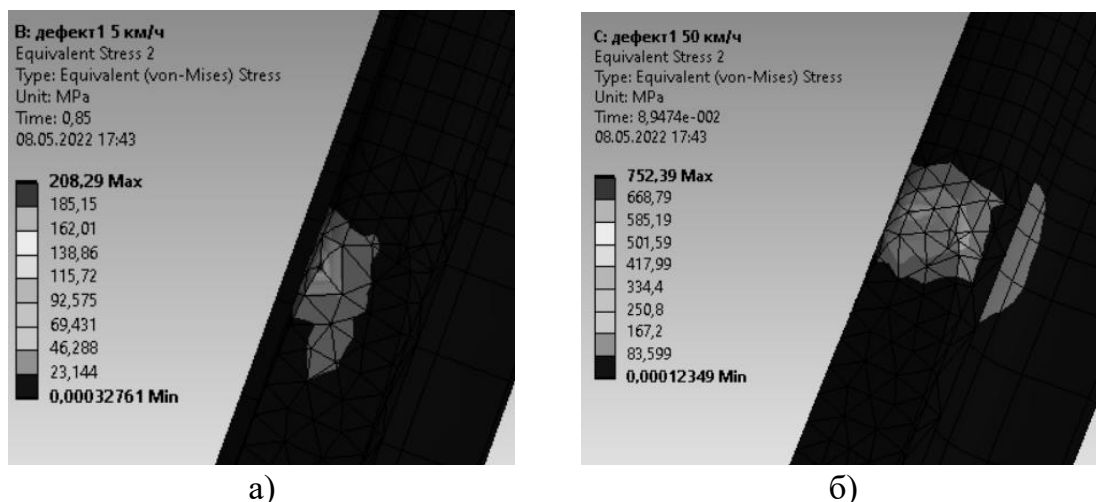


Рисунок 3 – Напряжения Мизеса, МПа, при проезде участка износа: а) при скорости 5км/ч, б) при скорости 50 км/ч

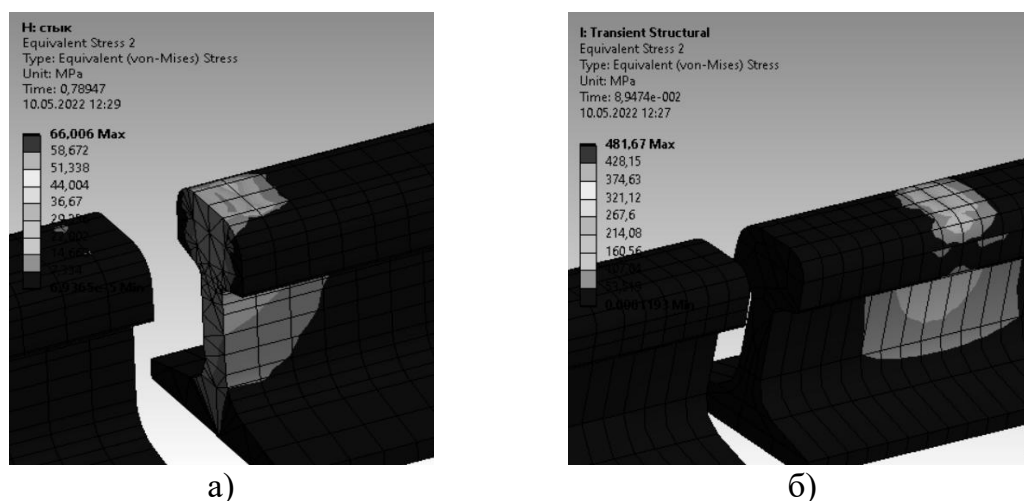


Рисунок 4 – Напряжения Мизеса, МПа, при проезде стыке: а) при скорости 5км/ч, б) при скорости 50 км/ч

В таблице 1 приведены результаты для всех случаев.

Таблица 1 – Результаты расчетов напряжений для различных дефектов

	Максимальное эквивалентное напряжение, МПа	
	5 км/ч	50 км/ч
Без дефекта	52	83
Износ	208	752
Стык	66	481

Можно отметить, что дефекты приводят к существенному росту напряжений в рельсе. Так на скорости 50 км/ч напряжения превышают максимально допустимые напряжения для стали.

Для получения более точного результата требуется дальнейшее уточнение КЭ-сетки. Также можно рассмотреть вариант, при котором нагрузка от силы тяжести вагона будет задаваться с помощью массы на пружине, имитирующей подвеску поезда, что может привести к уменьшению напряжений.

### **Заключение**

В ходе работы были проведены расчеты напряжений, возникающих при различных дефектах. Было выяснено, что при проезде зоны износа в результате буксования и большого стыка возникают напряжения, превышающие максимально допустимое напряжение для стали, равное 330 МПа, что может привести к дальнейшему разрушению рельса.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Инструкция. Дефекты рельсов. Классификация, каталог и параметры дефектных и остродефектных рельсов. -Москва, 2014.
2. ГОСТ 10791-2011. Колеса цельнокатные. Технические условия. - Москва: Стандартинформ, 2011
3. ГОСТ 8161-75. Рельсы железнодорожные типа Р65. Конструкция и размеры. - Москва: Издательство стандартов, 1994
4. Ansys. EngineeringSimulationSoftware [Электронный ресурс]:ANSYS - Электронные данные. Режим доступа: URL.: <https://www.ansys.com/>, свободный (дата обращения 10.04.2022)

Д.И. Мышенский, К.В. Елисеев  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Санкт-Петербург, Россия, [myshensky.dmitry@yandex.ru](mailto:myshensky.dmitry@yandex.ru)

## МЕТОД ПОДМОДЕЛИРОВАНИЯ В ANSYS WORKBENCH

### Аннотация

Рассмотрены особенности применения метода подмоделирования, который используется для уточнения результатов в относительно небольшой области детали или конструкции. Есть две вариации данного метода: на основе передачи сил или перемещений из глобальной модели в подмодель. Описаны принципы, особенности и отличия данных вариантов подмоделирования, проведено сравнение результатов.

*Ключевые слова:* метод конечных элементов, конечный элемент, метод подмоделирования, глобальная модель, подмодель.

### Введение

В современных инженерных расчетах широко применяют метод конечных элементов (МКЭ), он распространился благодаря возможности численно находить приближенное решение различных задач [1]. Но, как и любой метод, он имеет свои недостатки, один из которых заключается в том, что результат вычислений зависит от размера конечного элемента (КЭ), причем более точный результат получается при сгущении сетки. Но с другой стороны уменьшение КЭ ведет к увеличению вычислительных и временных ресурсов. По этим причинам был создан метод подмоделирования. Он позволяет отдельно рассчитать интересующую область детали или конструкции, называемой подмоделью, для получения более точного результата с меньшими затратами [2]. Часто данную технику применяют к областям, содержащим особенности типа концентраторы напряжений.

Существует два метода подмоделирования: на основе передачи перемещений и на основе передачи сил. Цель данной работы заключается в рассмотрении различий, принципов и особенностей их использования.

### Методы

Принцип подмоделирования заключается в следующем: имеется глобальная модель на основе детали с грубой сеткой и возможно с упрощенной геометрией, в первом примере – это г-образная балка без скругления. Требуется уточнить результат в области концентратора напряжений, то есть в углу балки. Для этого создается или вырезается из первоначальной модели подмодель этой области с более густой сеткой. Далее необходимо передать данные из глобальной модели в подмодель. Для корректной передачи глобальные координаты подмодели и интересующей области в глобальной модели должны совпадать. Граничные условия и (или) нагрузки на границах или внутри рассматриваемой области в глобальной модели, должны быть заданы и в подмодели.

В современных версиях Workbench перенос данных по перемещениям в подмоделировании осуществляется автоматически [2,3]. В свою очередь силовое подмоделирование на данный момент времени требует большего количества действий. Во-первых, необходимо создать подмодель на основе перемещений и в ней

выбрать поверхности, на которые поступают данные с глобальной модели, задав компоненты для каждой из них. Во-вторых, из-за недостаточного функционала Workbench необходимо сделать вставку кода на языке программирования AnsysAPDL (Ansys Parametric Design Language) для записи данных в файл с этих поверхностей. В-третьих, создать новую подмодель с уточненной геометрией, но с таким же размером и видом сетки, и считать данные вторым APDL кодом [3].

Для достижения поставленной цели были проведены расчеты в программе Ansys Workbench и рассмотрены следующие примеры. Первый, два варианта г-образной балки с скруглением и без него. На одном конце граничное условие вида жесткая заделка, поверхности под номером 1, а на другом действует сила 50 кН вдоль балки, поверхности под номером 2, рисунок 1.

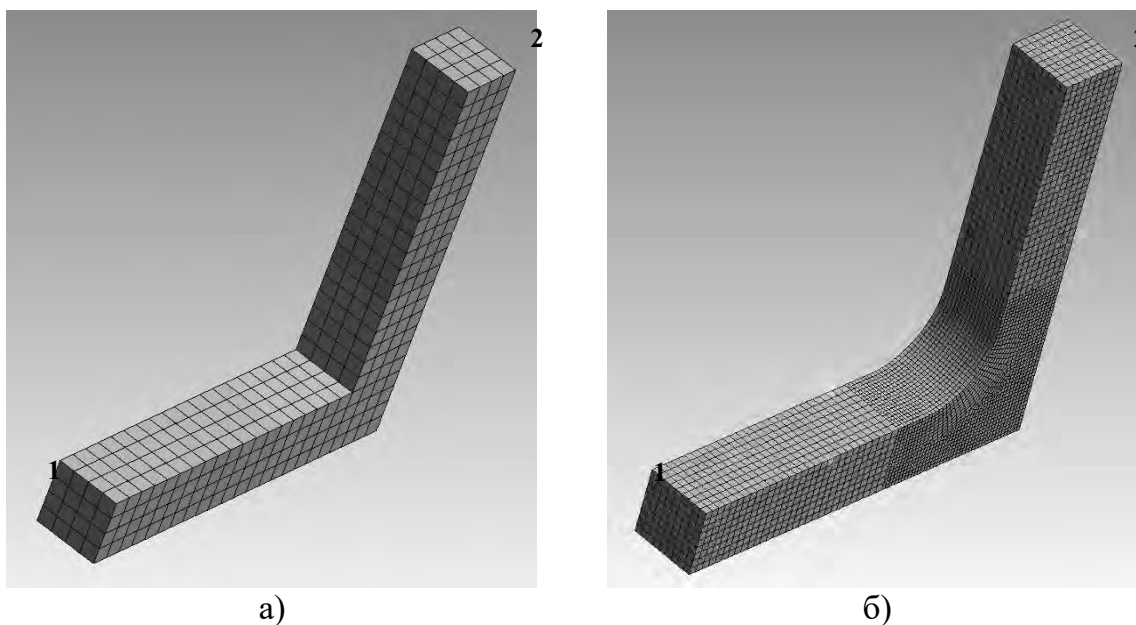


Рисунок 5 – Г-образная балка: а) без скругления с грубой сеткой; б) с скруглением с густой сеткой

Второй – задача Кирша [4]: рассматривается бесконечно плоская область с отверстием, нагруженная постоянным растягивающим давлением в 100 Па. Для удовлетворения условия, что пластинка является бесконечной, было задано, что сторона во много раз превышает радиус. С учетом симметрии рассматривалось только четверть пластины. Задача решалась в постановке плоского напряженного состояния. Задача имеет точное решение, согласно которому коэффициент концентрации напряжений равен трем, здесь максимальные напряжения будут равны 300 Па.

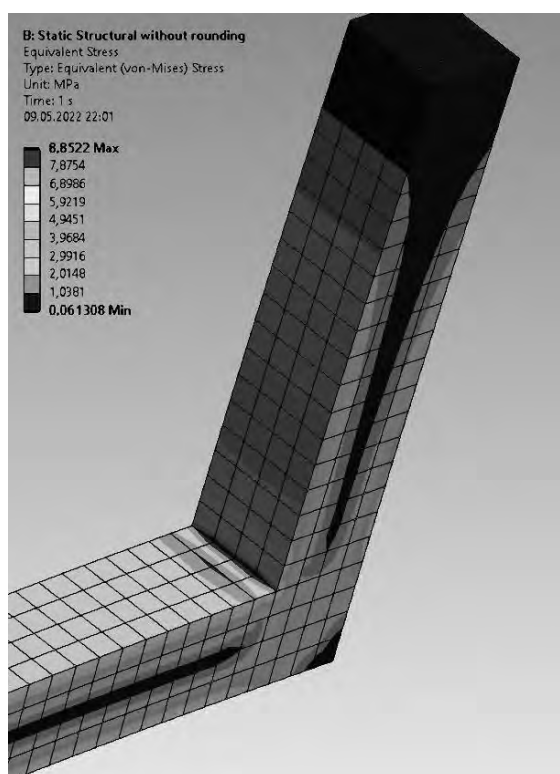
В ходе работы в каждом примере были рассмотрены несколько моделей: с разной геометрией, размером сетки и типом подмоделирования.

### Результаты и обсуждение

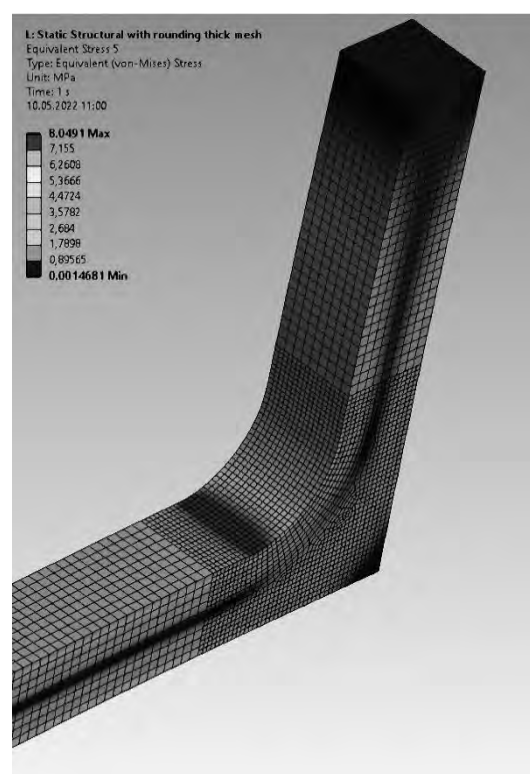
Полученные результаты сведены в таблицы 1 и 2, для первого и второго примеров соответственно. В данных таблицах сравнивается: вид геометрии, сетка из КЭ, модель из которой брались данные, полученные максимальные напряжения в области и время расчета модели. По первому примеру на рисунках 2 и 3 соответственно приведены распределения напряжений для двух глобальных моделей и для двух подмоделей.

Таблица 1– Полученные результаты на примере г-образной консоли

	Геометрия, учет скругления	КЭ сетка подробная	Подмоделирование на основе	Максимальные напряжения Мизеса, МПа	Отличие от «точного», %	Время расчета, с
Глобальные модели (Г.м.)						
Г.м.1	не учтен	нет	-	8,8	10	2
Г.м.2	учтен	нет	-	7,7	4,6	3
Г.м.3	учтен	да	-	8,1	-	18
Подмодели (П.м.) на основе глобальной без скругления Г.м.1						
П.м.1	не учтен	да	перемещений	16,1	101	7
П.м.2	учтен	да	перемещений	13,1	62,8	7
П.м.3	учтен	да	сил	8,0	0,8	19
Подмодели на основе глобальной со скруглением Г.м.2						
П.м.4	учтен	да	перемещений	8,1	0,09	7
П.м.5	учтен	да	сил	8,1	0,09	18



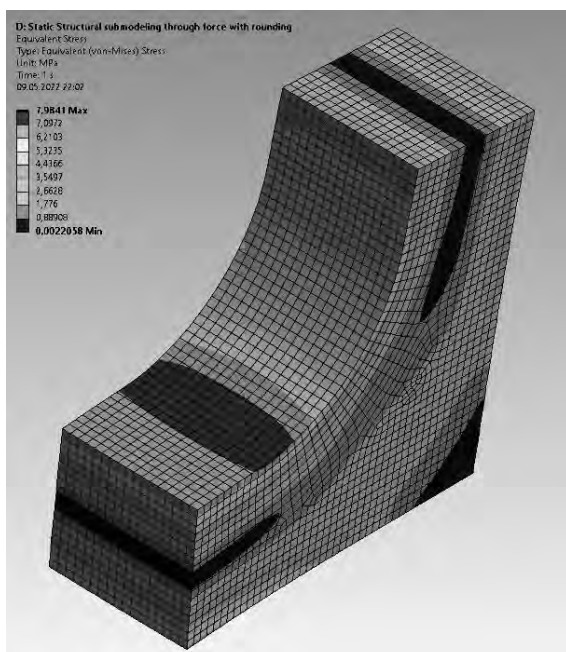
а)



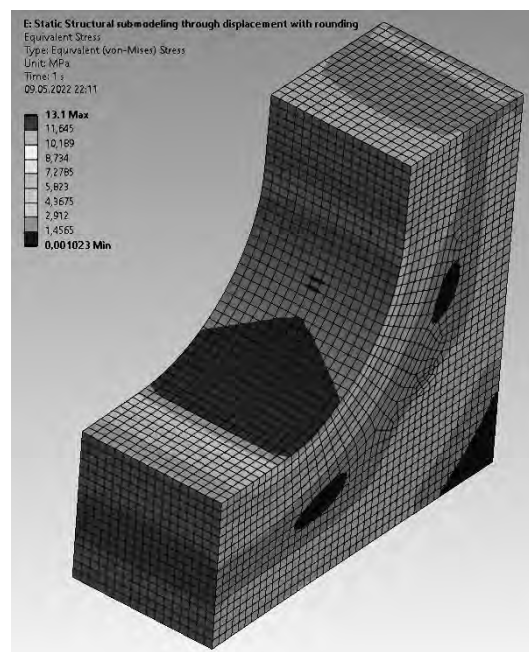
б)

Рисунок 2 – Полученное распределение напряжений: а) для глобальной модели без скругления с грубой сеткой (Г.м.1); б) для глобальной модели с скруглением с густой сеткой (Г.м.3)

Можно отметить следующие. Во-первых, полученные результаты для глобальных моделей подтверждают, что точность результатов зависит от густоты сетки, а время расчета зависит от количества КЭ. Во-вторых, по результатам для подмоделей в примере с г-образной балкой видно, что результат в некоторых случаях значительно отличается от «точного», а в некоторых наоборот близок к нему.



а)



б)

Рисунок 3 – Полученное распределение напряжений: а) для подмодели на основе сил (П.м.3); б) для подмодели на основе перемещений (П.м.2)

Таблица 2– Полученные результаты по задаче Кирша

	КЭ сетка подробная	Подмоделирование на основе	Максимальные нормальные напряжения, Па	Отличие от точного, %	Время расчета, с
Глобальные модели (Г.м.)					
Г.м.1	нет	-	295	1,8	3
Г.м.2	местное сгущение	-	301	0,3	8
Г.м.3	да	-	300	0,09	9
Подмодели (П.м.) на основе глобальной Г.м. 1					
П.м.1	да	перемещений	301	0,4	4
П.м.2	да	сил	301	0,4	8

Заметим, что близкими оказались решения подмоделирования основанные на глобальной модели с учетом скругления, а также силовое подмоделирование основанное на глобальной модели без скругления. В этом и заключается преимущество силового варианта подмоделирования: его можно использовать, когда жесткость конструкций или деталей в глобальной модели и подмодели различны, например, не учтены скругления или отверстия.

В-третьих, если обратить внимание на крайние столбцы таблиц, то виден его недостаток: по сравнению с подмоделированием на основе перемещений требуется больше расчетного времени.

### Заключение

В данной работе были рассмотрены варианты подмоделирования на основе сил и перемещений. Были описаны особенности и принципы их использования. Отмечены различия между ними, которые заключаются: в предварительной



подготовке подмоделей, в возможности использования при различных жесткостях глобальной модели и подмодели и во времени расчета.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Инженерный анализ в Ansys Workbench: Учеб. пособ. / В.А. Бруйка, В.Г. Фокиг, Е.А. Солдусава, Н.А. Глазунова, И.Е. Адеянов. - Самара: Самар. гос. теки. уи-т, 2010. - 271 с.:

2. Клуб пользователей ANSYS [Электронный ресурс] // Подмоделирование в ANSYS 14.5: [сайт]. URL: <https://cae-club.ru/publications/podmodelirovanie-v-ansys-145> (дата обращения 04.04.2022)

3. Клуб пользователей ANSYS [Электронный ресурс] // Особенности выполнения подмоделирования: [сайт]. URL: <https://cae-club.ru/publications/osobennosti-vypolneniya-podmodelirovaniya> (дата обращения 04.04.2022)

4. А.М. Смирнов, А.В. Кремлева, В.Е. Бугров, А.Е. Романов. Современные проблемы физики материалов. – СПб: Университет ИТМО, 2021. – 76 с.

Ю.В. Богданов, А.М. Бойко, Р.А. Гиргидов  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Санкт-Петербург, Россия

## **ПРИМЕНЕНИЕ ДИСПЕРСИОННОГО АНАЛИЗА К ОЦЕНКЕ СТРУКТУРЫ РОЯ, ОБРАЗОВАННОГО БЕСПИЛОТНЫМИ ЛЕТАТЕЛЬНЫМИ АППАРАТАМИ**

### **Аннотация**

В работе рассматриваются особенности децентрализованного подхода к организации управления групп БПЛА на примере мультиагентного роевого построения. В мультиагентном рое именно структура построения определяет качество и полноту выполненной работы при поставленной перед роем задаче. Поэтому, предполагается рассмотреть задачу о зондировании местности роем дронов с целью определить подходящую для её выполнения структуру. В результате проделанной работы был разработан алгоритм регулярности структуры при моделировании роя дронов, который позволяет численно охарактеризовать регулярность получаемых роевых структур и получить значение расчетного времени формирования структуры, что позволит организовать работу дронов оптимальным образом с точки зрения затрат времени.

*Ключевые слова:* БПЛА, дроны, роевые построения, децентрализованное управление группой БПЛА, мультиагентное управление.

### **Введение**

Применение беспилотных летательных аппаратов (БПЛА, они же БВС) в разных сферах жизни общества [1, 2] объясняется низкими издержками на содержание и использование БПЛА в сравнении с пилотируемой авиацией, возможностью решения широкого спектра задач даже в сложных погодных условиях и в условиях риска аварии для аппарата.

При организации работы одного или группы БПЛА ключевым вопросом является выбор подхода к их управлению. Одним из вариантов реализации управлением группой БПЛА является децентрализованное управление. Это важный аспект, который позволяет расширить применение групп БПЛА в тех местах, где невозможно организовать централизованное управление, которое эффективно работает лишь в условиях наличия хорошего качества связи с центром [4].

В данной работе в качестве группы БПЛА будет рассматриваться неиерархический рой дронов - управляемая группа дронов со своей структурой. Выделим наиболее важные его свойства: внутри роя гарантируется взаимодействие между ближайшими бортами. Оно осуществляется через сенсоры и датчики; каждый дрон является самостоятельным агентом (мультиагентное управление [5]); принимается, что в состав роя должно входить не менее семи дронов; все дроны в рое однотипны, т. е. полностью взаимозаменяемы; у всех дронов одинаковая программа управления; вся группа дронов решает одну задачу как единое целое [5 - 7].

Структура роя, являющаяся результатом взаимодействия самостоятельных агентов, определяет распределение полезной нагрузки между дронами, а, следовательно, от неё зависят качество и полнота выполненной работы.

Перед нами встает следующая проблема: оценить качество структуры, в которую выстраивается рой дронов для выполнения стоящей перед ним задачи. Таким образом целью данной статьи является разработка таких алгоритмов, которые позволят численно оценить «качество» структуры роя, что позволит сделать вывод о том, подходит ли имеющийся алгоритм управления роем для выполнения поставленной миссии или же он требует корректировки. А также оценить сколько времени потребуется рою для выстраивания стационарную, регулярную структуру.

Для иллюстрации всех вышеперечисленных аспектов, связанных с работой группы БПЛА обратимся к примеру задачи, которая может быть подставлена перед роем дронов.

### **Зондирование местности с помощью роя дронов**

Рассмотрим задачу, в которой рою дронов необходимо провести зондирование некоторой местности. Общий принцип зондирования местности заключается в том, что некоторый аппарат (наземный, космический, летательный) с помощью сенсора дистанционного зондирования реагирует на сигнал, излучаемый или отраженный объектом, или прилегающей территорией.

Для выполнения зондирования местности рою дронов необходимо сформировать фазированную антенную решетку (или её аналог). В качестве построения роя дронов в данной ситуации отлично подходит, например, “кристаллическая” решетка. Построение структуры с изотропными взаимодействиями хорошо сочетается с концепцией дрона как самостоятельного агента.

В структуре роя дронов, основанной на этих же принципах, что и атомы в реальных кристаллических решетках, дроны точно так же будут совершать колебательные движения, которые можно характеризовать как среднеквадратичную скорость движения бортов относительно друг друга, а представить её можно как изменение среднеквадратичного отклонения положения бортов относительно друг друга.

Если отслеживать изменение среднеквадратичного отклонения положения бортов до того, то можно определить момент перехода к равновесному (итоговому) состоянию. Чем ближе равновесное состояние будет ближе к идеальному (требуемому), тем лучше рой будет выполнять поставленную перед ним задачу.

Приблизительно вычислив время сборки роя его можно отрегулировать (регулируя скорости дронов), чтобы оно совпадало со временем, затрачиваемым на перелёт роя дронов к месту назначения. Это обеспечит оптимальный расход энергии, без трат на паразитные действия (например, простаивание).

### **Алгоритм дисперсионного анализа структуры**

Создание и тестирование алгоритмов оценивания будет производиться с помощью экспериментов, полученных при моделировании роя дронов. Данная математическая модель роя имеет следующие особенности: моделирование происходит в двухмерном пространстве (координата высоты стабилизируется независимо от движения в плоскости); размерами дронов пренебрегаем; не

учитываются аэродинамические условия среды; подсчёт численных коэффициентов для оценки структуры производится со стороны внешнего наблюдателя.

В основе оценки структуры роя дронов лежит принцип автокорреляционного анализа [8, 9]. В общем случае автокорреляция — это взаимосвязь последовательных элементов временного или пространственного ряда данных. Одним из вариантов представления автокорреляционной формулы в общем виде может являться следующее выражение:

$$\varphi(\varepsilon) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x)f(x - \varepsilon)dx \quad (1)$$

Применимо к рассматриваемой в данной статье функцию  $f(x)$  можно трактовать как плотность распределения дронов в некоторой области. Предполагается рассматривать эту функцию в некоторой окрестности произвольного дрона, а затем сопоставлять её со своей копией (или копиями), определенной возле некоторого другого дрона. Так как в регулярной структуре наблюдаются повторения расположения структурных единиц с некоторой периодичностью, для регулярных структур характерна корреляция данных с самими собой, что и является автокорреляцией. Таким образом, степень автокорреляции позволит оценить регулярность структуры.

Принимается, что степень автокорреляции считается мгновенно. Принцип механизма определения степени автокорреляции предлагается устраивать следующим образом: для каждого дрона в рое определяются положения дронов-“соседей” (т. е. ближайших) относительно него. Полученные относительные координаты откладываются в абсолютной системе координат. Теперь мы можем сделать следующий вывод – в регулярной структуре положения дронов-соседей относительно одного любого дрона близки к положениям дронов-соседей относительно другого любого дрона, а, следовательно, при наложении мы увидим чёткую, регулярную картинку.

Полученное распределение соседей предстоит оценить численным критерием, в качестве которого можно использовать распределение положения дронов по углу.

В нашем случае необходимо достаточно точно отличить “кристаллическую” решетку от прочих структур (аморфного или газообразного состояния). Для “кристаллической” структуры ожидается увидеть шесть четких пиков распределений дронов по углу, которые можно наложить друг на друга в один, чтобы оценить его с помощью среднеквадратичного отклонения. Для регулярной структуры пики распределения будут более узкими, а, следовательно, отклонение будет меньшим, в случаях нерегулярных структур – ожидается противоположный эффект.

Полученное распределение соседей предстоит оценить численным критерием, в качестве которого можно использовать распределение положения дронов по углу.

В нашем случае необходимо достаточно точно отличить “кристаллическую” решетку от прочих структур (аморфного или газообразного состояния). Для “кристаллической” структуры ожидается увидеть шесть четких пиков распределений дронов по углу, которые можно наложить друг на друга в один, чтобы оценить его с помощью среднеквадратичного отклонения. Для регулярной структуры пики распределения будут более узкими, а, следовательно, отклонение будет меньшим, в случаях нерегулярных структур – ожидается противоположный эффект.

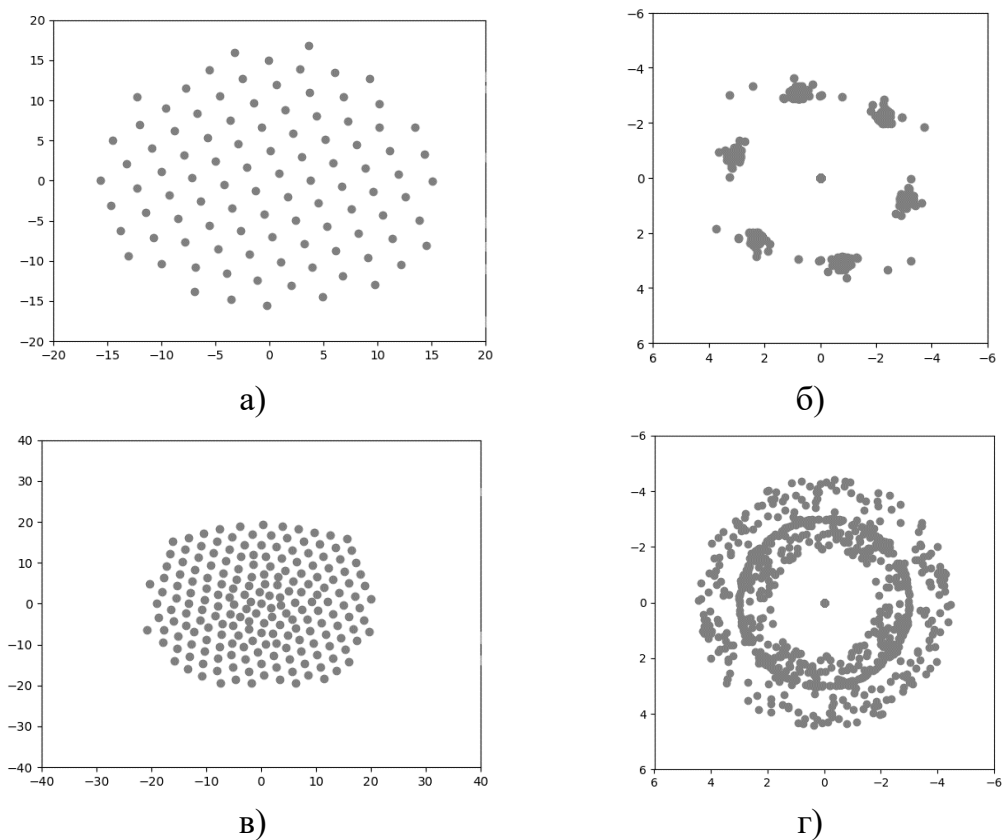


Рисунок 1 – примеры структур с соответствующими им распределения дрона-соседей: а), б) – для структуры близкой к “кристаллической”; в), г) – для нерегулярной.

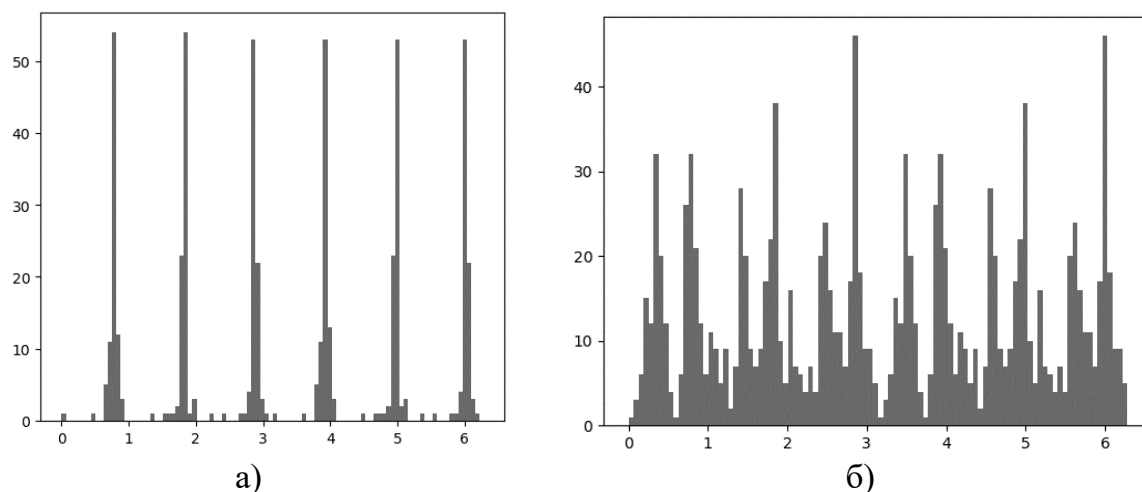


Рисунок 2 – гистограммы распределений положений дронов в зависимости от угла: а) для “кристаллической” решетки; б) для нерегулярной структуры

### Результаты работы алгоритма

Для данных задач входными данными являются массивы координат дронов в двухмерном пространстве. Для реализации автокорреляционного анализа необходимо задать область поиска соседей в радиусе, который чуть больше радиуса отталкивания. Первый этап предполагает получение картины относительного положения дронов соседей в глобальной системе координат, о которой уже было сказано выше.

После этого оценивается среднеквадратичное отклонение распределения положения дронов по углу, приведённое к одной шестой интервала. Для определения времени, затрачиваемого на сборку роя до получения равновесного состояния и определения качества этого самого равновесного состояния необходимо отслеживать изменение среднеквадратичного отклонения положения дронов относительно друг друга.

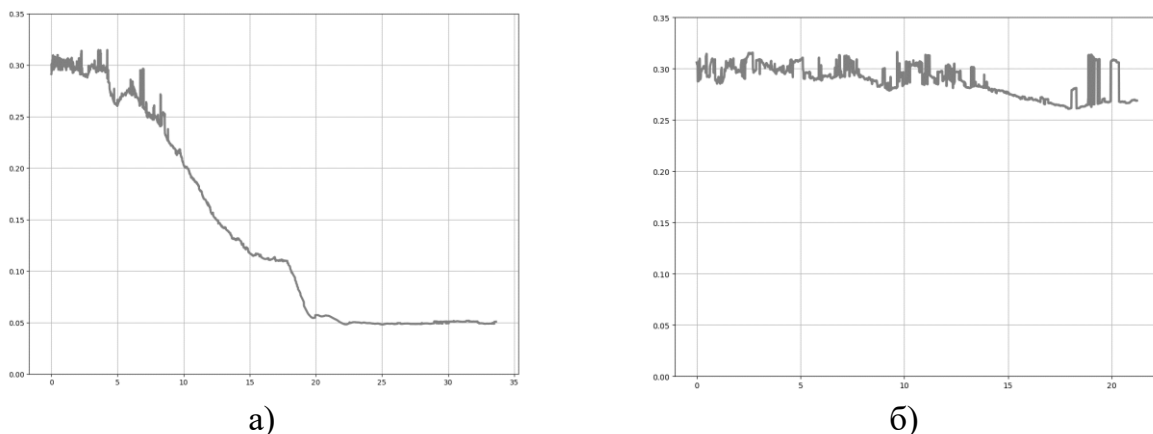


Рисунок 3 – Зависимость среднеквадратичного отклонения положения бортов в рое относительно друг друга от времени:

а) для “кристаллической” структуры; б) для нерегулярной структуры.

Анализируя графики с рисунка 3, можно отменить следующие факты: по обоим графикам можно сделать вывод, что при значении среднеквадратичного отклонения близком к 0.3 мы наблюдаем хаотичную, нерегулярную картину; по графику а) о структуре можно сказать, что к времени в 20 с рой достиг равновесного состояния. Причём, значение среднеквадратичного отклонения для этого состояния соответствует порядка 0.05. По графику б) можно сказать, что спустя время в 30 структура не перестала быть хаотичной, поскольку её значение среднеквадратичного отклонения не сильно отошло от значения в 0.3.

Таким образом, с помощью данного численного критерия нам удалось точно определить время сборки регулярной структуры до равновесного состояния, оценить качество этого равновесного состояния, а также чётко отделить нерегулярную структуру от регулярной.

### Заключение

В результате работы были разработаны алгоритмы численного оценивания регулярности структуры при моделировании роя дронов с помощью модифицированного механизма автокорреляционного анализа. Данный алгоритм позволит оценивать регулярность получаемых структур и определять затраты времени на их получение. Знание расчетного времени формирования структуры позволит организовать работу дронов оптимальным образом с точки зрения затрат времени.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Трубников, Г.В. Применение беспилотных летательных аппаратов в гражданских целях. 2008.

2. Бабич, Л.А. Групповое применение разведывательных и ударных беспилотных летательных аппаратов / Л. А. Бабич. - Текст: непосредственный // Молодой ученый. - 2019.
3. DARPA Subterranean Challenge 2018-2021.  
<https://research.csiro.au/robotics/our-work/darpa-subt-challenge-2018/>
4. Зегжда П.Д. Модели и метод поддержки принятия решений по обеспечению информационной безопасности информационно-управляющих систем / П.Д. Зегжда [и др.] // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. 2018. № 1. С. 43-47.
5. К.С. Амелин, Е.И. Антал, В.И. Васильев, Н.О. Граничина. Адаптивное управление автономной группой беспилотных летательных аппаратов// Санкт-Петербургский Государственный Университет konstantinamelin@mail.ru, cathrineantal@gmail.com, gnome@bk.ru, ngranichina@mail.ru
6. Duane T.Davis, Timothy H.Chung, Michael R.Clement, Michael A. Day. Consensus-based data sharing for large-scale aerial swarm coordination in lossy communications environments - 2016
7. А.М. Бойко, Р.А. Гиргидов. Обеспечение пространственной устойчивости роя автономных беспилотных летательных аппаратов – 2021
8. Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г., Липатова Н.Г., Черныш А.Я. Применение математических методов при проведении диссертационных исследований.- Москва: Российская таможенная академия, 2011.- 514 с.
9. Анисимов Е.Г., Анисимов В.Г., Солохов И.В. Проблемы научно-методического обеспечения межведомственного информационного взаимодействия // Военная мысль. 2017. № 12. С. 45-51.

## ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ РАСПОЗНАВАНИЯ АНАЛОГОВОГО АУДИОСИГНАЛА

### Аннотация

В статье рассмотрены основные принципы создания математических моделей искусственных нейронных сетей. Основное внимание уделяется области обработки аудиосигналов, а также потенциалу применения алгоритмов машинного обучения в данной сфере.

*Ключевые слова:* нейронные сети, машинное обучение, обработка аудиосигналов.

### Введение

Обработка музыкальных аудиосигналов является сложной областью по большому количеству причин. Одна из них – необходимость в адекватном представлении входящих данных. Наиболее распространенным решением является использование партитур, что дает возможность получить доступ к логичному и ясному описанию данных, однако этот формат зачастую бывает недоступным (да и корректность записи партитуры далеко не всегда соответствует произведению). Другим решением стала запись музыки в формате MIDI также могла бы быть использована для записи, но человеко-читаемость данного формата оставляет желать лучшего. Однако некоторые данные теряются при преобразовании в MIDI если музыка не была написана с учетом стандартов MIDI, что встречается редко. Цифровые аудио форматы, такие как WAV, mp3 и ogg, используются, когда само аудио является частью сигнала. Форматы с потерями, такие как mp3 и ogg, хороши для человеческого уха, но могут упускать важные данные, да и качество звучания в них однозначно ухудшается при перезаписи, а при использовании на высококлассной технике становится слышны и потери обертонов при сжатии аудио сигнала. Кроме того, некоторые кодировки создают артефакты, которые могут вводить в заблуждение автоматический анализатор.

При распознавании аудио сигнала наиболее часто встречаются задачи классификация звуков (определение типа звука на фоне шума, например, лай собаки или стук двигателя) однако, в данном случае, мы будем рассматривать задачу распознавания в контексте преобразования аудио записи музыкального произведения в нотную партитуру с помощью нейронных сетей различной топологии.

### Методы подготовки аудио сигнала для последующего распознавания

Результаты глубокого обучения сильно зависят от исходных данных, и представить аудио в адекватном для машинного восприятия виде довольно сложно, даже если оно будет представлено качественной записью в lossless формате. Использовать простое представление аудио уравнением волны – отобразив зависимость амплитуды от времени – недостаточно [1 - 3], Используем быстрое



преобразование Фурье [4, 5], получим периодограмму, которая демонстрирует величину сигнала, приходящуюся на каждую из частот. В случае музыкальных отрывков чаще всего сила сигнала приходится на низкие частоты несмотря на то, что изначально берётся диапазон от 1 Гц до частоты Найквиста, в этом случае 22 тысяч Гц. Далее наступает очередь оконного преобразование Фурье (1),

$$F(t, w) = \int_{-\infty}^{\infty} f(\tau)W(\tau - t)e^{-i\tau w} d\tau \quad (1)$$

где мы используем окно Хемминга (рисунок 1) как оконную функцию, внутри которой и будет выполняться быстрое преобразование Фурье.

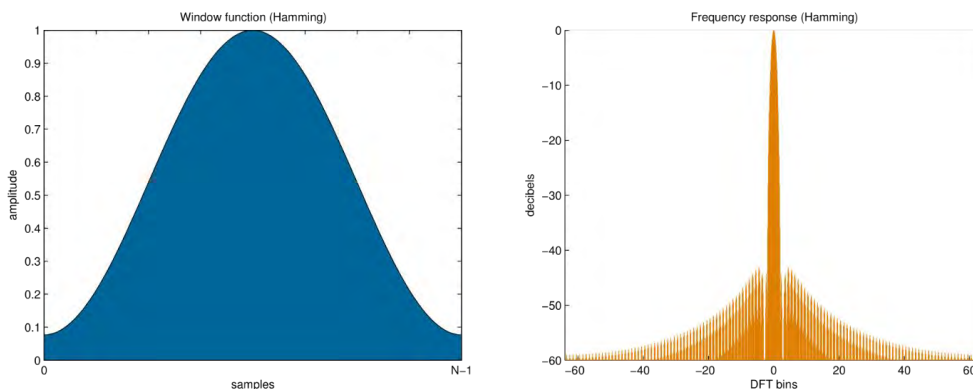


Рисунок 1 – Окно Хемминга

Его ширина в этом эксперименте составляла 25 мс, а шаг – 10 мс. Стандарт фильтрации – 26 фильтров, после пропускания результатов через них мы получим матрицу 26x100, которая показывает, как значения по фильтрам изменяются во времени. Последний шаг – мел-частотные кепстральные коэффициенты, которые мы получаем путем дискретного косинусного преобразования, что дает нам более полное представление о т. н. фонах, то есть особых отличительных признаках сигнала. Входными данными в исследовании является free music dataset. Следовательно, для тренировки было использовано порядка тысячи разнообразных коротких треков в lossless формате .wav

### Исследования возможности нейронных сетей

Первый метод – сверточно-рекуррентная модель (рисунок 2).

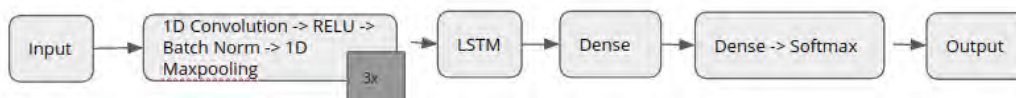


Рисунок 2 – CRNN сеть

Модель обучалась с использованием оптимизатора Adam с коэффициентом обучения 0,001, а функция потерь была категориальной кросс-энтропией. Модель была обучена в течение 70 эпох, и скорость обучения была снижена, если точность валидации достигала не менее 10 эпох. На рисунке 3 кривые потери и точности для обучающих и проверочных образцов. Как видно, модель имеет низкое смещение, но высокая дисперсия означает, что модель немного приспособлена к обучению даже после использования нескольких методов регуляризации. В целом, эта модель получила около 53% точности в наборе валидации.

Второй метод – параллельная модель сверточно-рекуррентной сети (рисунок 4).

Модель обучалась с использованием оптимизатора RMSProp с коэффициентом обучения 0,0005, а функция потерь была категориальной кросс-энтропией. Модель

была обучена в течение 50 эпох, и скорость обучения была снижена, если точность валидации достигла не менее 10 эпох. Эта модель имела потерю проверки около 51 % (рисунок 5).

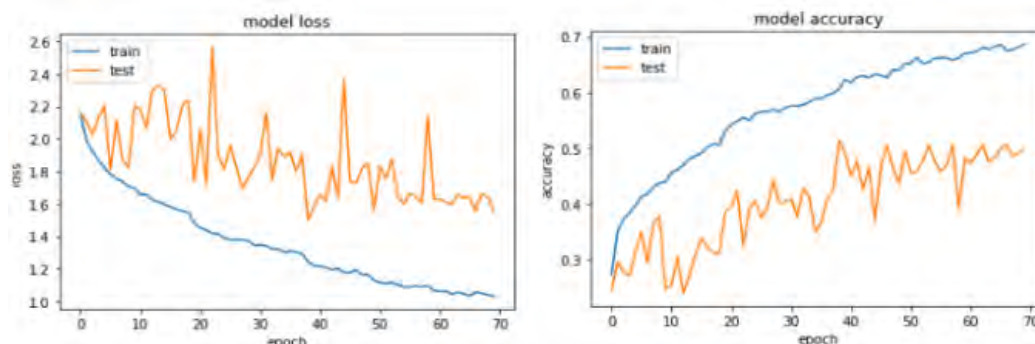


Рисунок 3 – Динамика процесса обучения CRNN сети

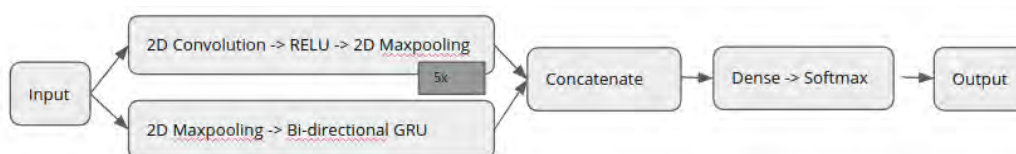


Рисунок 4 – параллельная модель CNN-RNN

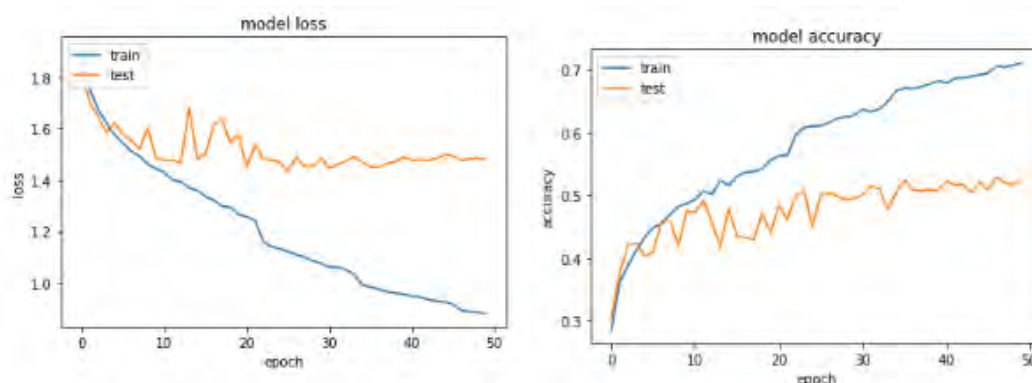


Рисунок 5 – Динамика процесса обучения CNN-RNN сети

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Karol J. Piczak, Environmental sound classification with convolutional neural networks / Karol J. Piczak // Institute of Electronic Systems Warsaw University of Technology, 2015 IEEE International workshop on machine learning for signal processing, sept. 17–20, 2015, Boston, USA.

2. How computers are learning to be creative.

URL:[https://www.ted.com/talks/blaise\\_aguera\\_y\\_arcas\\_how\\_computers\\_are\\_learning\\_to\\_be\\_creative/transcript](https://www.ted.com/talks/blaise_aguera_y_arcas_how_computers_are_learning_to_be_creative/transcript)

3. Keunwoo Choi Convolutional Recurrent Neural Networks for Music Classification. / Keunwoo Choi, George Fazekas, Mark Sandler, Kyunghyun Cho // ArXiv 1609.04243. Million Songs dataset: <https://labrosa.ee.columbia.edu/millionsong/>

4. Анисимов Е.Г., Анисимов В.Г., Солохов И.В. Проблемы научно-методического обеспечения межведомственного информационного взаимодействия // Военная мысль. 2017. № 12. С. 45-51.

5. Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г., Липатова Н.Г., Черныш А.Я. Применение математических методов при проведении диссертационных исследований.- Москва: Российская таможенная академия, 2011.- 514 с.

Е.В. Фоминов, А.А. Марченко, А.О. Мурцева  
Донской государственной технической университет,  
Ростов-на-Дону, Россия, fominoff83@mail.ru

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ НА ПЕРЕДНЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ТОКАРНОГО РЕЗЦА С УЧЁТОМ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЛУНКИ ИЗНОСА

### Аннотация

Данная работа посвящена моделированию температурного воздействия на передней поверхности токарного резца, вызванного тепловыделением в зоне вторичных пластических деформаций (ВПД). Для расчёта температуры в зависимости от длины контакта на рабочей поверхности инструмента применялся научный подход, использующий гидродинамические аналогии к оценке процесса ВПД. Расчёт стационарной теплопроводности в поверхностных микрообъёмах резца осуществлялся методом конечных элементов. Выходные параметры моделирования сравнивались с результатами проведённого ранее натурного эксперимента. Установлено удовлетворительное соответствие температуры поверхности резца в контрольной плоскости, полученной в результате цифрового моделирования, и температуры, зафиксированной в ходе натурного эксперимента; погрешность расчёта составила +8,6%.

*Ключевые слова:* токарная обработка, температура зоны резания, вторичные пластические деформации.

### Введение

Создание цифрового двойника процесса механической обработки деталей как динамической системы позволяет установить значения необходимых характеристик в любой момент её эволюции. Цифровому моделированию различных параметров процесса резания посвящено множество исследований, среди которых особо можно выделить работы, основанные на симуляции физико-механических и тепловых процессов в зоне обработки методом конечных элементов (МКЭ) [0,0]. Причём наибольшей точности при моделировании МКЭ можно достичь в том случае, когда часть входных характеристик для создания компьютерной модели получена на основании реального эксперимента [0]. Одной из важнейших характеристик процесса обработки является температура в зоне резания, поэтому предсказание этого параметра в ходе эволюции системы резания представляет собой весьма актуальную задачу [0-0]. Источниками нагрева передней поверхности резца является тепловыделение на участках первичных и вторичных пластических деформаций (ППД, ВПД), а также в зоне упругого контакта (УК) [0]. Научный подход, связанный с применением гидродинамических аналогий к оценке процесса ВПД, предложенный и развиваемый на кафедре «Металлорежущие станки и инструмент» Донского государственного технического университета, позволил получить математические зависимости, описывающие распределение температуры вдоль длины контакта  $l_k$  стружки с передней поверхностью инструмента [0,0], которая включает в себя участки ППД и ВПД. Согласно [0,0], температура зависит от времени (длины) контакта стружки с передней поверхностью резца, т.е. зависит от износа инструмента, и

достигает наибольшего значения на конце участка ВПД, здесь же происходит формирования лунки износа. Целью данной работы является моделирование температурного распределения в микрообъёме, примыкающем к передней поверхности резца на участках ВПД и УК, с учётом геометрических параметров лунки износа и длины контакта стружки с передней поверхностью инструмента.

### Объекты и методы исследований.

Объектом исследования является следующая система резания, результаты натурных испытаний для которой описаны в [0]: продольное точение заготовки из конструкционной стали 30 диаметром  $D=120$  мм резцом с режущей частью из твёрдого сплава Т15К6 без применения охлаждения, скорость резания  $v=3$  м/с, подача  $s=0,43$  мм/об, глубина резания  $t=2$  мм, передний угол  $\gamma=10^\circ$ . Для моделирования температурного поля выбран момент в эволюции системы, соответствующий пути резания  $L=1000$  м. Для построения температурного распределения была создана 3D-модель фрагмента токарного резца в программе Компас-3D. Сферическая поверхность лунки износа была аппроксимирована плоскостями с сохранением её основных геометрических характеристик согласно профилограмме передней поверхности [0].

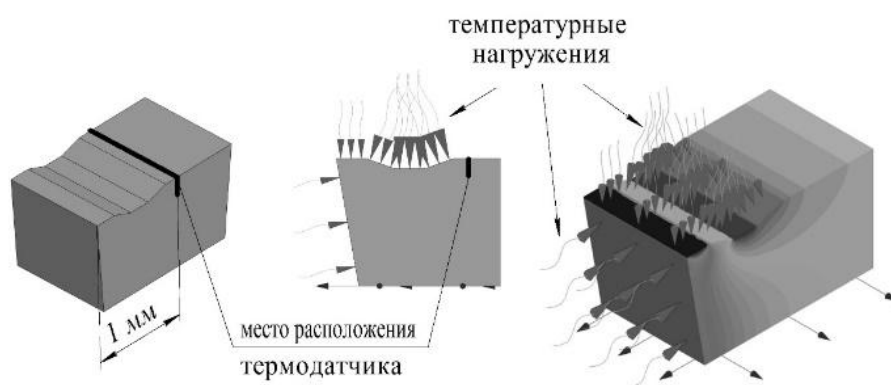


Рисунок 1 – Трёхмерная модель фрагмента режущей части токарного резца в месте образования лунки износа на передней поверхности и схема температурных нагрузений

К плоским поверхностям модели приложены температурные нагрузки, соответствующие средней температуре на данном участке, согласно зависимостям [0,0]. Задняя поверхность модели нагрета до температуры, представляющей собой усреднённые значения между температурой, выделяемой в зоне ППД [0], и максимальной температурой на конце контакта заготовки с задней поверхностью резца, определённой по методике [0,0]. Длина контакта с обрабатываемым материалом по задней поверхности для исследуемого момента эволюции системы резания при этом также определялась по результатам натурного эксперимента. Расчёт стационарной теплопроводности трёхмерной модели фрагмента токарного резца осуществлялся с помощью приложения АРМ FEM (Россия) для Компас-3D.

### Результаты и обсуждение

Произведён расчёт стационарной теплопроводности трёхмерной модели фрагмента токарного резца с помощью приложения АРМ FEM для Компас-3D, результаты которого в виде изообластей представлены на рис. 2.

В реальном опыте температура фиксировалась методом искусственной термопары на основании показаний термодатчика, установленного в специальный паз так, как показано на рис. 1. Согласно результатам измерений, средняя температура на данном участке резца в момент, соответствующий пути резания  $L=1000$  м, составила  $1015$  °С. Сравнение данных результатов цифрового и натурного экспериментов показали хорошее соответствие. В результате расчёта МКЭ средняя температура в плоскости, где располагался термодатчик, составила  $1102$  °С, а погрешность моделирования  $\varepsilon = + 8,6\%$ .

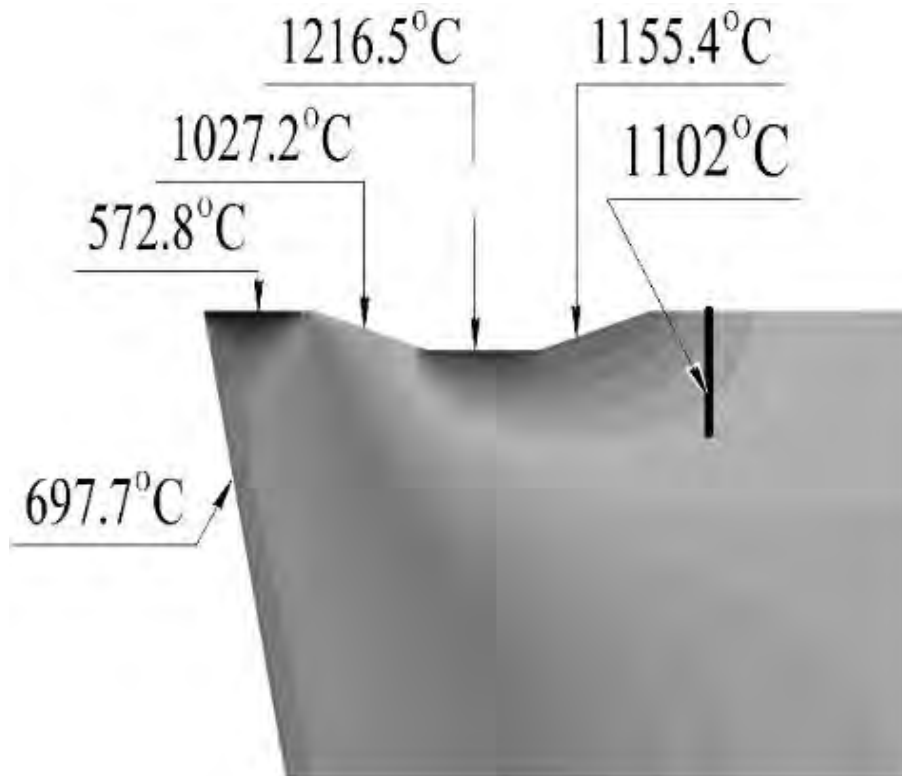


Рисунок 2 – Результаты расчёта стационарной теплопроводности с указанием температуры в контрольной плоскости

### Заключение

Моделирование температуры на рабочей поверхности инструмента сочетанием МКЭ и научного подхода, основанного на применении гидродинамических аналогий к процессам ВПД, позволяет получить результат, достаточно близкий к показателям реального эксперимента, и может быть использован для прогнозирования температуры в заданный момент эволюции системы резания. В этом случае основным фактором повышения температуры с течением времени обработки будет служить увеличение длины (времени) контакта обрабатываемого материала с рабочими поверхностями инструмента, вызванное процессами изнашивания.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bhojar, Y. R. Finite element analysis on temperature distribution in turning process using Deform-3D / Y. R. Bhojar, P. D. Kamble // International Journal of Research in Engineering and Technology. - 2013. - Vol. 2. - P. 901-906.
2. Grzesik, W. Advanced Machining Processes of Metallic Materials: Theory, Modelling, and Applications, second ed./ W. Grzesik. - Elsevier, 2017. - 446 p.

3. Рыжкин, А.А. Обработка материалов резанием. Уч. пособие/ А.А. Рыжкин, К.Г. Шучев, М.М. Климов. - Ростов-на-Дону: изд. центр ДГТУ, 2007. - 419 с.

4. Чичинадзе, А.В. Температурный режим при трении инструментальных материалов с учётом объёмности источника тепловыделения (статья)/ А.В. Чичинадзе, К.Г. Шучев, А.А. Рыжкин, А.И. Филипчук, М.М. Климов // Трение и износ. - 1986. - Т.7, № 3.

5. Рыжкин, А.А. Применение гидродинамических аналогий для оценки контактной температуры инструмента при высокоскоростной обработке (статья) / А.А. Рыжкин, К.Г. Шучев // Вестник ДГТУ. Сер. Трение и износ. - Ростов н/Д, 2000.

6. Чикмардин, В.Л. Влияние покрытий на формирование зоны вторичных деформаций и изнашивание твёрдых сплавов: дис. канд. техн. наук. - Ростов-на-Дону, 1987. - 199 с.

7. Резников, А.Н. Теплофизика резания/А.Н. Резников. - М.: Машиностроение, 1969. - 288 с.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ПЕРВОЙ СТЕНКИ РЕАКТОРА ИТЭР В ПРОЦЕССЕ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКИ

### Аннотация

В работе изложено исследование макета пальцев высоконагруженной первой стенки реактора-токамака ИТЭР в процессе лазерной сварки биметаллической крышки (CuCrZr-IG/316L(N)-IG). Выполнен тепловой и механический расчеты макета методом конечных элементов в программе Ansys WorkBench. При выполнении расчетов макета был использован приближенный метод моделирования процесса лазерной сварки с допущениями. Полученные результаты могут быть использованы в следующих работах для выполнения корректного механического расчета последующих этапов изготовления макетов.

*Ключевые слова:* ИТЭР, панели первой стенки, пальцы, макеты, лазерная сварка, тепловой расчет, механический расчет, метод конечных элементов, напряженно-деформированное состояние.

### Введение

ITER (ИТЭР) – первый в мире международный термоядерный экспериментальный реактор-токамак, строящийся в настоящее время во Франции. Один из основных внутрикамерных элементов ИТЭРа – обращенные к плазме компоненты панелей первой стенки (ППС) [3]. АО «НИИЭФА», где была выполнена данная работа, является одним из основных изготовителей данных панелей. Панели первой стенки покрыты обращенными к плазме компонентами, так называемыми пальцами. Пальцы панелей первой стенки состоят из следующих компонент: стальное основание, биметаллическая крышка с гипероватроном и бериллиевой облицовки – набора плиток.

Одним из этапов изготовления пальцев ППС является лазерная сварка биметаллической крышки с основанием. Все этапы (технологии) изготовления пальцев первой стенки требуют предварительных исследований на макетах упрощенной конфигурации (см. рис. 1а).

Целью данной работы является имитация напряженно-деформированного состояния макетов первой стенки в процессе одного из этапов изготовления макетов – лазерной сварки биметаллической крышки с основанием для учета напряженно-деформированного состояния (НДС) макета при моделировании последующих этапов изготовления макетов.

### Методы

Для достижения цели были поставлены следующие задачи: выполнить тепловой и механический расчеты макета в процессе лазерной сварки, получить НДС макета. Все расчеты были выполнены методом конечных элементов в программе

Аnsys WorkBench. Для расчета была рассмотрена 1/2 часть макета с учетом симметрии. На данном моделируемом этапе производства стальная опора и элементы облицовки отсутствуют (см. рис. 1а), поэтому не учитываются в расчете. Материалы макетов: нержавеющая сталь 316L(N)-IG и хромоциркониевая бронза CuCrZr [1]. Все расчеты были выполнены с учетом пластических свойств стали и бронзы. Конечно-элементная модель представлена на рисунке 1б.

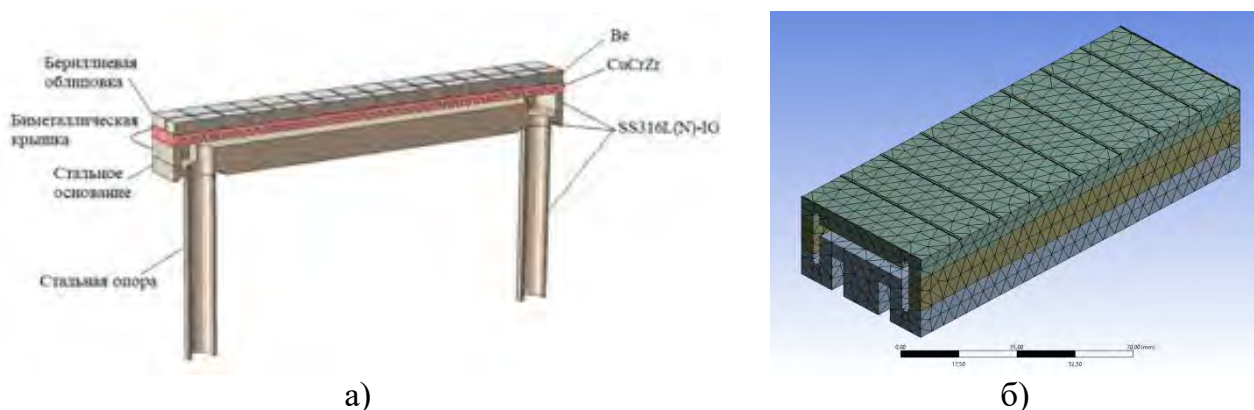


Рисунок 1 – Макет пальца ППС: а) общий вид макета в разрезе, б) конечно-элементная модель, используемая для расчетов

При выполнении расчетов макета был использован указанный ниже приближенный метод моделирования процесса лазерной сварки с допущениями:

- лазерная сварка– способ сварки плавлением, при котором металл нагревают излучением лазера [2]. Особенностью лазерной сварки является быстрый точечный нагрев металла в области сварного шва до температуры плавления ( $1450^{\circ}\text{C}$ ). Данное значение необходимо учесть в тепловом расчете. Сварка продольных швов выполняется последовательно с промежутком по времени более 10 минут между каждым швом для изменения положения макета в оснастке, что также необходимо учесть в расчетах.

- продольные укорачивающие напряжения (рис.2), возникающие в сварных швах вдоль макета, приводят к продольной изгибной деформации макета, которая была измерена на 6 сваренных макетах и составляет в среднем  $X = 0,5\text{--}0,6$  мм (рис.3). Таким образом для получения НДС макета после лазерной сварки также необходимо решить обратную задачу – подобрать соответствующее значение продольной силы, действующей вдоль длинных швов (швы вдоль макета), приводящей к деформации макета, полученной при испытаниях;

- продольными укорачивающими напряжениями (рис.2), возникающими в сварных швах поперек макета, можно пренебречь из-за малой длины швов поперек макета.

## Результаты

Тепловой расчет. В качестве тепловой нагрузки была задана температура плавления  $T = 1450^{\circ}\text{C}$  в продольном сварном шве. Для моделирования точечного нагрева температура задается на поверхности свариваемых элементов на заданное время. Время нагрева деталей было определено из скорости перемещения лазерного луча. Для повторения истории нагревания расчет выполнялся в 3 шага: нагрев в процессе лазерной сварки одного из продольных швов; отсутствие тепловой нагрузки



для изменения положения макета в оснастке; нагрев в процессе лазерной сварки второго продольного шва.

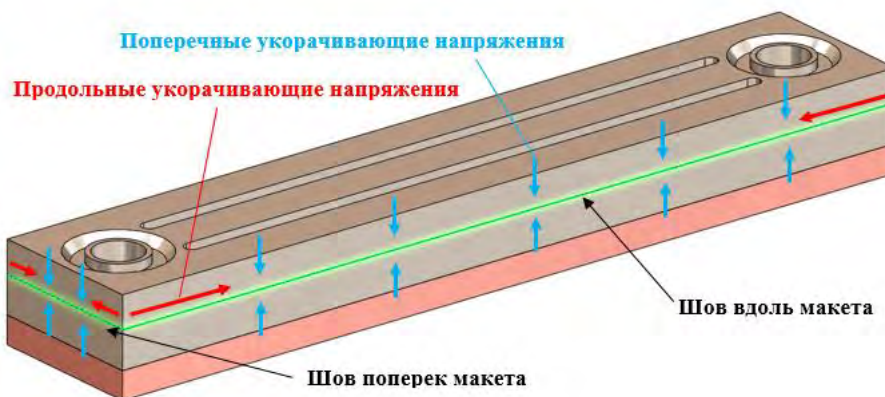


Рисунок 2 – Напряжения, возникающие в сварном шве

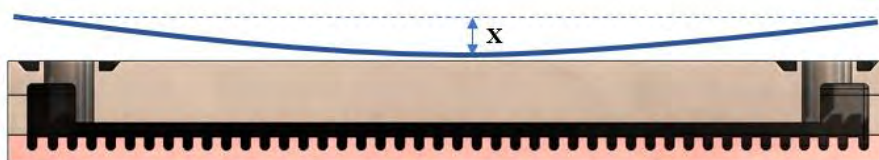
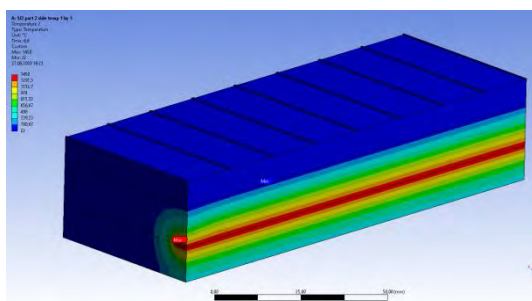
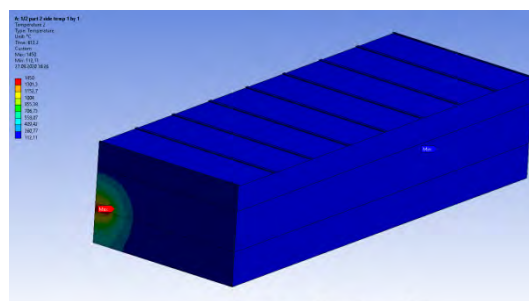


Рисунок 3 – Изгиб макета после лазерной сварки

Распределение температур по макету, полученное в результате теплового расчета, показано на рисунке 4. В результате нагрева в процессе лазерной сварки одного из продольных швов значения температур варьируются от 22 °С до 1450 °С (рис. 4а). В результате нагрева в процессе лазерной сварки второго продольного шва – от 112 °С до 1450 °С (рис. 4б). Механический расчет. В данной работе был выполнен механический расчет макета только под действием распределения температур при нагреве сварных швов и последующем охлаждении до комнатной температуры. Однако в результате расчета не был получен прогиб  $X=0,5-0,6$  мм, измеренный на реальных изделиях после лазерной сварки (см. рис. 3). Для моделирования продольных укорачивающих напряжений (см. рис. 2), возникающих в сварных швах вдоль макета и приводящих к продольной изгибной деформации макета, к малому объему материала около сварных швов была приложена продольная сила в виде объемной плотности силы.



а)



б)

Рисунок 4 – Распределение температуры по макету: а) нагрев в процессе лазерной сварки одного из продольных швов; б) нагрев в процессе лазерной сварки второго продольного шва.

Таким образом, для получения НДС макета после лазерной сварки была решена обратная задача – подобрано соответствующее значение продольной силы (объемной плотности силы), действующей вдоль длинных швов (швы вдоль макета на рис. 2) и направленной к середине макета, приводящей к деформации макета, полученной при изготовлении.

Под действием теплового распределения и подобранной нагрузки, действующей вдоль сварного шва, был выполнен механический расчет НДС макета в процессе лазерной сварки. Для повторения истории нагревания расчет выполнялся в 3 шага: нагрев в процессе лазерной сварки одного из продольных швов; нагрев в процессе лазерной сварки второго продольного шва; остывание макета после лазерной сварки и возникновение продольных укорачивающих напряжений, приводящих к продольной изгибной деформации макета.

На рисунке 5 представлены результаты механического расчета макета в процессе лазерной сварки биметаллического соединения – перемещения макета в вертикальном направлении. Объемная плотность силы была подобрана таким образом, что прогиб в середине макета соответствовал «экспериментальному» значению 0,5 мм.

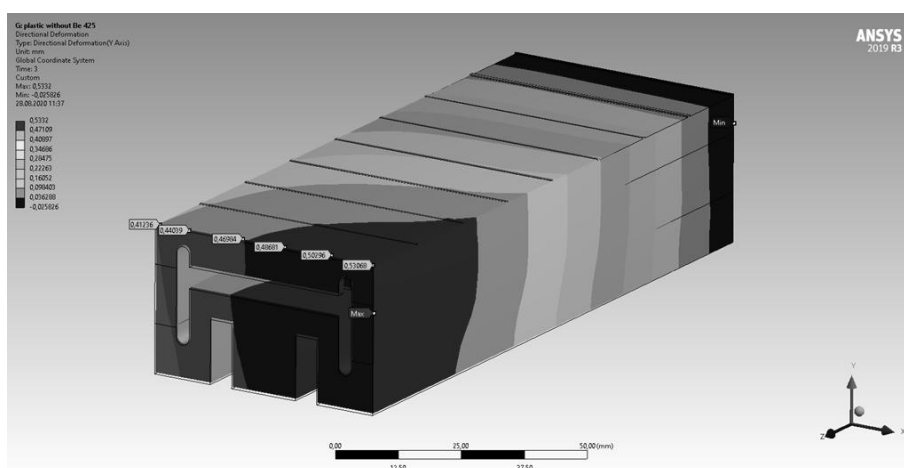


Рисунок 5 – Перемещения макета в вертикальном направлении – по оси Y, в мм

### Заключение

В данной работе был разработан и представлен приближенный метод моделирования процесса лазерной сварки с допущениями. В работе был выполнен тепловой расчет макета в процессе лазерной сварки с учетом некоторых упрощений. Под действием теплового распределения, полученного в тепловом расчете, и подобранной нагрузки, действующей вдоль сварного шва, был выполнен механический расчет НДС макета в процессе лазерной сварки. Полученное НДС макета может быть использовано в следующих работах для выполнения корректного механического расчета последующих этапов изготовления макетов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Design and construction rules for mechanical components of nuclear installation RCC-MR. – Paris.: AFCEN, 2007.
2. Википедия [Электронный ресурс], <https://ru.wikipedia.org>
3. ITER [Электронный ресурс], <https://www.iter.org/>

Шэнь Юньфэн, М.Б. Москаленко  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Санкт-Петербург, Россия, [kgm-spb@list.ru](mailto:kgm-spb@list.ru)

## **ПЕРСПЕКТИВЫ СОЗДАНИЯ СЕМЕЙСТВА КОЛЕСНЫХ ШАССИ ЭКСТРЕМАЛЬНОЙ ПРОХОДИМОСТИ**

### **Аннотация**

В работе рассмотрен подход к построению методики автоматизированного проектирования семейства мобильных колесных шасси различных весовых категорий и хозяйственного назначения. Предложены принципы унификации проектирования оригинальных узлов и выбора поставляемых комплектующих. Проанализированы основные направления приложения технологии и применения перспективных машин. Указаны отраслевые технологии, позволяющие снизить себестоимость серийного выпуска изделий.

*Ключевые слова:* транспортные машины, гибридные трансмиссии, механизм распределения мощности.

### **Введение**

Технологии проектирования на основе использования цифровых двойников могут позволить существенно ускорить разработку опытных и серийных образцов и представляются особенно выгодными при разработке серий конструктивно-сходных изделий. Для построения базовой цифровой модели надлежит выбрать должный уровень общения, позволяющий интегрировать в единую структуру описания частные расчетные методы и конструкторские решения, достаточно универсальные, чтобы быть типовыми. Очевидной слабостью такого подхода будет являться поиск решений внутри заранее определенного множества. Но подход будет, как ожидается, оправдан в экономическом аспекте – за счет снижения себестоимости разработки, технологии производства, внедрения условно стандартизуемых решений, агрегатов, узлов. Эффективность подхода будет существенно зависеть от уровня предпринятых обобщений. Изучение достаточно частного вопроса определения структуры колесного шасси экстремальной проходимости в рамках квалификационной работы аспиранта позволило выявить общность структуры идеализированных и серийно выпускаемых объектов и предложить подход к унификации и возможности автоматизации разработки проектов шасси экстремальной проходимости.

Целью исследования является унификация структуры шасси экстремальной проходимости с соблюдением уровней рационального стратифицирования использования частных решений.

### **Методы**

Для достижения поставленной цели использовали методы теории движения транспортных машин, теоретической механики, инженерный эксперимент и др.

### **Результаты и обсуждение**

В основе анализа лежат предложения коллектива, возглавляемого В.В. Громовым (Ленинград – Санкт-Петербург, ВНИИТрансмаш) [1,2]. Концепция

построения шасси проанализирована в статье [3]. Эффективность предложенных конструктивных решений иллюстрируется содержанием публикации [4].

Однако, предложенные и реализованные решения направлены на вопрос создания мобильного шасси, эффективно работающего в экстремальных условиях проходимости на планетах, отличных от Земли. Представляет интерес приложение таких решений к земным ландшафтам и отраслям хозяйства.

На рис. 1 схема шасси, предложенная коллективом ВНИИТрансмаш [1,3]. Шасси состоит из трех шарнирно-сопряженных двухколесных модулей, связь между которыми предусматривает возможность управляемого изменение базы транспортного средства и использования шагающего режима при преодолении препятствий и участков грунта с низкой несущей способностью (в том числе – сыпучих грунтов с углами естественного залегания). На шасси используются шесть цилиндроконических мотор-колес. Применение мотор-колес оправдано при малых скоростях передвижения. Конструкция цилиндроконического колеса практически исключает для шасси потерю подвижности в результате посадки на днище. Принцип управления поворотом – бортовой. Испытания макета на полигоне ВНИИТрансмаш и, позднее, в пустыне Мохави [4] подтвердили возможность преодоления машиной препятствий, высота которых превышала радиус колеса, возможность движения по дюнам и барханам. Последователями В.В. Громова схема шасси использовалась при создании демонстраторов и прототипов специальных роботов (см., например, обзорную статью [5]).

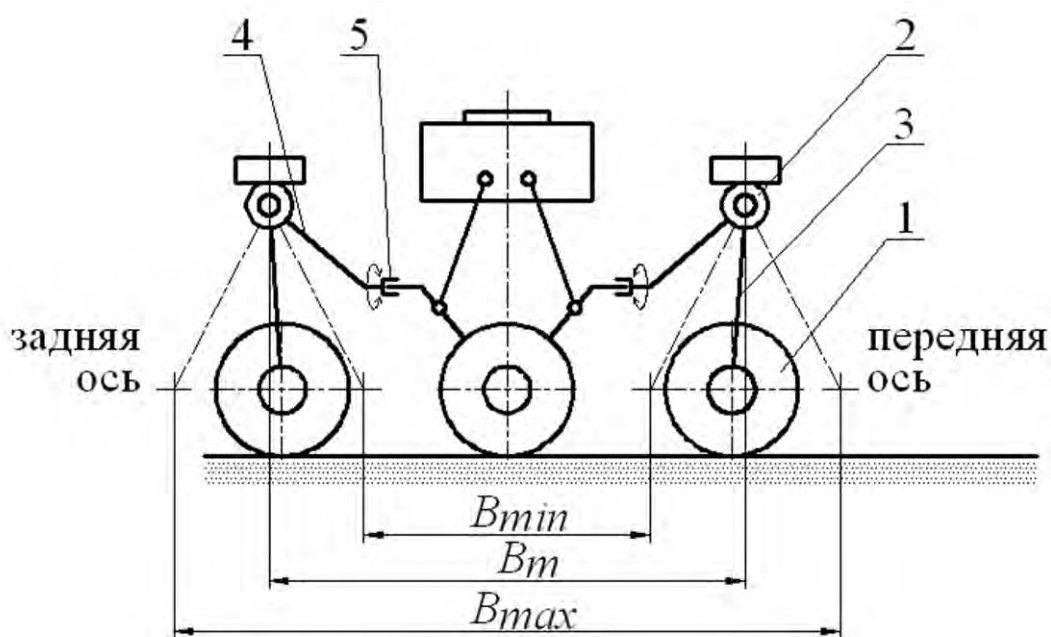


Рисунок 1 – Схема адаптивного шасси с системой датчиков: 1 – мотор-колесо; 2, 3 – механизм шагающего; 4 – шарнирная рама, 5 – продольный шарнир;  $B_{\min}$ ,  $B_m$  и  $B_{\max}$  – минимальная, средняя и максимальная база

Изучение строения данного шасси, однако, позволило выделить потенциал, позволяющий применить заложенные В.В. Грозовым принципы при разработке мобильных технологических платформ, работающих на пересеченной местности. Помимо частного использования в зонах техногенных катастроф, при разведке местности (например, построении карт береговой линии [5]) интерес представляет

применение родственных решений в транспортной отрасли, сельском хозяйстве, лесозаготовительной промышленности.

В отдельных случаях удастся найти существенные аналогии с уже предложенными решениями, в других – указать перспективные подходы. Во всех случаях выявленные тенденции позволяют создать основу для автоматизации проектирования мобильных платформ и унификации технических решений.

Структура исходного шасси подразумевает сегментирование на модули, содержащие в общем случае одну пару контактных движителей, разнесенную по бортам модуля. В практических аспектах движитель модуля может быть колесным и/или гусеничным. Число модулей – не менее двух. Трансмиссия – механическая или электромеханическая, гидромеханическая. Важно учесть согласование тягово-динамических характеристик модулей, избежание появления циркуляции мощности при прямолинейном движении. Примером реализации в серийном производстве построенного по такому принципу колесного шасси является семейство тракторов «Кировец» [7] и подобные шарнирно-сочлененные машины. Связь между модулями – механическая. Другой пример – семейство шасси харвестеров «Хайландер» [8]. Трансмиссия одного из модулей – гидромеханическая. Родственная рассматриваемой концепции вариант сочлененной гусеничной машины – семейство транспортеров ДТ [9]. Связь между модулями – механическая, предусмотрена установка дифференциала, исключающего продольную циркуляцию мощности. Вариантом такого семейства могли бы быть полноприводные колесные шасси, имеющие четыре колеса на модуль. Для оперативного повышения проходимости рационально использовать съемную гусеницу.

Формально ни в одном из рассмотренных примеров полностью не реализован принцип адаптивного шасси – исключена возможность управления базой машины, не предусмотрен свободный взаимный поворот модулей относительно оси машины. Однако, данные шасси являются примером машин высокой геометрической и опорно-сцепной проходимости, что определено в первую очередь структурой их трансмиссии. Характерно, что все они, по-видимому, являются примером конвергентной эволюции инженерных решений и не претендуют на общность происхождения. Общность просматривается в рамках исследуемой концепции и позволяет говорить о серийных машинах, как о частных случаях с характерными упрощениями относительно обобщающего варианта.

Транспортно-технологические платформы характеризуются большим уровнем энергопотребления. Универсальным решением представляется использование гибридной силовой установки параллельного типа на одной из секций (преимущественно – в передней) и электрического привода – на других секциях. Параллельный гибрид подразумевает наличие механической связи между тепловым двигателем и ведущими колесами. Это усложняет конструкцию, но дает преимущества в экономичности и надежности. Последовательный гибрид может быть использован, как менее дорогостоящее решение.

В отличие от макета планетохода, транспортно-технологические платформы передвигаются с относительно высокими скоростями. Это делает нецелесообразным использование мотор-колес – движитель модуля выгоднее приводить от центрального реверсивного тягового электродвигателя. Это ставит вопросы о типизации структуры электромеханического привода. На рис. 2 приведена структура трансмиссии.

Предложена обобщенная структура трансмиссии, редукторная часть которой состоит из редукторов  $R_1$  и  $R_2$ , а распределительная часть представлена

симметричным управляемым дифференциалом. Выходное звено редуктора  $R_2$  связано с одной из полуосей. Как и в традиционных конструкциях трансмиссий, полуоси являются выходными звеньями дифференциала.

Выходное звено редуктора  $R_1$  связано с ведущим звеном редуктора  $R_2$  и коробкой дифференциала. Редуктор  $R_1$  предназначен для снижения массы и габаритов используемого тягового электродвигателя. Типичная структура и методика определения передаточных отношений такого редуктора предложены в статье [10]. Редуктор  $R_2$  предназначен для обеспечения перераспределения сил тяги по бортам. Управляемый дифференциал позволяет реализовать три режима работы трансмиссии: прямолинейное движение с использованием симметричного дифференциала; поворот в заданном диапазоне радиусов; поворот с нулевым радиусом (на месте).

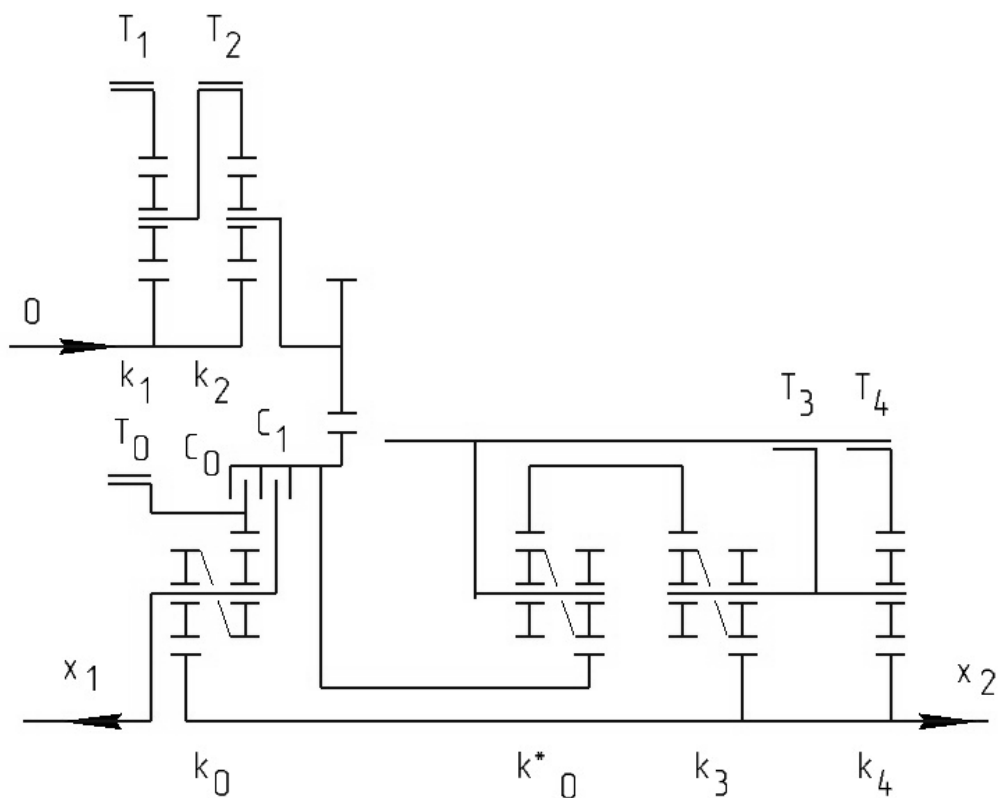


Рисунок 2 – Вариант схемы трансмиссии мобильной платформы: 0,  $x_1$  и  $x_2$  – входное и выходные звенья редукторной части;  $T_{0,1...4}$  – тормоза;  $C_{0,1}$  – блокирующие муфты;  $k_{0,1...4}$  – кинематические параметры планетарных рядов

На основе рассмотренной обобщенной схемы трансмиссии предложена конкретная кинематическая схема, защищенная патентом РФ [11]. Основным узлом трансмиссии является механизм распределения мощности (МРМ). Он состоит из трех планетарных рядов. Два обеспечивают управление поворотом в диапазоне от бесконечного радиуса (прямолинейное движение) до минимального заданного. При этом сохраняется возможность для обеспечения рекуперации мощности. Такую структуру можно считать традиционной. Третий ряд выполняет функции простого дифференциала. Элементами управления являются тормоза и блокирующие муфты, связанные с основными звеньями механизма. При этом муфта  $C_0$  используется для переключения режимов поворота между плавно регулируемым и нулевым радиусами,

а муфта  $C_1$  позволяет блокировать механизм для обеспечения максимальной проходимости в прямолинейном движении. Муфта  $C_0$  дополнительно может быть использована для длительного разобщения двигателя и ведущих колес (например, в режиме буксировки платформы). Тормоза могут использоваться в режиме управляемого буксования. Тормоз  $T_0$  может быть использован, как стояночный. Рабочие тормоза и колесные редукторы на рис. 2 условно не показаны.

Функцию простого дифференциала выполняет трехзвенный механизм с кинематическим параметром  $k_0 = 2$ . Значения  $k_1$  и  $k_2$  определяются на основе рекомендаций, например, работы [11].

В рассматриваемом примере секция поворачивает с минимальным относительным радиусом  $\rho = 2,78$ . Такое значение позволяет гарантировать, что с возможностью рекуперации мощности будут реализованы значения  $\rho = 3 \dots 4$ , характерные для холостого хода транспортно-технологических машин. Меньшие радиусы можно скомпенсировать за счет поворота на месте. Относительный радиус поворота и передаточное отношение МРМ связаны следующими соотношениями  $\rho = 0,5(u+1)/(u-1)$  и  $u = (\rho+0,5)/(\rho-0,5)$ , где  $u = V_2/V_1$  – передаточное отношение механизма распределения мощности,  $V_2$  и  $V_1$  – линейные скорости бортов ([12]).

Относительному радиусу  $\rho = 2,78$  соответствует межбортовое передаточное отношение  $u = 1,44$ . Это позволяет использовать результаты синтеза кинематической схемы, выполненного в диссертации [12]. Можно заметить, что неиспользованным в [13] остался вариант трансформации планетарного механизма с кинематическим параметром  $(-1,38)$  в механизм с параметром  $2,38$ . Эта процедура позволяет получить новую кинематическую схему редукторной части МРМ, представленную на рис. 2. Для рассматриваемого случая  $k_3 = 2,38$  и  $k_4 = (-2,05)$ . Преимуществом такой схемы является простота конструкции редукторной части МРМ.

### Заключение

Разработанный и представленный в данной работе подход может быть использован при создании САПР и традиционном проектировании колесных и гусеничных сочлененных мобильных платформ различного назначения.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пат. 2019463 РФ МПК 51 В62 D 57/00. Сочлененное полноприводное транспортное средство и способ изменения направления его движения / Веткин Р.К. и др.; патентообладатель ВНИИТМ. - заявл. 11.04.1990; опубл. 15.09.1994, Бюл. № 17.
2. Пат. 2022860 РФ МПК 51 В62 D 57/02. Трехосное полноприводное колесное транспортное средство и способ его перемещения по препятствиям / Громов В.В. и др.; патентообладатель ВНИИТМ. - №4855768/11; заявл. 01.08.1990; опубл. 15.11.1994, Бюл. № 21.
3. Адаптивные шасси подвижных роботов / Е.В. Авотин, Р.Ю. Добрецов, С.И. Матросов // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. - 2013. - № 3 (178). – С. 230-237.
4. Испытания марсохода в пустыне Мохави / Громов В.В. // Земля и Вселенная. - №6. - 1993.
5. Vladykin S. et. Hi mobility locomotion systems and board manipulators for nuclear robots application. Proceedings of Astra 2017. ESA, 20-22 June 2017. Leiden. Netherlands. [https://robotics.estec.esa.int/ASTRA/Astra2017/0.%20Tuesday%2020%20June/Poster%20Session/P24\\_Vladykin.pdf](https://robotics.estec.esa.int/ASTRA/Astra2017/0.%20Tuesday%2020%20June/Poster%20Session/P24_Vladykin.pdf)

6. Разработка научно обоснованных технических решений по созданию подвижных комплексов мониторинга береговых зон / В.С. Макаров // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. - 2017. - № 3 (118). - С. 157-167.
7. Теория и расчет трактора «Кировец» / Е.А. Шувалов и др. Под общей ред. А.В. Бойкова. - Л., «Машиностроение», 1980. - 208 с.
8. <https://www.forsttechnik.at/produkcia/highlander-hl20-1> (Дата обращения 20.02.2022).
9. Двухзвенные транспортёры ДТ-10 и ДТ-10П: техническое описание и инструкция по эксплуатации. М.: «Военное издательство», 1988. - 160 с.
10. Трансмиссия с электромеханической передачей для тракторов и дорожно-строительных машин / Г.П. Поршнева [и др.] // Известия МГТУ МАМИ. - 2020. - №2 (44). - С. 33-41.
11. Пат. 2763002 РФ МПК 51 В60К 17/35 (2006.01), F16Н 48/30 (2012.01), F16Н 37/08 (2006.01). Механизм распределения мощности в трансмиссии транспортного средства / Добрецов Р.Ю. и др.; патентообладатель Р.Ю. Добрецов, А.Г. Семенов. - №2021124995; заявл. 23.08.2021; опубл. 24.12.2021, Бюл. № 36.
12. Дидиков Р.А. Улучшение маневренности колесных машин применением управляемого механизма распределения мощности: диссертация ... кандидата технических наук: 05.02.02. - СПб, 2019. - 148 с.



Р.Г. Канцев, К.Д. Андреев, А.А. Москалец, М.А. Скотникова  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Санкт-Петербург, Россия, romankancev@mail.ru

## СРАВНЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВНУТРЕННЕГО КОНВЕКТИВНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ СОПЛОВЫХЛОПАТОК ГАЗОВОЙ ТУРБИНЫ

### Аннотация

В работе представлены результаты расчета температурно-напряженного состояния сопловойлопатки газовой турбины в программном комплексеCOLD, установлен наиболее эффективный вариант внутреннего конвективного охлаждения за счёт изменения конструкции дефлектора и добавления интенсификаторов охлаждения.

*Ключевые слова:* газовая турбина; сопловая лопатка; дефлектор; интенсификатор охлаждения; термические напряжения; программный комплекс COLD.

### Введение

Известно, что в газотурбинной установке (ГТУ) увеличение начальной температуры и давления газа является эффективным способом улучшения показателей термической эффективности установки, ее термического КПД и удельной мощности. Расчёты показывают, что увеличение только начальной температуры газа на 100 °С приводит к росту удельной работы установки на 20 %.

Однако, энергомашиностроительные материалы лопаток ГТУ по механическим свойствам не выдерживают высокие температуры эксплуатации и требуют разработки систем внутреннего конвекционного охлаждения сопловыхлопатонок газовых турбин.

Различают три способа воздушного охлаждения сопловых и рабочих лопаток турбин:

- 1) путем внутреннего конвективного теплообмена;
- 2) путем пленочно-заградительного охлаждения;
- 3) путем проникающего (пористого) охлаждения.

Целью работы является выбор эффективного способа внутреннего конвективного охлаждения сопловой лопатки газовой турбины за счёт изменения конструкции дефлектора и применения интенсификаторов охлаждения.

Для достижения указанной цели необходимо было решить следующие задачи:

- сделать выбор нужного профиля лопатки газовой турбины;
- освоить программу COLD;
- провести расчёт двумерной гидравлической модели в программе COLD при охлаждении лопатки воздухом (исходное состояние);
- изменить конструкционные особенности дефлектора и самой лопатки и провести расчёты различных вариантов;
- сравнить результаты расчёта первоначальной двумерной гидравлической модели с измененными конструкторскими моделями.

### Методы

В данной работе в качестве объекта исследования была выбрана сопловая

лопатка первой ступени в газотурбинной установке ГТК-25, геометрия которой по координатам была рассчитана в программе COLD (рисунок 1, а) и трехмерная модель которой была построена в SolidWorks (рисунок 1, б) без и с дефлектором, имеющим отверстия для прохода охлаждающего воздуха.

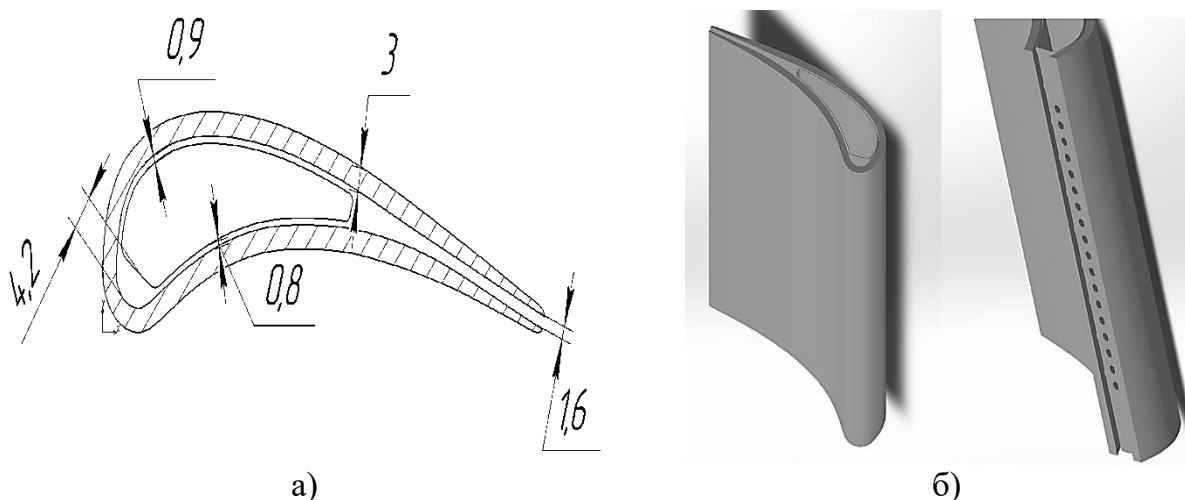


Рисунок 1 – Исследуемая лопатка: а) геометрия; б) 3D - модель

Программный комплекс COLD предназначен для расчета систем охлаждения лопаток газовых турбин. Комплекс разработан применительно к персональным компьютерам IBM AT с операционной системой MS DOS. Для расчета температурного и напряженного состояния лопатки был использован модуль комплекса «TERM».

Рассчитанные в программе COLD, двумерные исходные гидравлические модели при охлаждении лопатки воздухом, результаты расчёта температуры ( $T_3$ ) и давления газа перед турбиной ( $p_3^*$ ), относительной скорости на выходе из исследуемой лопатки ( $\lambda_{c1}$ ), представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Исходные данные гидравлической модели

$T_3, \text{ } ^\circ\text{C}$	$p_3^*, \text{ бар}$	$\lambda_{c1}$
890	12,13	0,956

## Результаты и обсуждение

### Расчёт исследуемой двумерной гидравлической модели лопатки в исходном состоянии

В программном комплексе COLD был произведен расчёт температурно-напряженного состояния сопловой лопатки газовой турбины в исходном состоянии (рисунок 2, а, б) с дефлектором, имеющим отверстия круглой формы (рисунок 1, б).

Видно, что в исходном состоянии вдоль наружного профиля лопатки преобладают высокие температуры, которые местами превышает 700 С, и неблагоприятные растягивающие напряжения (рисунок 2, а, б), что приводит к снижению работоспособности конструкции.

Для устранения высокого градиента температуры, её больших значений у входной и выходной кромок, а также для снижения температурно-напряженного состояния сопловой лопатки в целом, были проведены варианты расчётов с конструктивными изменениями дефлектора, а также с добавлением интенсификатора теплообмена в виде столбиков-турбулизаторов течения воздуха.

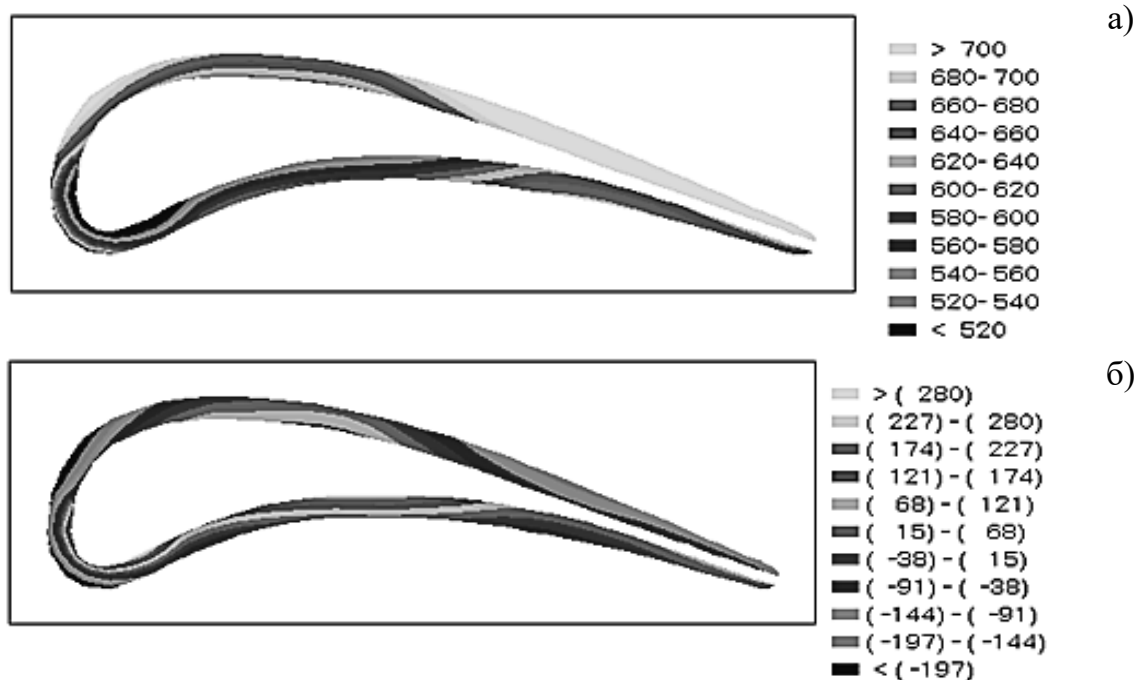


Рисунок 2 – Распределение вдоль профиля лопатки в исходном состоянии (дефлектор с круглыми отверстиями): а) температур ( $^{\circ}\text{C}$ ); б) напряжений (МПа)

#### **Расчёт исследуемой лопатки с конструктивными изменениями дефлектора**

Для улучшения состояния входной кромки лопатки, на дефлекторе круглые отверстия были заменены на прямоугольные окна большей площади чем круглые (рисунки 3, 4), что предполагалось, должно увеличить площадь обтекания и расход охладителя. Кроме того, было увеличено расстояние от дефлектора до входной кромки.

#### **Расчёт исследуемой лопатки с добавлением интенсификатора охлаждения в виде столбиков-турбулизаторов течения воздуха**

Для устранения высокого градиента температуры в зоне входной и выходной кромки, были проведены варианты расчётов с добавлением интенсификатора охлаждения в виде столбиков-турбулизаторов течения воздуха, представленные на рисунках 5, 6.

Столбики (штырьки) - интенсификаторы широко применяются в каналах охлаждения лопаток, расположенных в средней и задней части полости пера [7-8].

Как показал расчёт исследуемой лопатки с добавлением интенсификатора охлаждения в виде столбиков-турбулизаторов течения воздуха, в зоне входной и выходной кромок заметно снизился градиент температур, появились благоприятные сжимающие остаточные напряжения.

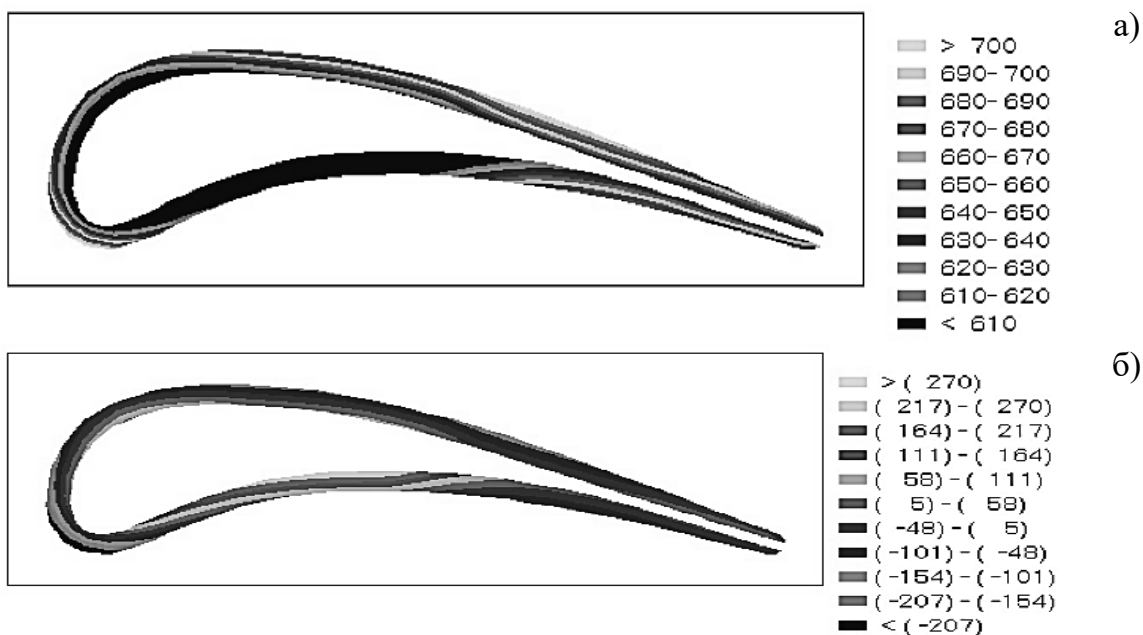


Рисунок 3 – Распределение вдоль профиля лопатки конструктивными изменениями дефлектора (с прямоугольными окнами большей площади):  
 а) температур (°С); б) напряжений (МПа)

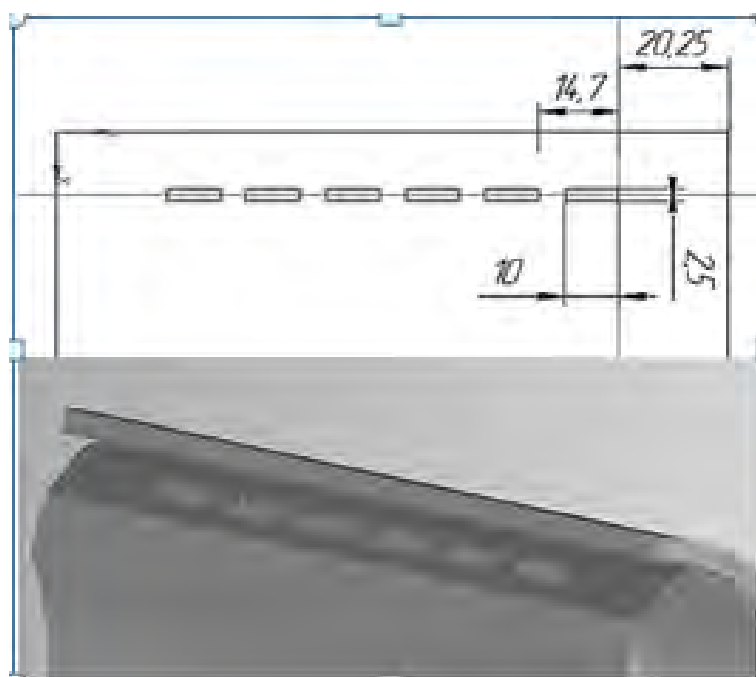


Рисунок 4 – Лопатка с прямоугольными окнами в дефлекторе

### Заключение

Таким образом, как показали результаты расчета температурно-напряженного состояния сопловой лопатки газовой турбины в программном комплексе COLD, наиболее эффективным оказался вариант внутреннего конвективного теплообмена за счёт добавления интенсификаторов охлаждения в виде столбиков-турбулизаторов течения воздуха.

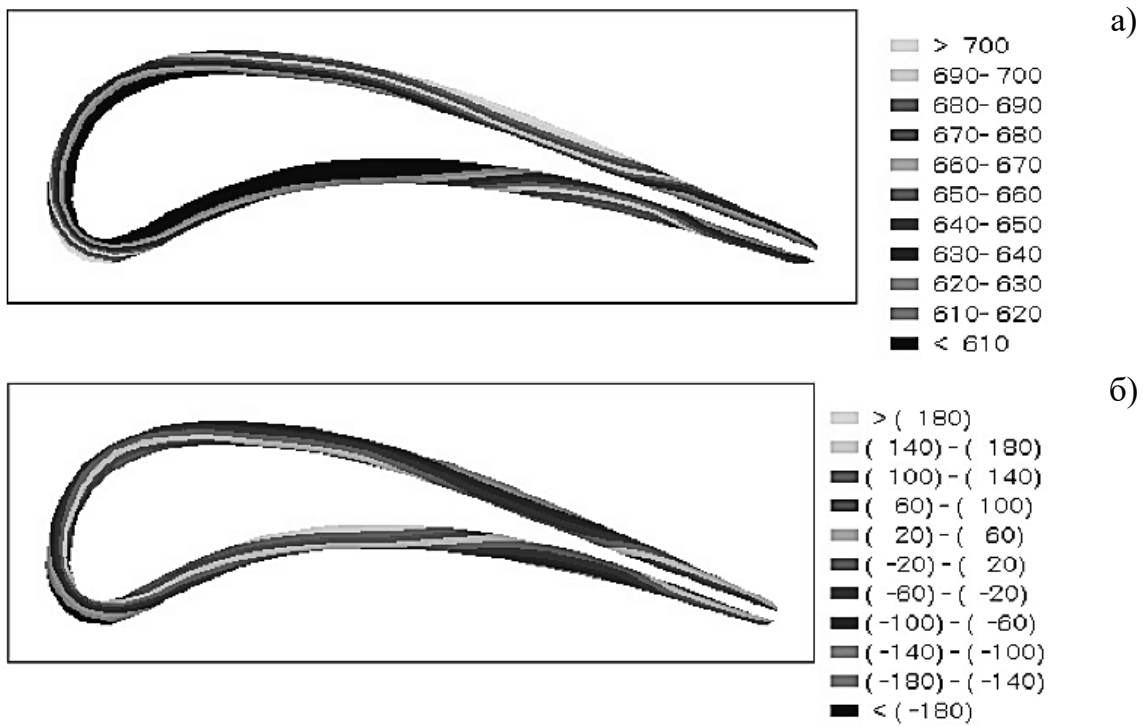


Рисунок 5 – Распределение вдоль профиля лопатки с добавлением интенсификатора охлаждения в виде столбиков-турбулизаторов: а) температур (°C); б) напряжений (МПа)

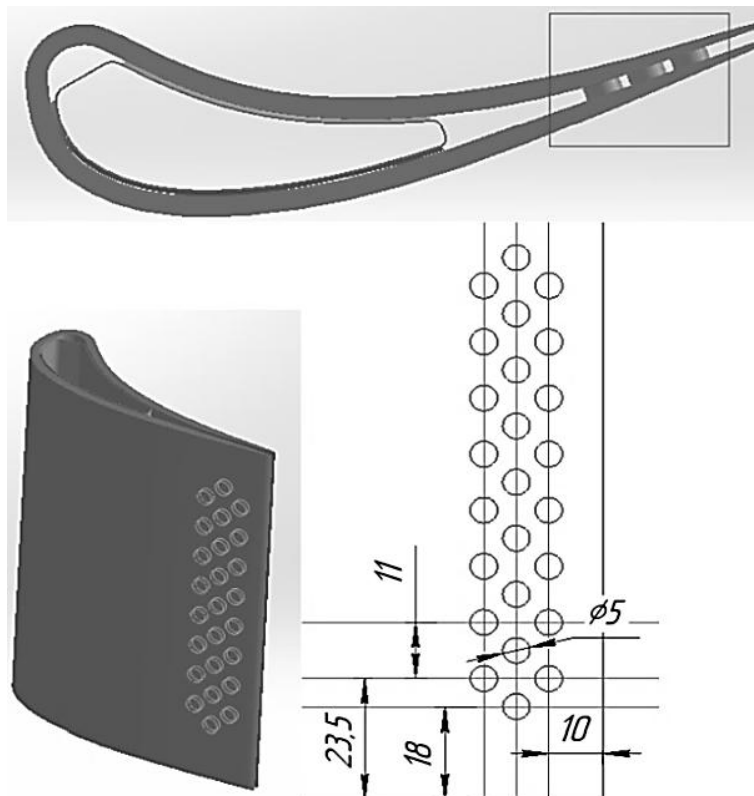


Рисунок 6 – Лопатка со столбиками – турбулизаторами

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андреев К.Д., Беркович А.Л. Энергетические машины. Охлаждение элементов высокотемпературных газовых турбин. СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2008.

2. Иванов В.Л., Локая В.И. Высокотемпературные охлаждаемые газовые турбины. М.: Машиностроение, 1971 г., 232 с.
3. Швец И. Т., Дыбан Е.П. Воздушное охлаждение деталей газовых турбин. Киев: Наукова думка, 1974 г., 488 с.
4. Цанев С.В., Буров В.Д. Газотурбинные и парогазовые установки тепловых электростанций. М.: МЭИ, 2002 г., 584 с.
5. Кириллов И.И., Зосин В.А., Ошеров С.Я. и др. Высокотемпературная газопаровая установка по схеме ЦКТИ-ЛПИ // Теплоэнергетика. - 1966 г. - №5.
6. Андреев К.Д., Вохмянин С.М., Богов И.А., Расчёт систем охлаждения лопаток газовых турбин. Программный комплекс COLD, 2014г., 119 с.
7. В.В. Кривоносова, Н.Н. Кортиков. Анализ и совершенствование системы охлаждения сопловой лопатки газовой турбины // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2018. Т. 24. № 3. С. 80 - 90.
8. Н.Н. Кортиков. Оптимизация системы охлаждения сопловой лопатки энергетической газовой турбины // МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ. ЭНЕРГЕТИКА. 2021. Т. 27. № 4. С. 85 - 95.

А.А. Котенко, С.И. Худорожков  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Санкт-Петербург, Россия, [kotenko.anton@mail.ru](mailto:kotenko.anton@mail.ru)

## ОДНОМЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОСНОВНЫХ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОМОБИЛЯ

### Аннотация

В данной работе моделируется аккумуляторный электромобиль с системой охлаждения двигателя. Электромобиль совмещает в себе системы, в которых присутствуют различные виды энергии: электрическая, механическая и тепловая. Этот фактор делает электромобиль уникальным примером для демонстрации преимуществ так называемого одномерного моделирования. Транспортное средство в ходе симуляции выполняет маневр обгона впередиидущего автомобиля. Одновременно с этим происходят замеры скорости автомобиля, крутящего момента двигателя и температуры охлаждающей жидкости для оценки того, выполняются ли заданные требования. Система охлаждения имеет опциональную функцию отключения, что позволяет получить представление о том, какое влияние она оказывает на работоспособность двигателя. В результате выполнения работы, была получена рабочая модель основных систем электромобиля, пригодная для тестирования различных технических характеристик на этапе проектирования транспортного средства.

*Ключевые слова:* электромобиль, одномерное моделирование, система охлаждения, компьютерное моделирование, цифровой двойник.

### Введение

Одномерное моделирование на данный момент получает все больше и больше внимания по той причине, что оно позволяет на ранних этапах проектирования оптимизировать различные параметры будущего продукта. На ряду с 3D-моделированием, которое сейчас имеет гораздо более широкую аудиторию пользователей, его можно использовать во всех сферах промышленности. В отличие от 3D-моделирования, в котором зачастую исследуемые модели уже близки к своему окончательному виду и состоянию, одномерное моделирование дает возможность посмотреть на проект «с высоты птичьего полета», оценить схематичное представление системы, имея при этом на руках достаточно ограниченный спектр параметров и характеристик продукта, как чаще всего и бывает на ранних этапах разработки.

На сегодняшний день электромобили являются не только будущей перспективой, а уже полноценным настоящим [1, 2]. Рано или поздно в развитых странах традиционные автомобили с двигателями внутреннего сгорания будут полностью вытеснены автомобилями с альтернативными источниками энергии. Это придает данной работе актуальность. В России на данный момент уже имеются несколько прототипов, которые в скором времени должны выйти на рынок. Их количество со временем будет только расти и одномерное моделирование займет свое почетное место, как не менее важный инструмент проектирования, чем традиционные чертежи и 3D-модели.

Целью исследования является оценка возможностей тестирования основных агрегатов электромобиля в компьютерной среде [3]. Для ее достижения необходимо собрать нужные входные данные, описать сценарий, построить саму модель и произвести симуляцию.

Объектом исследования выступает модель электромобиля с основными агрегатами (двигатель, трансмиссия, система охлаждения и т.п.). Предметом исследования является моделирование работы этих агрегатов.

### **Методы**

Для выполнения поставленной цели был использован пакет прикладных программ для решения различных вычислительных задач «MATLAB», в частности модель была построена в среде графического программирования «Simulink», основным интерфейсом которого является графический инструмент для построения блок-схем.

Методом исследования является эксперимент, так как результатом работы является проверка модели на соответствие заданным требованиям.

### **Результаты и обсуждение**

В качестве исследуемого транспортного средства был выбран типичный компактный автомобиль В-класса с соответствующими техническими характеристиками. Такой формат получает все большее распространение за счет различных преимуществ, в числе которых можно назвать в первую очередь удобные для городского эксплуатации габариты и экономичность. Далее приведены некоторые основные технические характеристики. Снаряженная масса электромобиля составляет 1375 кг. Максимальный крутящий момент двигателя – 160 Н·м. Мощность – 160 кВт, или 218 л.с. Передаточное отношение трансмиссии равно 10. Пусть допустимая температура охлаждающей жидкости равна 100°C. Этот показатель является ключевым при оценке влияния системы охлаждения на работу двигателя.

Дорожный сценарий подразумевает движение со скоростью 100 км/ч по прямому участку однополосной дороги со встречным движением в горку с углом наклона равным 5°. Другой участник движения едет впереди в том же направлении со скоростью 80 км/ч. В определенный момент времени дистанция до впереди идущего автомобиля сокращается с начальных 100 метров до минимально допустимого значения (40 м), и необходимо выполнить маневр обгона, т.е. перестроение с достаточным ускорением, чтобы не создать аварийную ситуацию на встречной полосе. Безопасное расстояние для возвращения в свою полосу составляет 20 метров. Все параметры сценария отражены в блоке «Водитель», он же одновременно является и управляющим органом.

Модель можно условно поделить на несколько подсистем. К «Силовому агрегату» относятся блоки «Электродвигатель», «Батарея» и «Корпус двигателя». К подсистеме «Автомобиль» можно отнести блоки «КП», «Колеса» и «Шасси». Блоки «Сцепление с трассой» и «Наклонная дорога» задают условия окружающей среды. И, наконец, «Система охлаждения», состоящая из блоков «Впускной и выпускной патрубки», «Бачок охлаждающей жидкости», «Насос» и функциональных блоков, отвечающих за включение и выключение данной подсистемы. На рисунке 1 представлена рассматриваемая модель, в которой отдельным фреймом выделена «Система охлаждения», без которой также возможна симуляция сценария.



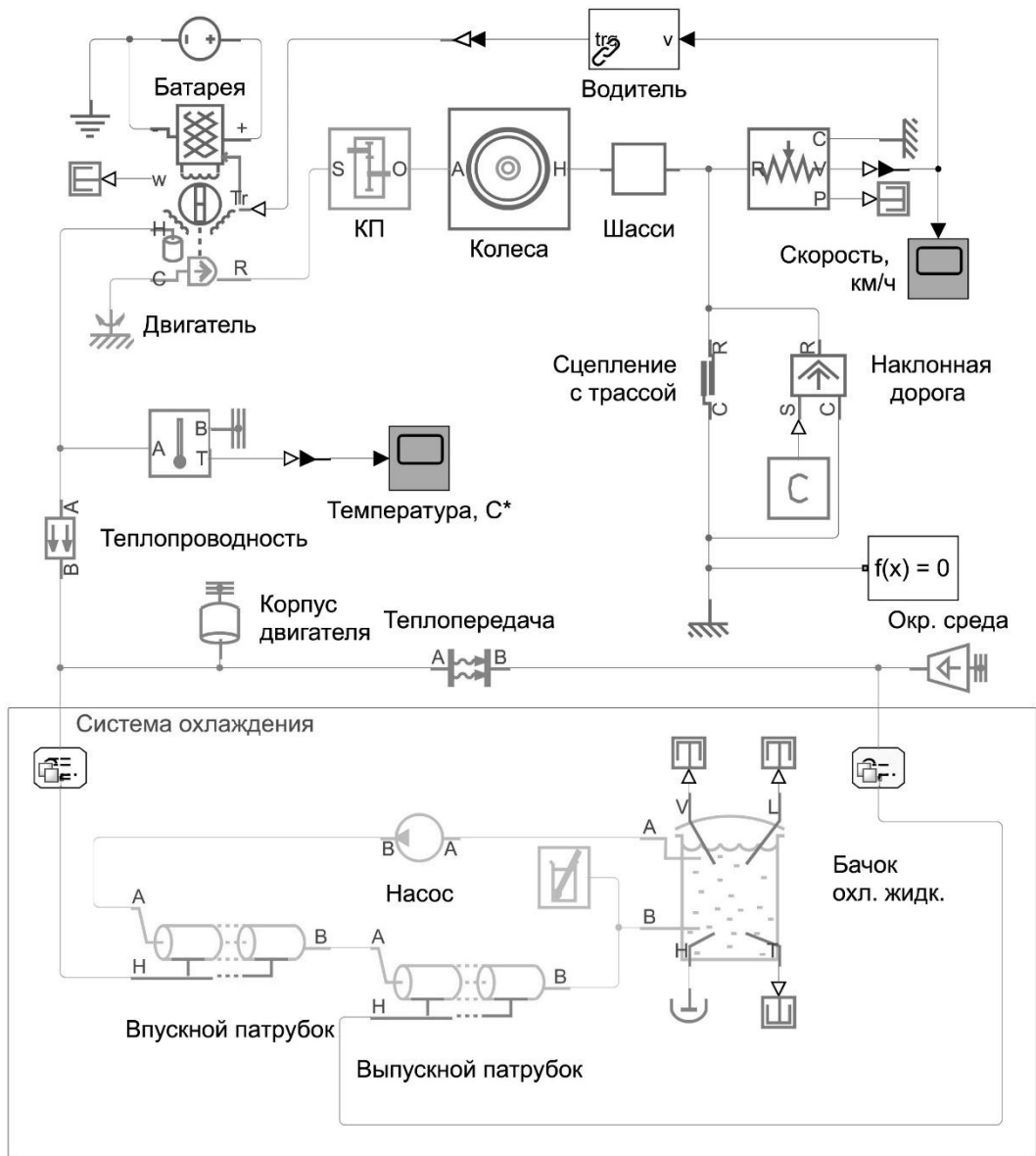


Рисунок 1 – Модель электромобиля с системой охлаждения

В результате симуляции получены следующие результаты (см. рисунки 2 и 3).

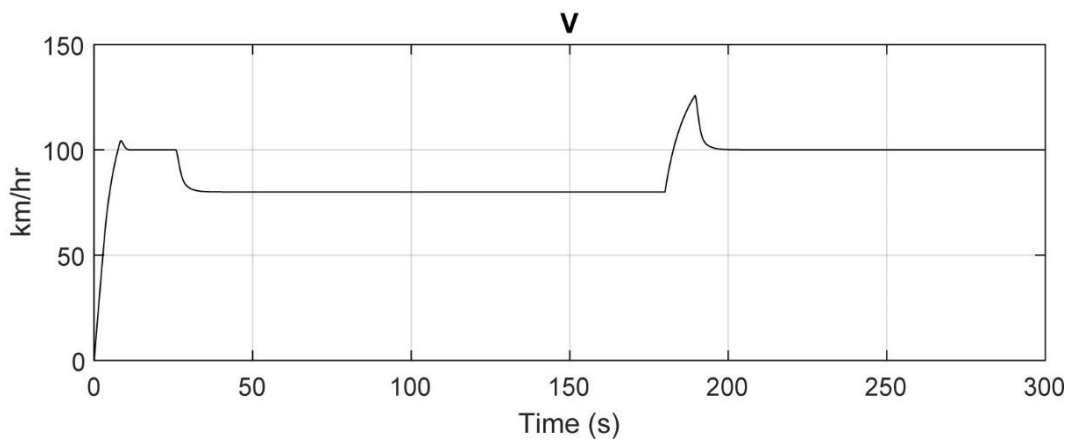


Рисунок 2 – Скорость автомобиля

Как видно из графика, обгон начался на 180 секунде, после этого автомобиль восстановил крузную скорость в 100 км/ч.

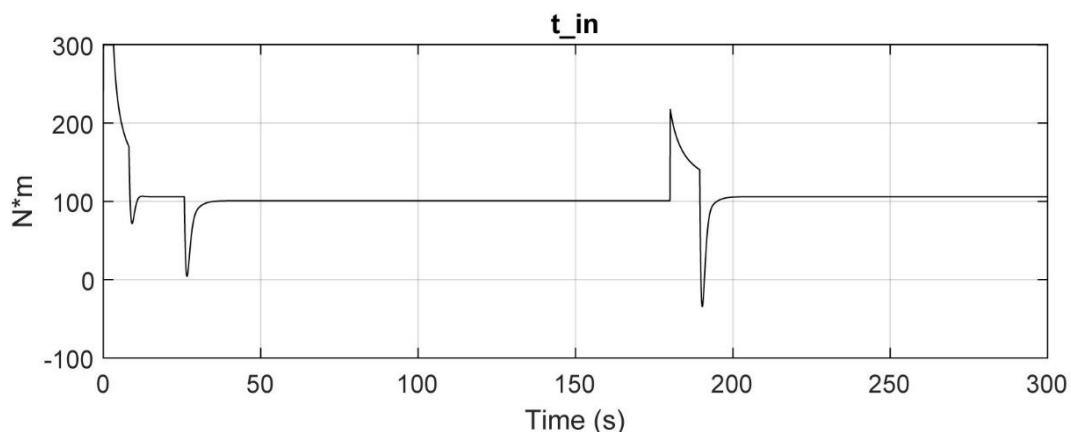


Рисунок 3 – Крутящий момент двигателя

График крутящего момента показывает, что на обгон понадобилось примерно 10 секунд. Учитывая то, что автомобили движутся на достаточно больших скоростях, такой результат является удовлетворительным.

Однако наибольший интерес в рамках исследования представляют показатели температуры охлаждающей жидкости (см. рисунки 4 и 5).

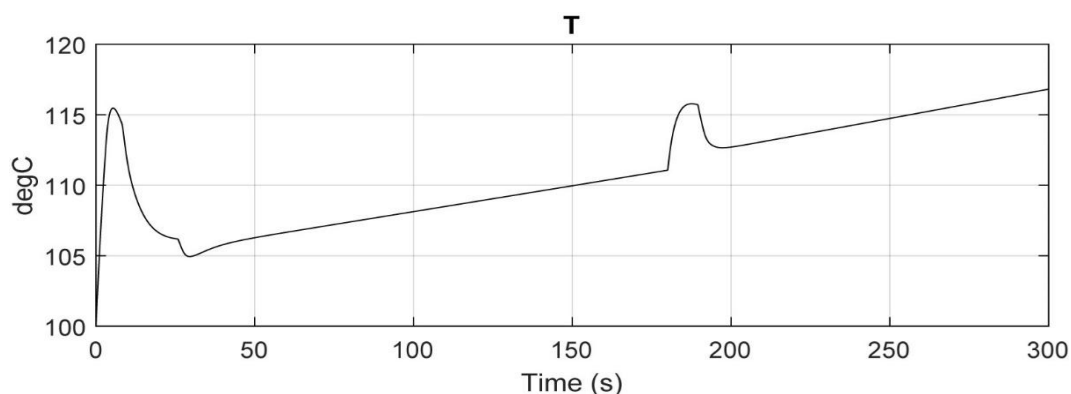


Рисунок 4 – Температура охлаждающей жидкости без системы охлаждения

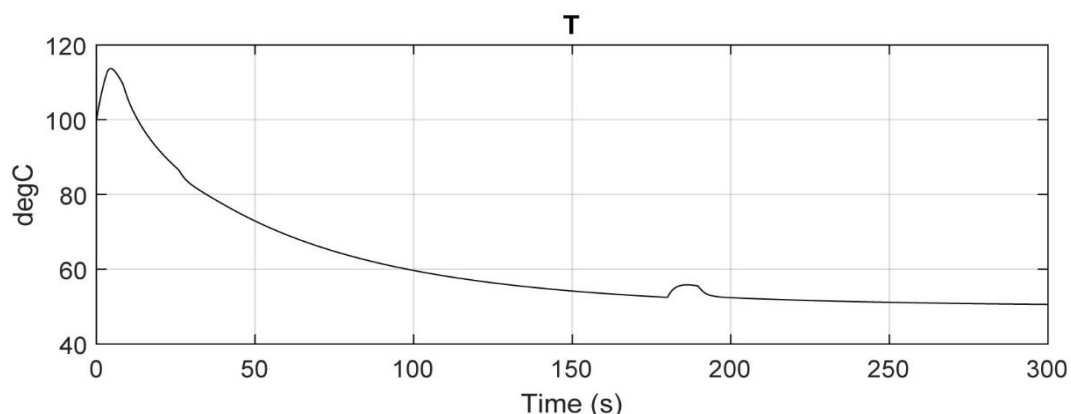


Рисунок 5 – Температура охлаждающей жидкости с рабочей системой охлаждения

В результате сравнения двух графиков можно сказать, что охлаждения путем отвода теплоты в окружающую среду недостаточно, и без системы жидкостного охлаждения двигатель рано или поздно перегреется. С наличием рабочей системы охлаждения температура преодолевает отметку в 100°C лишь в самом начале

симуляции по той причине, что изначальная температура задана как раз на этом значении.

При наличии системы охлаждения модель соответствует заданным требованиям.

### **Заключение**

Разработанная модель позволяет тестировать различные конфигурации технических характеристик проектируемого электромобиля. Она дает возможность оптимизировать самые разные параметры: от общих габаритов и сценариев движения до узконаправленных характеристик отдельных узлов автомобиля. Модель, как и одномерное моделирование в общем, может быть применена в реальных проектах на этапах, предшествующих проектированию конкретных агрегатов и деталей. В эпоху цифровых двойников одномерное моделирование является незаменимым инструментом для автомобилестроения.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Дунаев, М.П. Математическое и физическое моделирование электромобиля // Информационные и математические технологии в науке и управлении. - 2017. - №2 (6).
2. Строганов, В.И. Аналитическое моделирование тяговой системы электромобилей и автомобилей с комбинированной силовой установкой / В.И. Строганов, В.Н. Козловский, А.Г. Сорокин, Л.Н. Мифтахова // Вестник Казанского технологического университета. - 2014. - №7.
3. Салахов, Р.Р. Исследование работы системы охлаждения двигателя грузового автомобиля / Р.Р. Салахов, А.М. Ермаков, И.Р. Хафизов, Б.М. Идиатуллин // E-Scio. - 2019. - №9 (36).

А.С. Ровбо, Л.Ю. Добош  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Санкт-Петербург, Россия, [rovboanna@yandex.ru](mailto:rovboanna@yandex.ru)

## СТАТИСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕНДРИТНОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ В ЛИТОМ СПЛАВЕ АК12 С ЦЕЛЬЮ УЛУЧШЕНИЯ КАЧЕСТВА ОТЛИВОК

### Аннотация

В работе выполнено статистическое моделирование локальной неоднородности размеров вторичных междуосных промежутков путем исследования микроструктуры литейного сплава АК12, полученного при заливке образца в металлическую форму, совмещенной с термическим анализом затвердевания. Выявленная закономерность логнормального распределения относительных размеров вторичных междуосных промежутков дендритов показывает необходимость учитывать возникающую локальную структурную неоднородность в фасонной отливке для качественного прогноза ее свойств.

*Ключевые слова:* алюминиевый сплав, литая структура, статистическое моделирование, междуосные промежутки дендритов, коалесценция.

### Введение

Прогноз качества литых изделий на сегодняшний день является одной из актуальных научных проблем. В отливках из силуминов размер зерна слабо влияет на механические свойства, в то время как размер дендритной ячейки в литом состоянии определяет свойства. Поэтому важнейшим из параметров формирующейся литой микроструктуры сплава АК12 являются размеры вторичных междуосных промежутков дендритов  $\lambda_2$ . Известно, что измельчение зерен и уменьшение размеров дендритных ячеек в результате ускоренного охлаждения затвердевающего металла повышает его пластичность и прочность. Зачастую принимается, что значения  $\lambda_2$  неизменны в ходе затвердевания и по всему объему отливки, в то время как они непрерывно изменяются под действием коалесценции и имеют локальную неоднородность. Исходя из этого для прогнозирования качества литых отливок необходимо понимать механизм распределения дендритной неоднородности.

### Методы

1. В качестве шихтовых материалов для получения сплава необходимого состава был использован чушковый сплав АК12пч (ГОСТ 1583-93). Плавку металла проводили в индукционной печи МГП 52 в графито-шамотном тигле емкостью 5 кг. Температуру металла в печи и в ковше (перегрев при заливке 50–60 К) контролировали с помощью погружаемой термопары. Заливка выполнялась в металлическую форму. Чертеж формы представлен на рисунке 1.

2. Исследование микроструктуры литых образцов, выполненное после травления шлифов водным 1% раствором плавиковой кислоты, осуществляли в поперечном сечении на половине высоты края отливки. Металлографические исследования выполняли на вырезанных из образцов микрошлифах, шлифовку и полировку которых проводили на установке Saphir с использованием алмазных

суспензий. Оценку микроструктуры проводили на световом оптическом микроскопе TechnoMeijiIM 7200 с использованием анализатора изображений и программы количественной обработки данных Thixomet PRO.

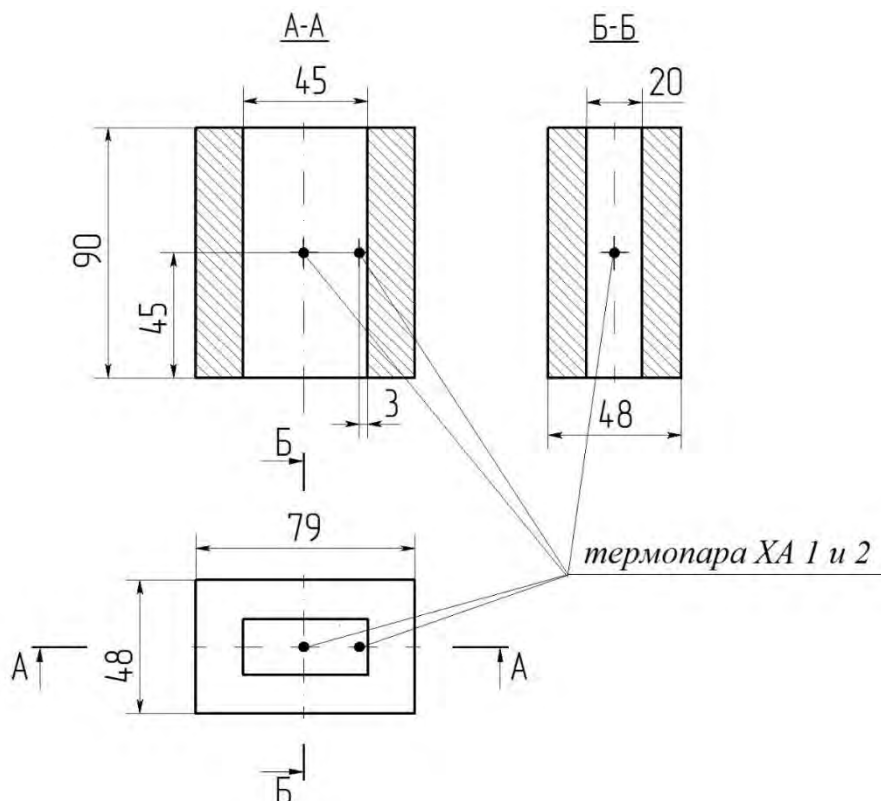


Рисунок 1 – Металлическая форма, использованная при проведении эксперимента по затвердеванию сплава АК12. Места установки термопар: 1 – центр; 2 – поверхность

3. Методика исследования междуосных промежутков. При анализе структуры по сечению образцов на травленых шлифах алюминиевой отливки, регистрировали от 40 до нескольких сотен размеров междуосных промежутков боковых ветвей дендритов  $\lambda_2$  с целью получения достоверных данных по средней величине ( $\lambda_{cp}$ ). На рисунке 2 показано измерение междуосных промежутков второго порядка на фотографии микроструктуры сплава АК12, которая представляет собой дендриты первичного твердого раствора ( $\alpha$ -Al) и находящуюся в междендритном пространстве эвтектику ( $\alpha$ -Al+Si).

### Результаты и обсуждение

При помощи анализатора изображений ThixometPRO при увеличении  $\times 200$  были измерены 40–100 междендритных промежутков второго порядка  $\lambda_2$  для каждого поля. Результаты измерений частично приведены в таблице 1.

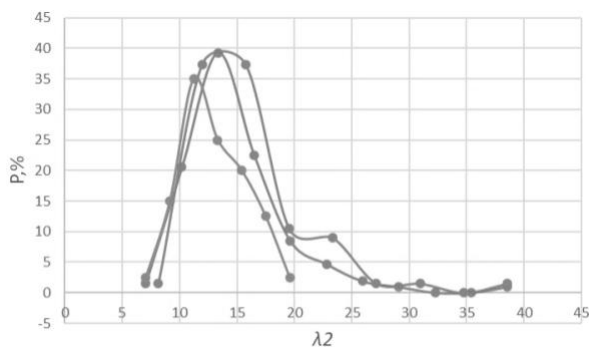
Для определения статистической закономерности логнормальной коалесценции [1] дендритной структуры осуществлено статистическое моделирование кинетики изменения размеров вторичных междуосных промежутков. На рис. 3 а и б приведены сводные гистограммы распределения вторичных междуосных промежутков ( $\lambda_2$ ).



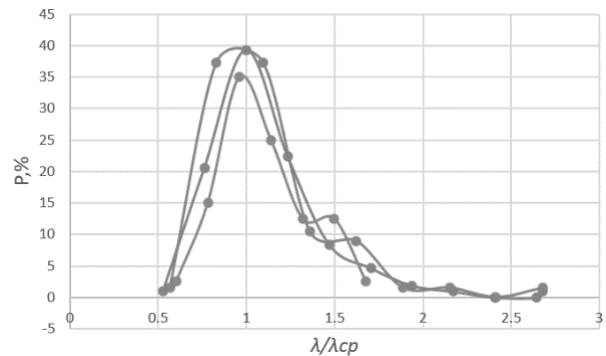
Рисунок 2 – Измерение междоусных промежутков образца сплава АК12 при увеличении  $\times 200$ , отлитого в кокиль: 1 – центр; 2 – поверхность

Таблица 1 – Результаты измерений междоусных промежутков второго порядка сплава АК12

№ образца	$\lambda_2$ , мкм	$\lambda_2$ , мкм	$\lambda_2$ , мкм	$\lambda_{2 \min}$ , мкм	$\lambda_{2 \max}$ , мкм	$\lambda_{2 \text{ср}}$ , мкм
Сплав АК12, литье в кокиль, край отливки	10.50037	8.248438	10.4527	5,9000	38,54566	14.38206
	11.71978	17.08209	10.07627			
	12.01185	11.25665	10.96623			
	17.746	8.482332	11.93817			
	12.42464	17.86138	12.4663			
	9.694695	14.14608	14.29051			
	8.822083	13.17497	10.01965			
	8.142752	13.11987	38.54566			
	8.496853	10.17979	18.80454			
	11.18724	11.47862	16.57063			
	9.305578	18.49362	20.07542			
	9.490498	11.09797	22.60745			
	14.49072	11.67712	24.70096			



а)



б)

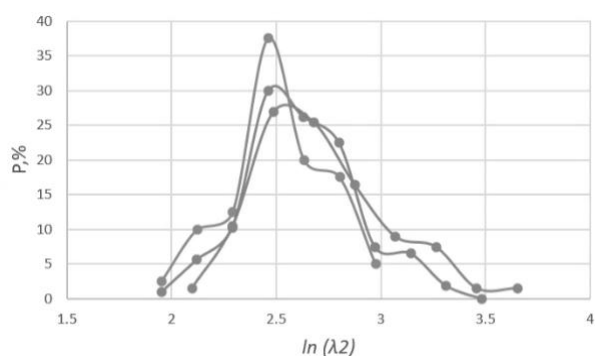
Рисунок 3 – Сводные гистограммы частоты  $P$  распределения экспериментальных значений в различных полях зрения а) структурных параметров  $\lambda_2$ , б)  $\lambda_2 / \lambda_{\text{ср}}$

Растворение тонких ветвей и соответствующее утолщение массивных ветвей, происходящее при коалесценции создает условия для непрерывного и единообразного изменения размеров всех дисперсных элементов дендритного характера. Преобразование этих гистограмм с учетом их формирования в локальных условиях кристаллизации, характеризуемых индивидуальными значениями среднего  $\lambda_{cp}$ , при совмещении их локальных координат  $(\lambda/\lambda_{cp}) = 1$ , позволяет перейти к относительным параметрам  $\lambda/\lambda_{cp}$ , чтобы выявить обобщенные характеристики разнообразных исследуемых массивов.

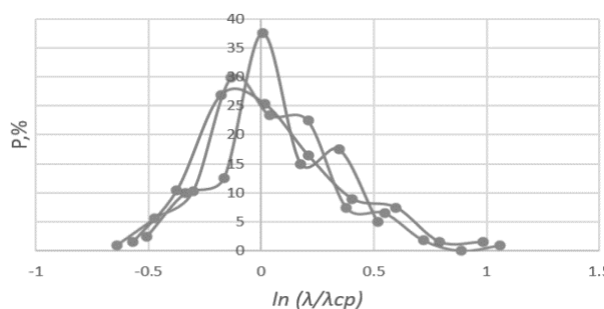
В табл. 2, а также на рис. 4а и 4б представлены полученные результаты, демонстрирующие сходственный с нормальным распределением междендритных промежутков второго порядка.

Таблица 2 – Преобразованные измерения междусных промежутков второго порядка в безразмерную величину  $\lambda_2/\lambda_{2cp}$  и в виде натурального логарифма

№ образца	$\lambda_2/\lambda_{2cp}$	$\ln(\lambda_2)$	$\ln(\lambda_2/\lambda_{2cp})$
Сплав АК12, литье в кокиль, край отливки	0.730102	2.351411	-0.31457
	0.814889	2.461278	-0.2047
	0.835197	2.485893	-0.18009
	1.233898	2.87616	0.210179
	0.863898	2.519681	-0.1463
	0.674083	2.271579	-0.3944
	0.613409	2.177258	-0.48872
	0.566174	2.097128	-0.56885
	0.590795	2.139696	-0.52629
	0.777861	2.414774	-0.25121
	0.647027	2.230614	-0.43537
	0.659885	2.250291	-0.41569
	1.007556	2.673509	0.007527



а)



б)

Рисунок 4 – Сводные гистограммы частоты  $P$  распределения экспериментальных значений в разных полях зрения а)  $\ln(\lambda_2)$ , б)  $\ln(\lambda_2/\lambda_{cp})$

На рисунке 4б представлена эволюция дендритной неоднородности в результате коалесценции боковых ветвей дендритов. На всех графиках (Рис. 3-4) прослеживается перевес частоты междусных промежутков большего размера (об этом свидетельствует «хвост» на правой части графика), т.к. в результате коалесценции дендритной структуры во время всего процесса затвердевания

происходит поглощение дендритов меньших размеров дендритами больших размеров. Перевод данных в логарифмические безразмерные координаты позволяет выделить эту особенность.

### **Заключение**

В ходе выполнения работы по исследованию особенностей дендритной неоднородности в литом сплаве АК12 было изучено распределение междуосных промежутков второго порядка при помощи статистического моделирования и выявлено, что процесс формирования микроструктуры, происходящий в результате непрерывного конкурентного взаимодействия структурных составляющих, проявляется единообразно в различных зонах затвердевания по сечению отливки. Это связано с коалесценцией боковых ветвей дендритов, когда происходит поглощение дендритов меньших размеров дендритами больших размеров во время процесса кристаллизации сплава. На основе результатов исследования были получены статистические и эмпирические данные о формировании и развитии междуосных промежутков второго порядка  $\lambda_{ср}$  для сплава АК12, которые могут быть базой для перспективного компьютерного прогнозамеханических свойств отливок, поскольку дендритная неоднородность отражается не только на конечных морфологических показателях, но и на ходе литейных процессов (жидкотекучесть, формирование усадочных пустот, кинетика линейной усадки, возникновение горячих трещин и др).

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Golod V.M. Evolution of filtration permeability of dendrite structure in the conditions of capillary-diffusion coalescency of the secondary side branches / V.M. Golod, L.Ju. Dobosh, A.E. Kim // Eur. Phys. J. Spec. Top. - 2020. -V. 229. - P. 225-237.
2. Добош Л. Ю. Компьютерное моделирование неравновесной кристаллизации алюминиевых сплавов с целью прогнозирования параметров формирующейся микроструктуры отливок, Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: 05.16.04: защищена 19.12.2017: утв. 07.05.2018 / Добош Людмила Юрьевна. - Санкт-Петербург, 2017. - 205 с.



# Конструкторско-технологические разработки триботехнического назначения

УДК 621.891

А.С. Парфенов<sup>1</sup>, А.В. Волков<sup>1</sup>, Е.В. Березина<sup>1</sup>, В.А. Годлевский<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Ивановская государственная медицинская академия,  
Иваново, Россия, [alsparf@gmail.com](mailto:alsparf@gmail.com)

<sup>2</sup>Ивановский государственный университет, Иваново, Россия

## ПРИМЕНЕНИЕ НАНОРАЗМЕРНЫХ ПРИСАДОК В УСЛОВИЯХ АБРАЗИВНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

### Аннотация

В работе предлагается модель механизма действия углеродных нанотрубок (УНТ) в системах с абразивным материалом в виде их физической адсорбции на поверхности твердых частиц. Такое связывание приводит к ускорению транспорта углеродных нанотрубок в зону контакта, тем самым увеличивая эффективность работы присадки. Углеродные нанотрубки, связываясь с частицами абразива и впоследствии переходя на поверхности трения, должны оказывать экранирующее действие благодаря своему высокому модулю упругости, снижая режущее действие частиц.

*Ключевые слова:* присадка, углеродные наночастицы, абразивный износ.

### Введение

Изнашивание, коррозия и раскрашивание представляют собой основные типы разрушений материалов. Разрушение из-за изнашивания, возникающее вследствие трения, представляет собой главную причину разрушения материалов (до 80 % отказов). Одним из способов повышения долговечности деталей машин является модификация смазочных материалов (СМ). Одним из способов улучшения триботехнических характеристик СМ является введение различных присадок (поверхностно-активных веществ, жирных кислот, микро- и нанопорошков различной природы, способных образовывать на поверхности деталей пленки, обладающие защитными и демпфирующими свойствами) [1-4]. В последние годы активно используются наноразмерные порошки различных аллотропных модификаций углерода как присадки, хорошо проявляющие себя в качестве модификаторов и обладающие хорошей экологической безопасностью [5-6].

### Материалы и методы

В качестве базовых СМ были выбраны индустриальное масло И20-А (ГОСТ 20799-88), вазелиновое масло (ГОСТ 3164-78). Модификация СМ производилась при помощи многостенных углеродных нанотрубок Таунит-М (ООО «НаноТехЦентр», г. Тамбов), внешний диаметр 10–30 нм, внутренний диаметр 5–15 нм и длина  $\geq 2$  мкм,

чистота продукта > 95 мас. %. В качестве абразивного материала использовался Электрокорунд 25А 0,063-0,125 (F180).

Для экспериментальных исследований физико-химических свойств суспензий использовали методы ротационной вискозиметрии (вискозиметр BrookfieldDV2), оптической спектрофотометрии (спектрофлуориметр Solar CM 2203). Трибологические испытания производились на испытательной машине трения МТУ-01. Суспензии углеродных нанотрубок в смазочных материалах подготавливались при помощи механического перемешивания и ультразвукового диспергирования в течение 15 минут.

### Результаты и обсуждение

В процессе абразивного изнашивания, кроме исходных частиц абразивного материала, будут образовываться и частицы износа поверхностей трения, представляющие собой оксиды металлов, которые обладают повышенной твердостью. В подобной системе продукты износа также могут выступать в роли транспорта наноприсадки. В условиях гипотезы, что абразивные частицы как внешней природы (твердые загрязнения смазочного материала), так и появившиеся в процессе трения, выступают в роли транспорта присадки, логично предположить, что повышение концентрации присадки приводит к тому, что большее количество абразивных частиц в объеме адсорбируют на себя материалы присадки, что снижает износ поверхности.

Активность присадки можно сопоставить с ее градиентом к поверхностям трения (контакта) из объема. В условиях стационарного процесса износа приток присадки к поверхностям контакта посредством транспорта на частицах износа можно выразить скоростью адсорбции  $\partial a / \partial t$ . В таком случае

$$\frac{\partial a}{\partial t} = \beta(a_p - a) = \beta(k\sqrt{C} - a), \quad (1)$$

где  $\beta$  – «коэффициент структурирования» (или агрегации) трибоактивной присадки, отвечающий за поведение трибоактивного компонента в объеме,  $a_p$  – равновесная концентрация адсорбата, описываемая степенной моделью Фрейндлиха.

Интегрируя (1) по времени, получим:

$$a = k\sqrt{C}(1 - \exp(-\beta(C)t)). \quad (2)$$

В случае модели линейной зависимости износа от величины адсорбции присадки принимаем, что:

$$K(C) = K(0) - n \cdot a(C), \quad (3)$$

где  $K(C)$  – коэффициент износа, как функция концентрации.

В случае линейной зависимости характерного времени адсорбции  $\tau(C)$  от концентрации присадки:

$$\tau(C) = \tau_0 + \gamma \cdot C, \quad (4)$$

где  $\gamma$  – коэффициент пропорциональности, характеризующий агрегацию присадки.

С учетом того, что  $\beta(C)$  имеет размерность обратного времени, получаем:

$$K(C) = K(0) - A \cdot \sqrt{C} \left( 1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_0 + \gamma(C)}\right) \right), \quad (5)$$

где  $t$  – время процесса.

Лабораторные исследования стабильности суспензий УНТ в смазочных материалах позволили установить, что суспензии, прошедшие ультразвуковую диспергацию в течение 15 минут, проявляют высокую стабильность. Оптическая плотность, измеренная спектрофотометрическим способом, изменяется не более, чем на 20% после отстаивания в течение 168 часов (рис. 1а), что позволяет сохранять эффективность модифицированных СМ при простоях оборудования.

Реологические испытания методом ротационной вискозиметрии позволили сделать вывод о том, что введение углеродных нанотрубок в СМ незначительно увеличивает кинематическую вязкость суспензий, при этом зависимость вязкости от концентрации носит экспоненциальный характер (рис. 1б).

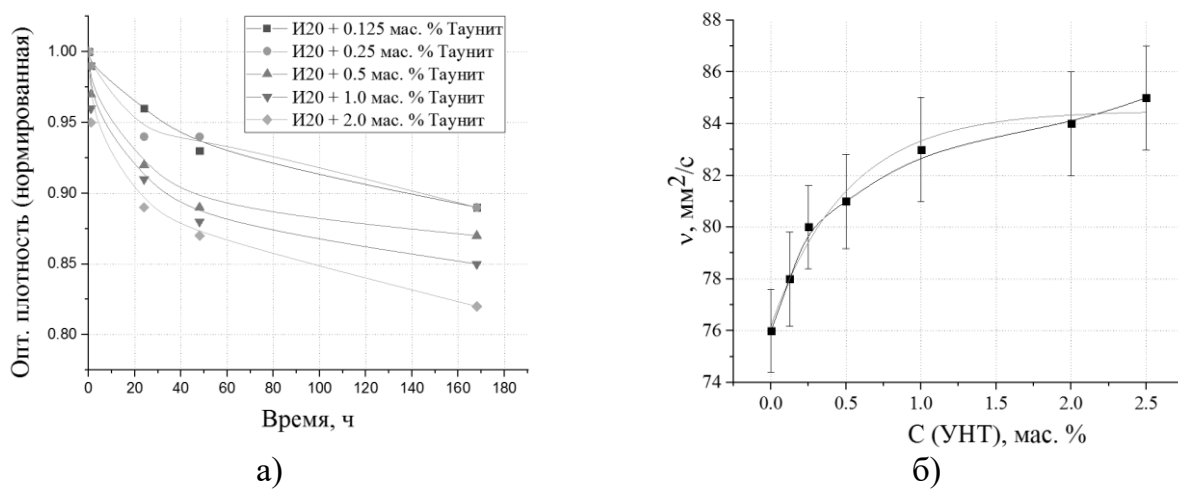


Рисунок 1 – Физико-химические параметры суспензий УНТ в индустриальном масле И20: а) нормированная оптическая плотность; б) кинематическая вязкость

В результате лабораторных испытаний жидких СМ, загрязненных абразивными частицами и модифицированных УНТ, установлено снижение износа пар трения (таблица 1). В случае отсутствия в жидких СМ абразивных загрязнений происходит снижение величины износа поверхностей трения до 22%.

Загрязнение смазочных материалов абразивными частицами корунда приводит к резкому возрастанию величины износа до 3 раз. В случае применения композиций с абразивными частицами и углеродными нанотрубками на поверхностях трения практически не наблюдается следов УНТ. В этом случае можно рассматривать взаимодействие углеродных нанотрубок непосредственно с частицами абразива. В случае применения смазочных материалов, не модифицированных дополнительными присадками, наблюдается снижение величины износа до 32% по сравнению с загрязненными смазочными материалами без добавки УНТ.

Введение УНТ в базовые жидкие СМ также приводит к снижению температуры в зоне трения за счет снижения величины износа (таблица 1). В случае испытаний СМ, загрязненных абразивными частицами, наблюдается иная ситуация. Как следует из приведенных в таблице зависимостей, регистрируемая температура увеличивается с ростом концентрации нанотрубок. Следует отметить, что введение нанодисперсных компонентов в смазочные материалы приводит к улучшению их теплопроводности, а значит и смазочно-охлаждающих свойств суспензий, что отмечается в исследованиях [7]. В случае абразивного характера изнашивания происходит выделение большого

количества теплоты, и эффект присадки, помимо снижения величины износа, заключается в увеличении теплоотвода из зоны трения.

### Заключение

Предложена физическая адсорбционная модель взаимодействия наноразмерных частиц присадки (в виде углеродных нанотрубок) с абразивными частицами и ее математическое описание. В условиях того, что абразивные частицы как внешней природы (твердые загрязнения смазочного материала), так и появившиеся в процессе трения (частицы износа поверхностей, представляющие собой оксиды металлов, чья твердость выше, чем твердость контактных поверхностей), выступают в роли транспорта присадки, повышение концентрации присадки приводит к тому, что большее количество абразивных частиц в объеме адсорбируют на себя материалы присадки, что снижает износ поверхности.

Таблица 1– Испытания на машине трения МТУ-01

Смазочный материал	УНТ, мас. %	Абразивные частицы (корунд), мас. %	Изменение температуры системы в результате испытаний, °С	Площадь пятна износа, мм <sup>2</sup>
Вазелиновое масло (ВМ) (ГОСТ 3164-78)	0	0	16,02	1,490±0,023
	1,0	0	12,32	1,331±0,107
	2,0	0	12,56	1,257±0,103
	0	0,5	17,02	3,232±0,356
	1,0	0,5	18,32	2,831±0,213
	2,0	0,5	19,56	2,497±0,219
	0	1,0	25,23	4,261±0,389
	1,0	1,0	27,39	3,962±0,355
	2,0	1,0	30,56	3,262±0,347
Индустр. масло И20 (ГОСТ 20799-88)	0	0	14,56	1,160±0,018
	1,0	0	11,32	0,890±0,077
	2,0	0	11,45	0,951±0,087
	0	0,5	16,02	2,852±0,345
	1,0	0,5	17,21	2,153±0,237
	2,0	0,5	19,25	2,213±0,278
	0	1,0	23,05	3,978±0,387
	1,0	1,0	25,12	3,576±0,344
	2,0	1,0	28,35	3,145±0,347

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sviridenok, A.I. Tribological properties of lubricants modified by complexes of hard micro- and nanoparticles / A. I. Sviridenok, M. I. Ihnatouski, V. A. Smurugov, T. G. Chmykhova, P. A. Khovotov // Journal of Friction and Wear. - 2012. - V. 33. - № 4. - P. 266-273.

2. Бурлакова, В.Э. Влияние состава смазочной среды на структуру поверхностных слоев формирующейся при трении сервовитной пленки / В. Э. Бурлакова, Е. Г. Дроган, А. А. Новикова, М. А. Беликова // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. - 2019. - № 4. - С. 91-99.

3. Lee, K. Understanding the role of nanoparticles in nano-oil lubrication / K. Lee, Y. Hwang, S. Cheong, Y. Choi, L. Kwon, J. Lee, S. H. Kim // *Tribology Letters*. - 2009. - V. 35. - № 2. - P. 127-131.
4. Ermakov, S. F. Lubricity of cholesteric liquid-crystal nanomaterials in friction of solids / S. F. Ermakov, V. I. Kolesnikov, A. P. Sychev // *Journal of Friction and Wear*. - 2016. - V. 37. - № 2. - P. 136-140.
5. Gvozdev, A.A. Tribotechnical characteristics of promising lubricants with carbon nanoparticles / A. A. Gvozdev, A. I. Smirnova, E. V. Berezina, A. V. Dunaev, A. G. Tkachev, N. V. Usol'tseva // *Zhidkie Kristally i Ikh Prakticheskoe Ispol'zovanie*. - 2018. - V. 18. - № 1. - P. 66-72.
6. Shilov, M.A. Modelling of deformation processes of carbon nanotubes / M. A. Shilov, A. I. Smirnova, D. N. Stolbov, N. V. Usol'tseva // *Zhidkie Kristally i Ikh Prakticheskoe Ispol'zovanie*. - 2020. - V. 20. - № 1. - P. 85-91.
7. Prasher, R. Thermal Conductivity of Nanoscale Colloidal Solutions (Nanofluids) / R. Prasher, P. Bhattacharya, P. E. Phelan // *Physical Review Letters*. - 2005. - Vol. 94. - № 2. - P. 025901.

Дин Юнкан, Г.В. Иванова, Е.А. Тарасенко  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Санкт-Петербург, Россия, [878387635@qq.com](mailto:878387635@qq.com)

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ АГРЕГАТА ДВУХПОРШНЕВОГО НАСОСА ДВУХСТОРОННЕГО ДЕЙСТВИЯ

### Аннотация

В работе показаны схема машинного агрегата и двухпоршневого насоса. Выполнены метрический, кинематический анализ механизма, построены графики зависимости перемещения поршня, аналогов скоростей и ускорений определены динамические характеристики для заданных условий работы насоса. Проведены исследования по выбору материала и метода формообразования объемной штамповки в закрытых штампах на кривошипных горячештамповочных прессах для изготовления цилиндра насоса.

*Ключевые слова:* насос поршневой, машинный агрегат, кинематический расчет, динамический расчет.

### Введение

Насосы представляют собой механические устройства для подачи или перекачки текучего вещества из более низкой в более высокую точку или из зоны низкого в зону высокого давления, преобразуя механическую энергию приводного двигателя в механическую энергию движения жидкости. В зависимости от вида движения устройства различают линейного типа при возвратно-поступательном движении и поворотного типа при качании; в зависимости от гидравлического давления разделяют на типы одностороннего и двойного действия; в соответствии со структурой - на поршневой тип, плунжерный тип, многоступенчатый телескопический тип втулки, реечный тип и т. д.

Цилиндр насоса должен обладать достаточной прочностью, герметичностью, высокими антифрикционными свойствами, хорошей коррозионной стойкостью. Правильный выбор материала цилиндра и его конструкции имеет важное значение для получения высокой производительности и надежности [1].

### Методы

Для достижения поставленной цели использовали аналитические методы исследования и системаавтоматизированного проектирования «Компас-3D» [4].

### Результаты и обсуждение

Исследования выполнены для действительного расхода рабочей жидкости  $Q$  равных  $0,03 \text{ м}^3/\text{с}$  по методике, изложенной [2]. Другие численные значения исследуемых объектов одинаковые по величине.  $P_{\text{ср}} = 0,2 \text{ Мпа}$  – среднее постоянное удельное давление на поршень;  $n_{\text{кр}} = 300 \text{ об/мин}$  – частота вращения кривошипа;  $d_{\text{п}} = 0,15 \text{ м}$  – диаметр поршня;  $\lambda = 0,2$  – геометрический параметр механизма (отношение радиуса кривошипа к длине шатуна);  $\delta = 0,02$  – допускаемый коэффициент неравномерности вращения кривошипа. Схема машинного агрегата показана на рис 1.

В ходе исследования и проектирования машинного агрегата двухпоршневого насоса двухстороннего действия (рисунок 2 а) выполнены:

1. Структурный анализ механизмов машинного агрегата, состоящего из шестизвенного кривошипно-ползунного механизма (КПМ) и передаточного механизма – определено число степеней свободы равное 1;

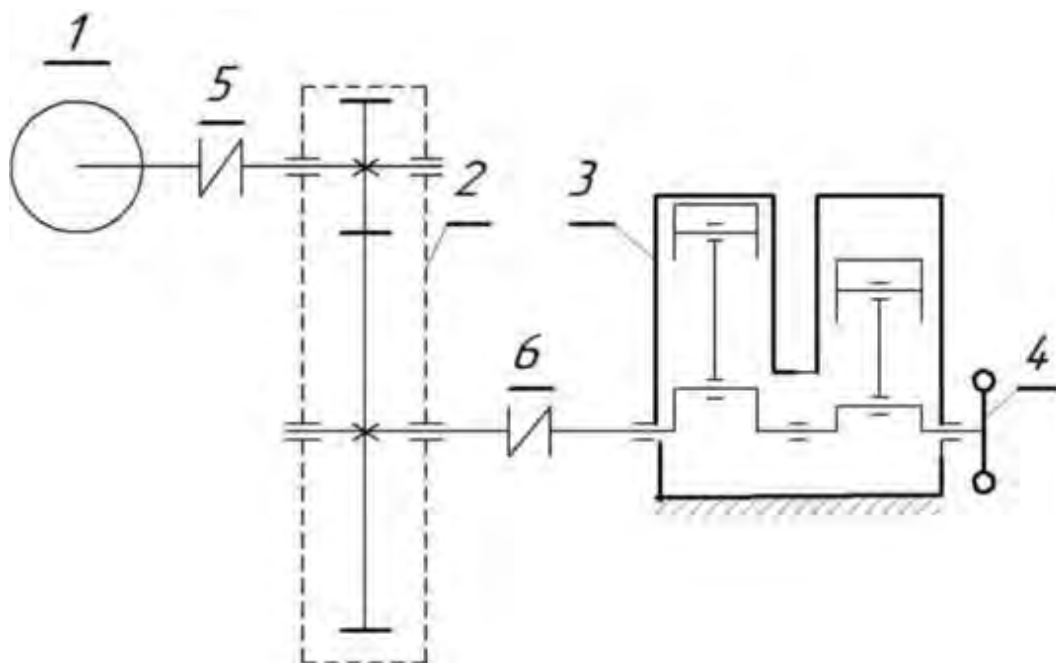


Рисунок 1 – Схема машинного агрегата: 1 – электродвигатель (трехфазный асинхронный единой серии 5А); 2 – редуктор одноступенчатый цилиндрический; 3 – двухпоршневой насос двухстороннего действия; 4 – маховик; 5, 6 – соединительные муфты (эластичные).

2. Метрический синтез механизма насоса – определен объем насоса  $V_0$ , который составил  $0,007 \text{ м}^3$ ; рабочий ход поршня  $S_0$   $0,094 \text{ м}$ , длина кривошипа  $0,035 \text{ м}$ , длина шатуна  $0,235 \text{ м}$ .

3. Кинематический анализ механизма – построены планы скоростей и ускорений звеньев. Представлены графики функции перемещения, аналога скорости и ускорения (рисунок 2 б, в, г).

4. Расчет суммарного приведенного момент сил

Пренебрегая силами трения и силами тяжести звеньев, приведенный момент сил  $T^{\text{пр}}$  звена приведения определяется из равенства:

$$T^{\text{пр}} \omega_{\text{кр}} = F_B V_B(\varphi) + F_{B'} V_{B'}(\varphi), \quad (1)$$

или поскольку  $\frac{V_B}{\omega_{\text{кр}}} = S'_B$  – аналог скорости  $B$ :

$$T^{\text{пр}} = F_B S'_1 + F_{B'} S'_2 = T_1^{\text{пр}} + T_2^{\text{пр}}, \quad (2)$$

где  $S'$  – аналоги скорости точки  $B$  поршня 3 и точки  $B'$  поршня 5 заимствуются из результатов кинематического анализа механизма насоса.

По условию задана не сила  $F_B$ , а среднее удельное давление на поршень  $p_{\text{ср}}$ , МПа предполагается постоянной. Поэтому, значение силы при известном диаметре поршня определяется из равенства:

$$F_B = p_{\text{ср}} \cdot \frac{\pi \cdot (d_n)^2}{4} = 0,15 \cdot 10^6 \cdot \frac{3,14 \cdot (0,15)^2}{4} = 2649,4 \text{ Н}, \quad (3)$$

В насосе двухстороннего действия оба хода поршня являются рабочими. Это означает, что при движении поршня вниз в рабочем цилиндре по одну сторону поршня происходит всасывание жидкости, по другую - нагнетание, а при его движении вверх стороны меняются ролями. Вследствие этого на поршень постоянно действует сила давления жидкости, направленная против его движения, причем поскольку  $p_{cp} = const$ , то  $F_B = const$  в любом положении.

Для расчета значений приведенных моментов используем ранее рассчитанные значения величин аналогов скоростей для первого и второго ползунов ( $S'_1(\varphi)$  и  $S'_2(\varphi)$ ) (рис.3в). При этом значения приведенных моментов для первого и второго ползунов определяем путем умножения постоянной силы давления жидкости на поршень, определенной выше, на абсолютную величину аналога скорости:

$$T_1^{np} = F_B \cdot |S'_1| \text{ и } T_2^{np} = F_B \cdot |S'_2|. \quad (4)$$

Суммарный приведенный момент

$$T^{np} = T_1^{np} + T_2^{np}. \quad (5)$$

Результаты расчета  $T_1^{np}(\varphi)$ ,  $T_2^{np}(\varphi)$ ,  $T^{np}(\varphi)$ ,  $T_{cp}^{np}(\varphi)$  представлены на рисунке 3.

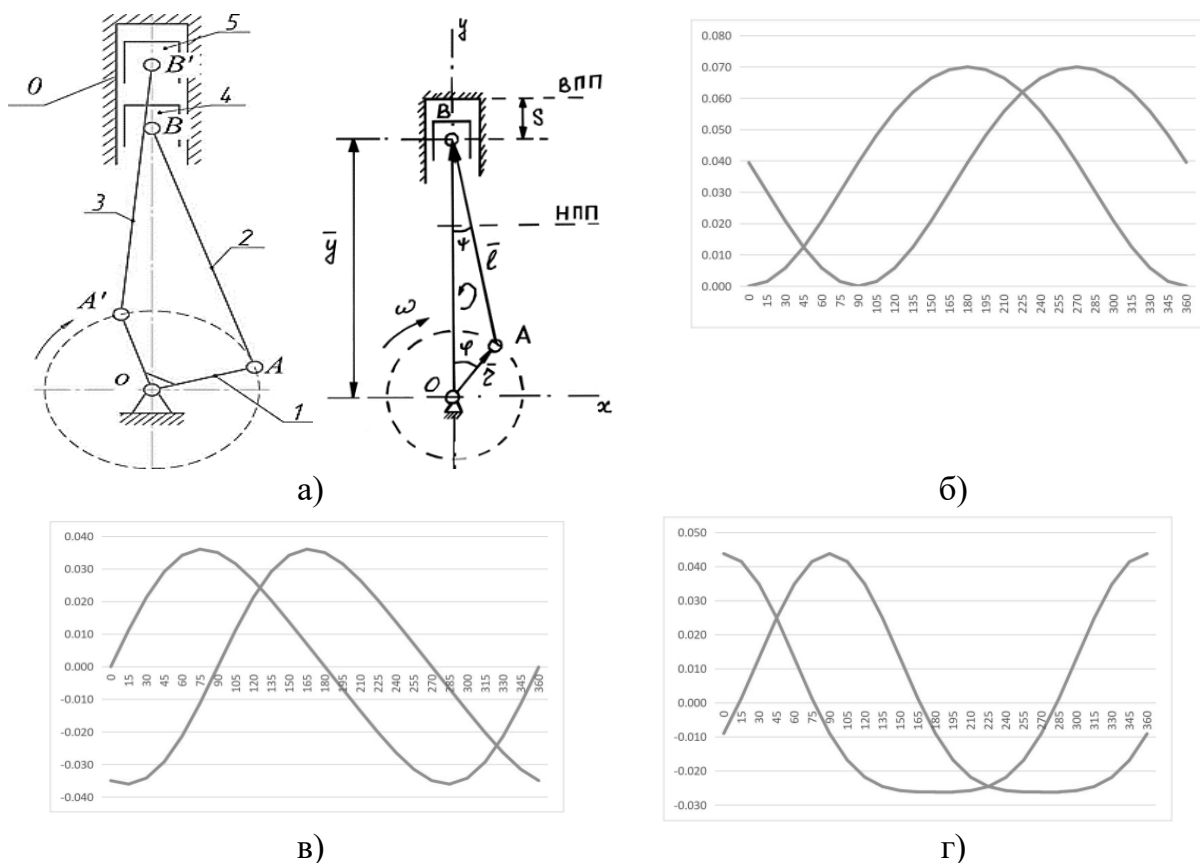


Рисунок 2 – К кинематическому расчету: а) схема двухпоршневого насоса; б) диаграмма перемещений ползунов; в) диаграмма аналогов скоростей ползунов; г) диаграмма аналогов ускорений ползунов

### 5. Выбор электродвигателя привода насоса и расчет параметров редуктора.

Требуемую мощность двигателя определяем по формуле:

$$P'_{эд} = \frac{T_{cp}^{np} \cdot \omega_{кр}}{\eta}, \text{ кВт}, \quad (6)$$

где  $\eta$  – КПД машинного агрегата;



$T_{\text{ср}}^{\text{пр}}$  – суммарный приведенный момент внешних сил, приложенных к звеньям механизма.

$$\eta = (\eta_1)^2 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 = (0,98)^2 \cdot 0,94 \cdot 0,9 = 0,81, \quad (7)$$

где  $\eta_1 = 0,98 \dots 0,99$  – КПД соединительной муфты (при их отсутствии  $\eta_1 = 1$ );

$\eta_3 = 0,8 \dots 0,9$  – КПД двухпоршневого насоса двухстороннего действия;

$\eta_2$  – КПД цилиндрического одноступенчатого редуктора определяется по формуле:

$$\eta_2 = 1 - [(\varphi_3 + \varphi_2) + m_n \psi_n] = 1 - [0,04 + 2 \cdot 0,01] = 0,94, \quad (8)$$

где  $(\varphi_3 + \varphi_2) = 0,02 \dots 0,05$  – сумма коэффициентов потерь в зубчатой передаче и гидравлических потерь на перемешивание масла в картере редуктора;

$\psi_n = 0,005 \dots 0,01$  – коэффициент потерь в одной паре подшипников;

$m_n$  – число пар подшипников ( $m_n = 2$  для одноступенчатого редуктора).

Выбор электродвигателя: 5A160S6 с номинальной мощностью 11 кВт; - частотой вращения ротора при номинальной нагрузке двигателя – 970 об/мин.

#### 6. Изготовление цилиндра.

Цилиндр должен обладать: достаточной прочностью, герметичностью, высокими антифрикционными свойствами, хорошей коррозионной стойкостью. Свойства этих материалов приведены в таблице 2. В результате анализа характеристик сталей Сталь 40Х, Сталь 45Х, Сталь 20ХГНМ для изготовления цилиндра выбран материал 20ХГНМ.

Таблица 2 – Свойства материалов

Марки	Предел прочности при растяжении $\sigma_{\text{в}}$ , МПа	Ударная вязкость КСУ, Дж/см <sup>2</sup>	Предел текучести $\sigma_{\text{т}}$ , МПа	Относительное удлинение $\delta$ , %	Относительное сужение $\Psi$ , %	Твердость по Бринеллю НВ, МПа
Сталь 40Х	980	59	785	10	45	217
Сталь 45Х	1030	49	835	9	45	229
Сталь 20ХГНМ	1180-1570	59	930	7	/	207

Чертеж детали цилиндр приведен на рисунке 4.

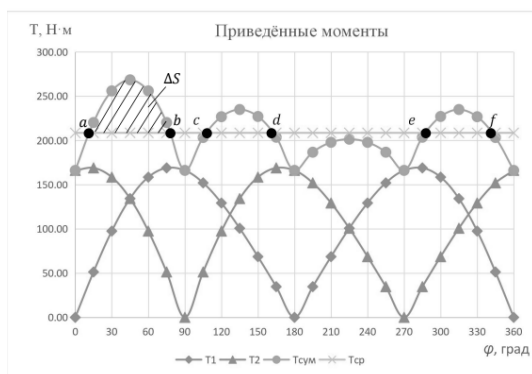


Рисунок 3 – Графики приведенных моментов

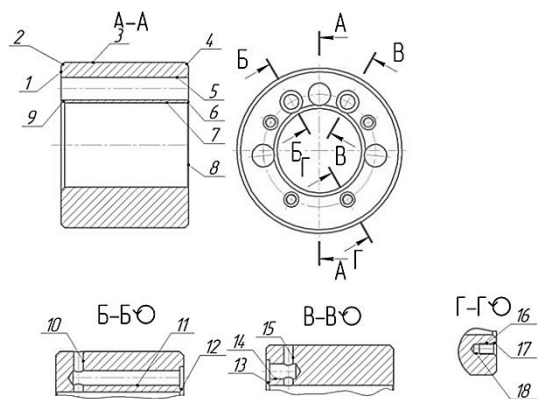


Рисунок 4 – Поверхности обработки конструкции цилиндра

При выборе исходной заготовки и метода ее изготовления рассмотрены два способа ее получения метод горячей объемной штамповки в открытых штампах на молотах и метод горячей объемной штамповки в закрытых штампах на кривошипных горячештамповочных прессах [3,4]. Применение штамповки в закрытых штампах на кривошипных горячештамповочных прессах позволяет повысить коэффициент использования металла, то есть уменьшить количество отходов, и значительно уменьшить время на механическую обработку. Выбран метод формообразования объемной штамповки в закрытых штампах на кривошипных горячештамповочных прессах.

Выбор метода формообразования исходной заготовки по параметрам КИМ.

Коэффициент использования материала есть отношение массы материала в готовом изделии к массе материала, используемого для изготовления детали согласно формуле:

$$K_{\text{исп.м}} = \frac{m_{\text{д}}}{m_{\text{исп.м}}} \quad (9)$$

где  $m_{\text{д}}$  – масса готового изделия;  $m_{\text{исп.м}}$  – масса используемого материала для изготовления детали.

Массу готового изделия определим с помощью 3d-моделирования в системе автоматического проектирования «ProE-3D» (рис.5).

$$m_{\text{д}} = 2.16 \text{ кг}$$

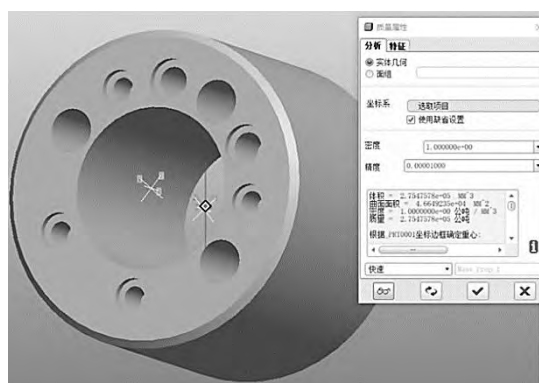


Рисунок 5 – 3D-модель

Так как в качестве заготовки используется штамповки, то в качестве массы используемого материала можем использовать расчетную массу поковки, которая рассчитывается согласно по формуле:

$$m_{\text{заг}}^{\text{расч}} = m_{\text{д}} \cdot K_{\text{р}} \quad (10)$$

$K_{\text{р}} = 1,6$  - коэффициент ориентировочной расчетной массы поковки по ГОСТ 7505-89.

$$m_{\text{заг}}^{\text{расч}} = 2.16 \cdot 1.6 = 3.46 \text{ кг} \quad (11)$$

Тогда коэффициент использования материала равен:

$$k_{\text{исп.м}} = \frac{2,16}{3,46} = 0.624 \quad (12)$$

Результаты расчета КИМ говорят о том, что выбор в качестве метода формообразования штамповки в закрытых штампах соответствует требованиям серийного производства.

## **Заключение**

Для двухпоршневого насоса выполнены метрический и кинематический анализ механизма, определены динамические характеристики для заданных условий работы насоса, выбран электродвигатель. Проведены исследования материалов и методов для изготовления цилиндра насоса. В результате выбрана Сталь 20ХГНМ метод формообразования объемной штамповки в закрытых штампах на кривошипных горячештамповочных прессах.

## **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Насосы химических производств: учебно-методическое пособие / сост. Е.А. Дмитриев, Е.П. Могрунова, Р.Б. Комляшев. - М.: РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2013. - 48 с.
2. К. В. Фролов. Теория механизмов и машин - М: Высшая школа 1987 - 496 с, ил.
3. Балабанов А.Н. Краткий справочник технолога -машиностроителя. - М.: Издательство стандартов, 1992. - 464 с.
4. Горбацевич А.Ф., Шкред В.А. Курсовое проектирование по технологии машиностроения. - Высш.школа 2007. - 280 с.

Ли Цзе, Г.В. Иванова, Е.А. Тарасенко  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Санкт-Петербург, Россия, [1849461244@qq.com](mailto:1849461244@qq.com)

## ВЫБОР МАТЕРИАЛА И ПАРАМЕТРОВ ДЕТАЛЕЙ ФРИКЦИОННОЙ МУФТЫ

### Аннотация

Работа посвящена исследованию параметров фрикционной муфты. Представлены результаты механических характеристик в зависимости от материалов деталей, усилия сжатия, формы дисков. Полученные результаты могут быть использованы в конструктивных решениях по модернизации муфт, направленных на повышение износостойкости их рабочих поверхностей.

*Ключевые слова:* фрикционная муфта, давление, изготовление деталей фрикционных муфт.

### Введение

Фрикционная муфта является одним из важных компонентов строительной техники. Она использует механическую силу трения между поверхностями трения для передачи крутящего момента от активного вала к ведомому валу.

Фрикционная муфта может включаться при любых различных скоростных режимах, и зацепление относительно стабильно, удары и вибрация невелики, а поверхность трения будет скользить при перегрузке, что может предотвратить повреждение деталей, но относительное скольжение фрикционной пластины приведет к износу фрикционной пластины, сокращая срок службы муфты [1 - 4].

Работа посвящена исследованию характеристик и повышению износостойкости фрикционных муфт.

### Методы

Для достижения поставленной цели использовали аналитические методы исследования МКЭ в программе Ansys и систему автоматического проектирования «Компас-3D» [4].

### Результаты и обсуждение

Для исследования муфт были выбраны следующие фрикционные материалы: металлокерамика, Сч35, асбест, ретинакс А, характеристики которых представлены в таблице 1.

Исходные данные по определению давления и проверочный расчет на износостойкость для материалов фрикционной пары со смазкой и без смазки показаны в таблице 2.

Расчетный вращающий момент, передаваемый муфтой:

$$T_{\text{расч}} = KT = \frac{KP}{\omega}, \text{ Нм} \quad (1)$$

Средний радиус поверхности трения дисков:

$$R_m = \frac{(D_1 + D_2)}{4}, \text{ мм} \quad (2)$$

Число пар трущихся поверхностей дисков:

$$z = (z_1 + z_2) - 1 \quad (3)$$

Сила сжатия дисков при включении муфты:

$$F = \frac{T_{расч} k}{f R_m z}, Н \quad (4)$$

Расчетное давление на трущихся поверхностях дисков:

$$P_m = \frac{4F}{\pi(D_1^2 - D_2^2)} < [p_m] \quad (5)$$

Результаты расчета по определению давления в фрикционных парах в зависимости от материалов представлены на рисунке 1 в.

Таблица 1 – Коэффициенты трения и допускаемые контактные давления для фрикционных муфт

Материал фрикционной пары	Коэффициент Трения f	Допускаемое давление [p], Н/мм2
Со смазкой		
Закалённая сталь по закалённой стали	0.06	0.6 – 0.8
Продолжение таблицы 1		
Чугун по чугуну или по закалённой стали	0.08	0.6 – 0.8
Текстолит по стали	0.12	0.4 – 0.6
Металлокерамика по стали	0.1	0.8
Без смазки		
Асбест по стали и чугуну	0.3	0.2 – 0.3
Металлокерамика по стали	0.4	0.3
Ретинакс А по закаленной стали	0,25	0,08-0,1
Чугун по чугуну или по закалённой стали	0.15	0.2 – 0.3

Таблица 2 – Исходные данные для расчета

Мощность Р, кВт	Угловая скорость, рад/с	Число дисков /Диаметры дисков, мм		Коэффициент работы муфты при переменной нагрузке, К	Коэффициент запаса сцепления k
		Ведущих D <sub>1</sub>	Ведомых D <sub>2</sub>		
3,5	50	9/110	10/82	1,7	1,4

Анализа полученных данных показал, что износостойкость выполняется для всех сочетаний фрикционных пар при заданных условиях работы фрикционной муфты.

Выполнен расчет напряжений фон Мизеса фрикционного диска для условий, приведенных выше. В процессе исследования варьировались величина усилия прижатия активного диска, материал и форма фрикционного диска за счет выполнения на его поверхности отверстий и канавок.

Конечно-элементная модель диска, граничные условия, форма поверхности диска и пример результатов расчета представлены на рисунке 3.

Величина эквивалентных напряжений фон Мизеса мала, изменение формы диска незначительно влияет на полученные значения.

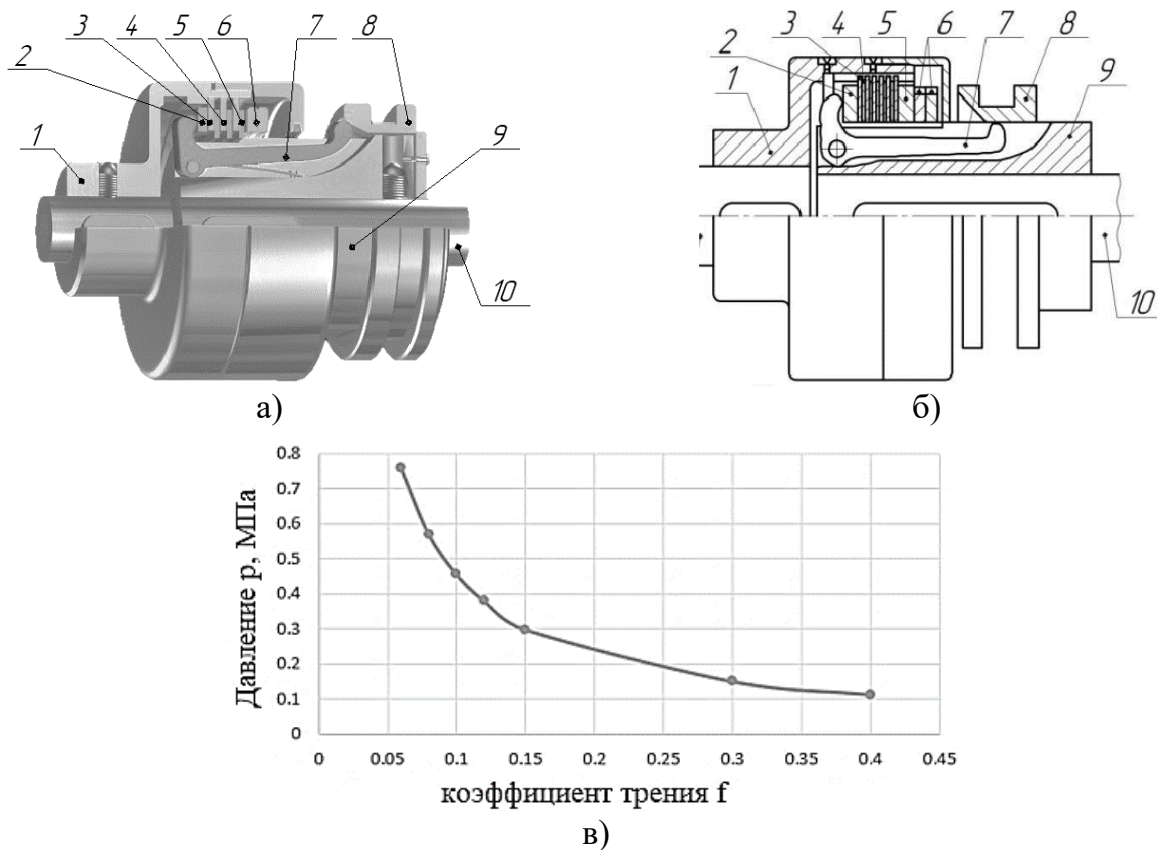


Рисунок 1 –Муфта фрикционная: а) Вид муфты; б) Принципиальная схема фрикционной муфты 1 –полумуфта, 2 –упорные кольца, 3 –наружный диск,4 –внутренний диск, 5 –упорные кольца, 6 –упорная гайка, 7 –механизма включения муфты, 8 –подвижной втулки, 9 –полумуфт, 10 –вал; в)Зависимость расчетного давления от коэффициента трения фрикционной пары

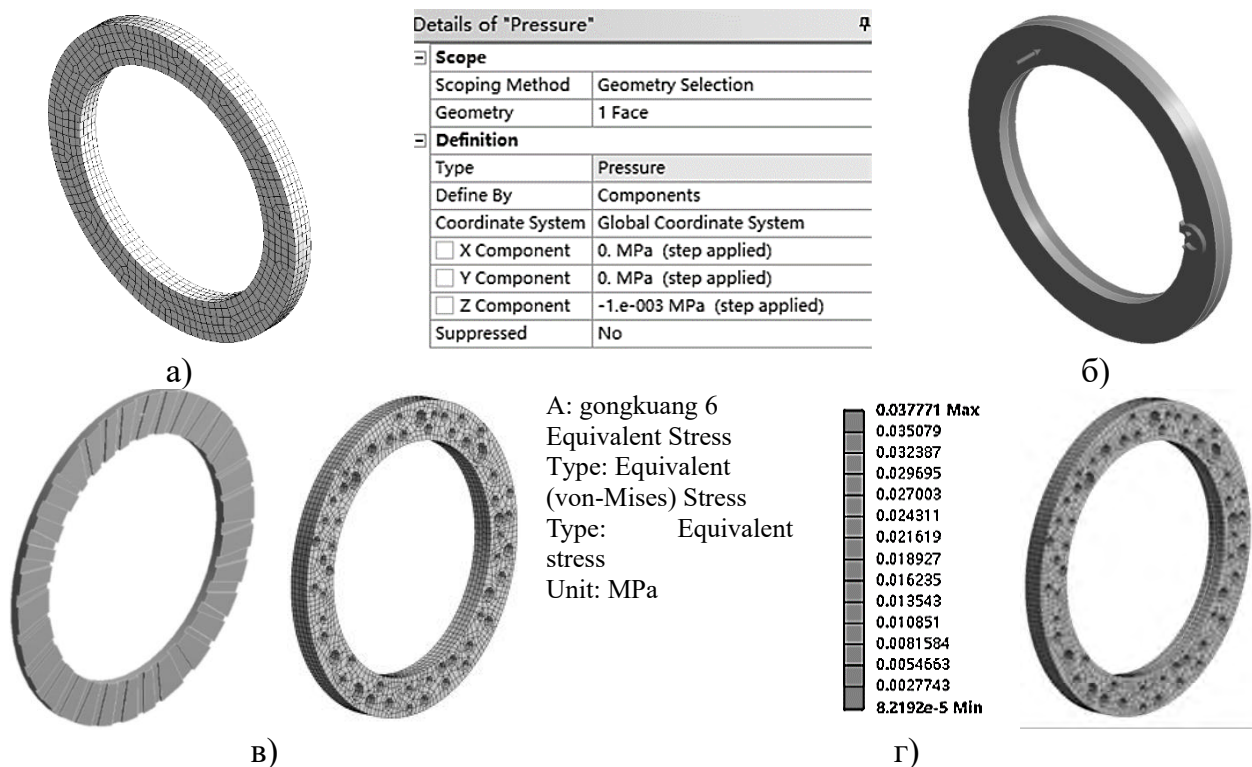


Рисунок 3 – Анализ МКЭ: а) Конечно-элементная модель диска; б) Граничные условия; в) Формы дисков; д) Результаты расчета

Предложен вариант изготовления полумуфты (рис.3а), выполненной из легированной стали 20ХГР ГОСТ 4543-71 с твердостью материала НВ<197 МПа. Заготовку получают методом горячей штамповки в открытой форме на кривошипно-штемпельной машине. Метод может обеспечить высокую производительность при тех же параметрах точности.

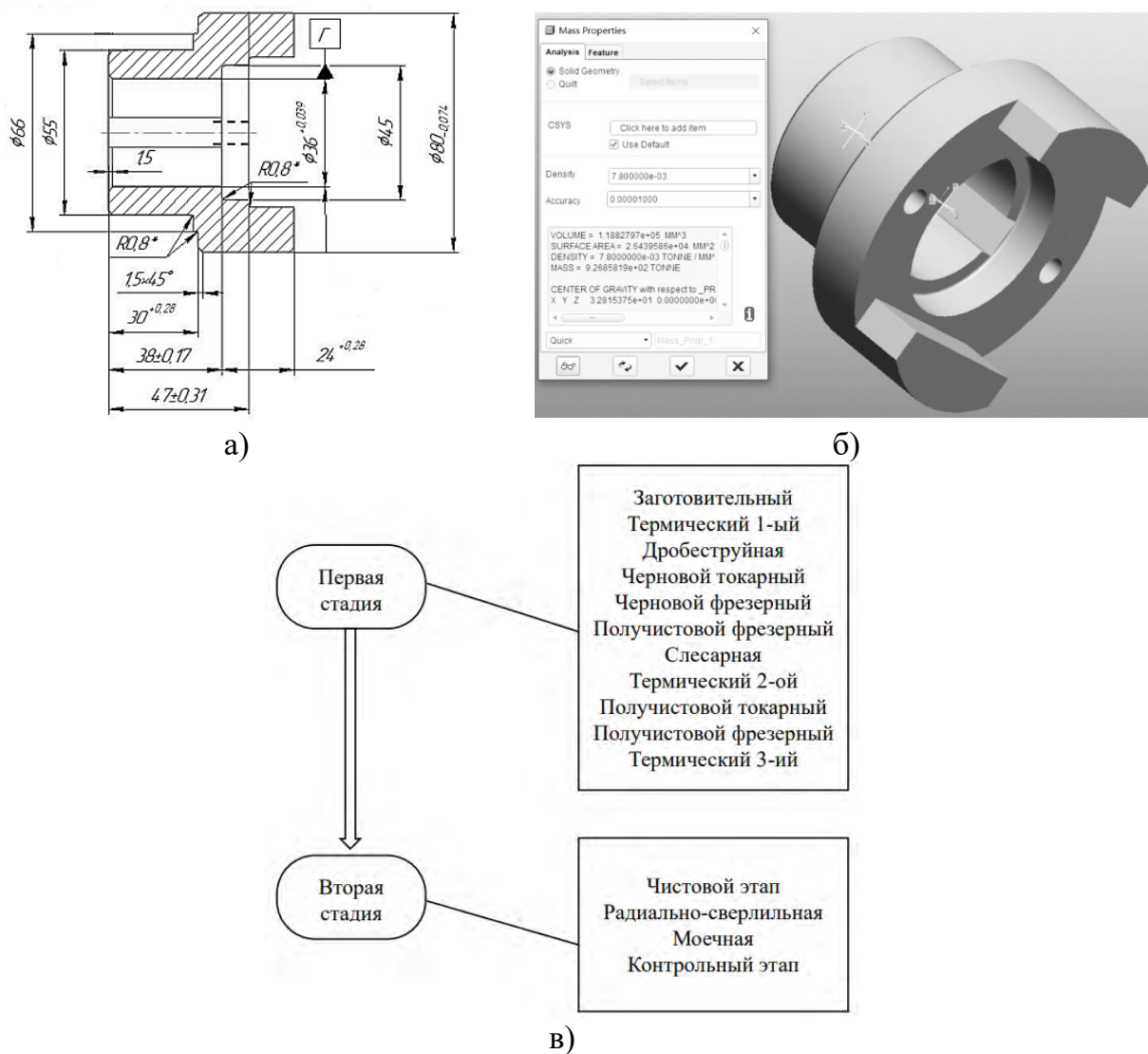


Рисунок 4 –Изготовление полумуфты: а) Чертеж муфты; б) 3D модель; в)технология обработки детали

Выбор метода формообразования исходной заготовки проводим по параметрам коэффициенте использования материала КИМ:

$$K_{\text{исп.м}} = \frac{m_{\text{д}}}{m_{\text{исп.м}}} \quad (6)$$

где  $m_{\text{д}}$  – масса детали;  $m_{\text{исп.м}}$ - масса используемого материала.

Массу готового изделия определяем с помощью 3D-моделирования в системе автоматического проектирования «Компас-3D» (рис.3б).

$$m_{\text{д}} = 0.9268\text{кг.}$$

Так как в качестве заготовки используется штамповки, то в качестве массы используемого материала можем использовать расчетную массу штамповки, которая рассчитывается согласно по формуле:

$$m_{\text{заг}}^{\text{расч}} = m_{\text{д}} \cdot K_{\text{р}} \quad (7)$$

масса используемого материала по формуле:

$$m_{\text{заг}}^{\text{расч}} = m_{\text{д}} \cdot K_{\text{р}} = 0.9268 \cdot 1.6 = 1.483 \text{ кг} \quad (8)$$

$K_{\text{р}} = 1,6$  – коэффициент ориентировочной расчетной массы.

Тогда коэффициент использования материала равен:

$$k_{\text{исп.м}} = \frac{0.9268}{1.483} = 0.625 \quad (9)$$

По результату расчета  $k_{\text{исп.м}}$ , метод формообразования заготовки методом штамповки удовлетворяет условиям серийного производства.

Схема технология обработки приведена в рисунке 3в.

### Заключение

Полученные результаты могут быть использованы в конструктивных решениях по модернизации муфт, направленных на повышение износостойкости их рабочих поверхностей, вариант процесса изготовления полумуфт для удовлетворения потребностей в производстве деталей фрикционных муфт.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гузенков П.Г. Детали машин: Учеб для вузов.-4-е изд., М.:Высш. Шк., 1986.
2. Кукаленко Б.Д. Детали машин и основы конструирования. Муфты приводов. Конструкции и расчет соединительных муфт [Электронный ресурс]: учебное пособие / Б.Д. Кукаленко, Е.В. Заборский; Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. — Электрон. текстовые дан. (1 файл : 2,33 МБ). — Санкт-Петербург: Изд-во Политехн. ун-та, 2016. — Загл. с титул. экрана. — Свободный доступ из сети Интернет (чтение). — Текстовый файл. — Adobe Acrobat Reader 7.0. — <URL:<http://elib.spbstu.ru/dl/2/s16-87.pdf>>.
3. Скотникова М.А., Шашерина С.А., Паитова О.В., Цветкова Г.В. Триботехнические свойства наноструктурированных медно-никелевых покрытий // Современное машиностроение. Наука и образование. - 2018. - № 7. - С. 370-382.
4. К.В. Елисеев; А.К. Кузин; С.Г. Орлов Вычислительная механика. Вычислительный практикум в системе ANSYS: учебное пособие [Электронный ресурс] <https://elib.spbstu.ru/dl/2/si20-389.pdf/view>



А.А. Ищенко, О. Чипензи, А.Ю. Степанов, Г.В. Иванова  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Санкт-Петербург, Россия, [galura@yandex.ru](mailto:galura@yandex.ru)

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ 3D ПЕЧАТИ ДЛЯ СОЗДАНИЯ КОНСТРУКТОРСКОГО МАКЕТА БУТЫЛОЧНОГО ДОМКРАТА**

### **Аннотация**

В работе рассмотрено сквозное применение средств автоматизированного проектирования и аддитивных технологий на базе FDM печати, для разработки конструкторского макета бутылочного домкрата. По имеющемуся чертежу разработали 3D-модели деталей, входящих в изделие, произвели их 3D-печать и сборку рабочего прототипа изделия (домкрата).

*Ключевые слова:* домкрат, 3D-модель, 3D принтер, аддитивные технологии.

### **Введение**

С одной стороны, сегодня широко освоена и внедрена технология 3D проектирования новых изделий в различных системах автоматизированного проектирования (САПР) таких как Компас 3D, SolidWorks и других. Компьютерное 3D моделирование существенно облегчает труд конструктора, позволяя при этом избежать ряда ошибок при изготовлении нового изделия «в железе», а также обеспечивает большую наглядность [1-2].

С другой стороны, компьютерное моделирование, оставаясь виртуальным, не решает всех проблем и не позволяет обнаружить все ошибки и недочеты при проектировании изделий и их составляющих на проверку собираемости, отработку технологии сборки, поиск ошибок и неточностей в конструкторской документации, схем разводки электрики, систем смазки и др.

Эти проблемы приходится решать при сборке макетов изделий в металле, что может приводить к повторному изготовлению деталей и сборочных единиц, изменивших свою геометрию в процессе компоновки изделия. В связи с этим, перед окончательной реализацией изделия, необходима разработка его конструкторского макета в металле.

Технология 3D печати в пластике приходит здесь на помощь, способствуя существенному удешевлению, упрощению и ускорению процесса изготовления конструкторских макетов новых проектируемых изделий. По предварительным оценкам его стоимость в 10-15 раз меньше, чем стоимость конструкторского макета из металла. [1-2].

### **Методы и материалы**

Компьютерное моделирование бутылочного домкрата выполняли в САПР программе Компас-3D.

Конструкторский макет домкрата выполняли из проволочного пластичного материала PLA, на 3D-принтере «Anet A8» в слайсере «Cura».

В слайсере на этапе создания gcode выбиралось оптимальное положение детали в пространстве при печати, с целью уменьшения время печати, расхода проволоки, риска деформаций и неплановой остановки печати.

Для печати в слайсере применялись следующие настройки: сопло принтера – 0.4 мм; толщина слоя при печати – 0.2 мм; скорость печати – 30 мм/с; толщина стенок – 1.2 мм; заполнение – 25%.

В среднем время 3D-печати струбцины домкрата составило 36 часов 33 минут – чуть более 1,5 суток; общий вес напечатанных деталей составил 336 граммов с учётом стандартных крепежей.

При создании твердотельной модели домкрата было принято решение отказаться от 3D-печати крепежа. Для сборки макета использовались металлические болты, гайки и т.д.

## Результаты и обсуждение

### Бутылочный домкрат: принцип действия и компьютерное 3D-проектирование в Компас 3D

На рисунке 1 представлены сборочный чертеж и схема действия бутылочного домкрата. Классические бутылочные подъемники без редуктора имеют предельно простое строение, в основе которого лежит корпус с внутренней резьбой, направляющей выдвигаемый стержень. Подъем груза осуществляется поворотом стержня вокруг своей оси, при помощи зафиксированной на его конце гайки с рукояткой. Для удобного вращения, гайка обычно оснащена шестеренкой, за которую цепляется выступающий зуб на конце ручки (может быть в виде трещотки). Сам поршень (стержень с резьбой), может быть телескопическим и помимо внешней резьбы иметь внутреннюю, по которой поднимается упор меньшего диаметра, при полном выдвигении основного [4].

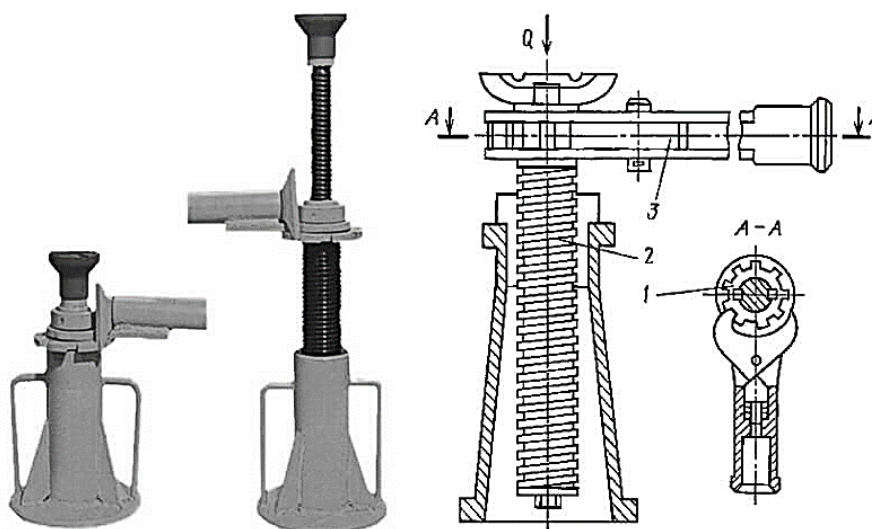


Рисунок 1 – Бутылочный домкрат

Согласно разработанному сборочному чертежу, в КОМПАС-3D были созданы 3D-модели отдельных деталей домкрата (Рис.2, а-е).

Моделирование геометрии нарезания трапецидальной резьбы на втулку и винт, было выполнено, согласно стандарта ГОСТ 24738-81 (Рис.3, а).

На практике, во время 3D-печати, наблюдалось расширение пластика и резьбовое соединение не работало. Поэтому, глубина зубьев была увеличена в 0,4 раза (Рис. 3, в) по сравнению со стандартной (Рис., б). Теперь винт заходил во втулку и резьбовое соединение функционировало нормально.

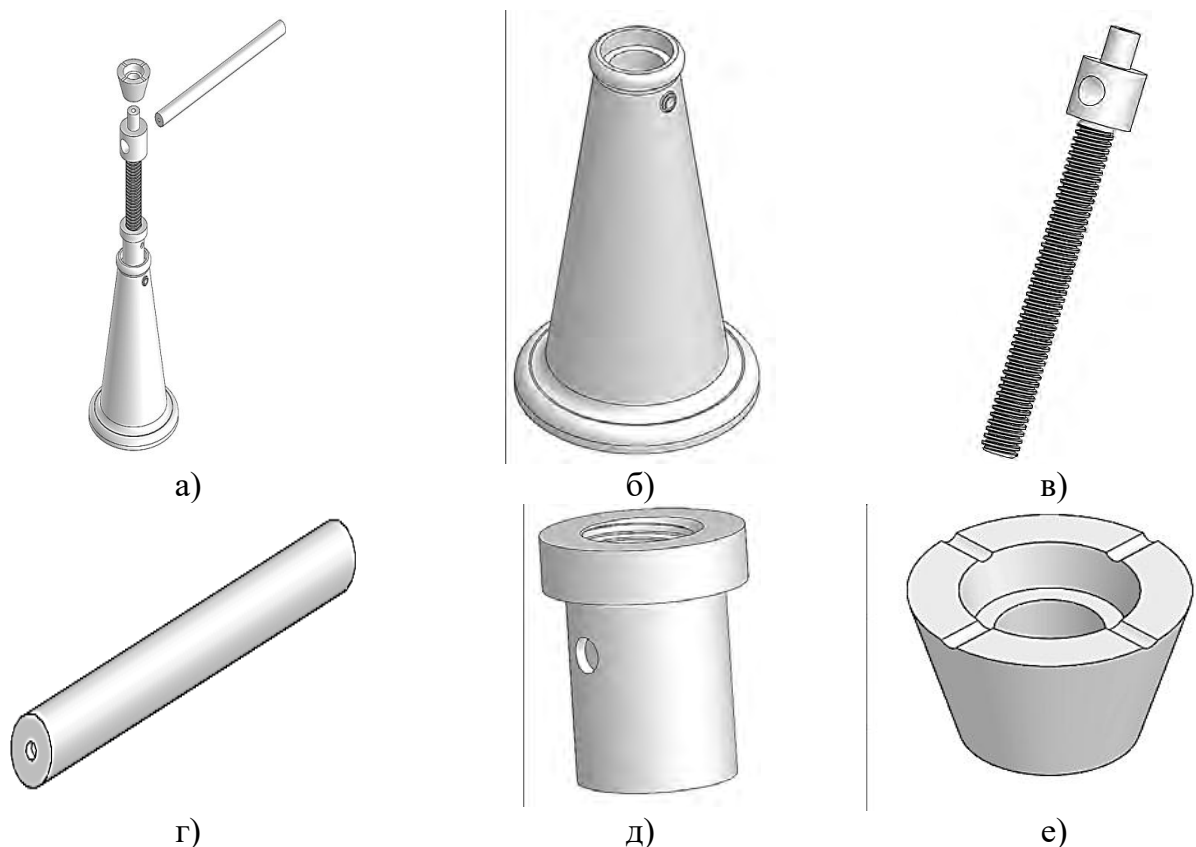


Рисунок 2 – Детали бутылочного домкрата в Компас-3D: а) общий сборочный чертёж домкрата; б) конусообразный корпус; в) винт с трапецидальной резьбой; г) рукоятка; д) втулка с трапецидальной резьбой; е) чашка

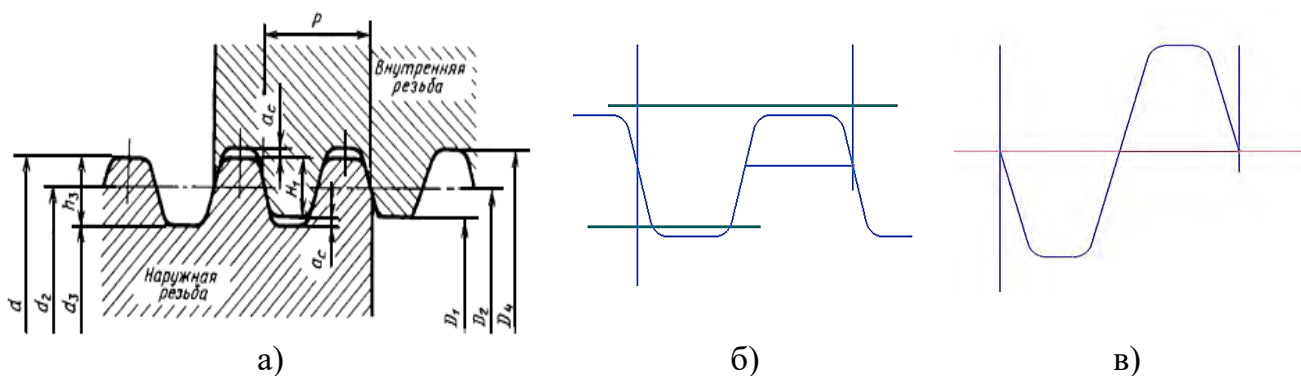


Рисунок 3 – Геометрия нарезания трапецидальной резьбы: а) согласно ГОСТ 24738-81; б) расчетная; в) использованная на практике

### Бутылочный домкрат: разработка конструкторского макета и 3D- печать на принтере «Anet A8» в слайсере «Cura»

Слайсер Cura – это слайсер 3D-моделей с открытым исходным кодом для 3D-принтеров. Он работает, разрезая файл модели пользователя на слои и генерируя специфический для принтера gcode.

G-code – это стандартный язык, используемый многими моделями 3D-принтеров для управления процессом печати, и содержимое файлов GCODE представляет собой обычный текст и может быть открыто даже в текстовом редакторе. После генерации, g-code отправляли на принтер для изготовления твердотельного изделия.

Конечные варианты моделей деталей отправлялись в слайсер для генерирования g-кода. Как оказалось, модель скобы превысила допустимый для печати размер, поэтому было принято решение модель каждой детали отмасштабировать с коэффициентом 0.8. На рисунке 4 представлены результаты расчета программой времени печати и необходимого количества пластика для изготовления каждой детали домкрата.

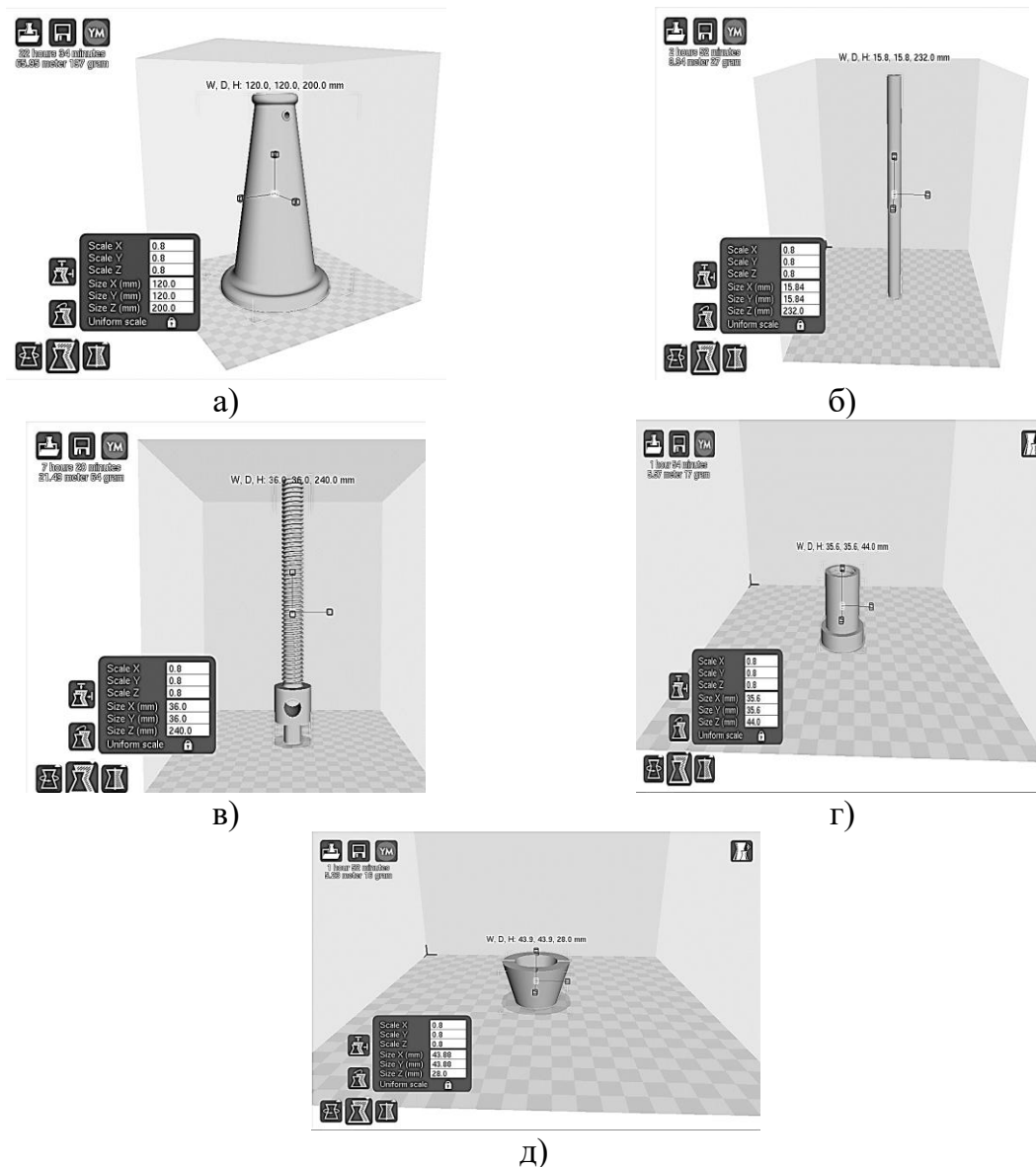


Рисунок 4. Детали домкрата в слайсере «Cura»: а) конусообразный корпус б) рукоятка в) винт с трапецидальной резьбой г) втулка с трапецидальной резьбой д) чашка

В данной программе возможно моделирование поддержек – вспомогательных конструкций, которые нужны во избежание деформаций массивных и сложных деталей при печати. После печати поддержки легко удаляются (их буквально можно оторвать руками), так как плотность заполнения материалом у них много меньше, чем у деталей.

При 3D-печати моделирование поддержки потребовалось при изготовлении корпуса домкрата. На рисунке 5 представлен конструкторский макет бутылочного домкрата, распечатанного на 3D принтере.

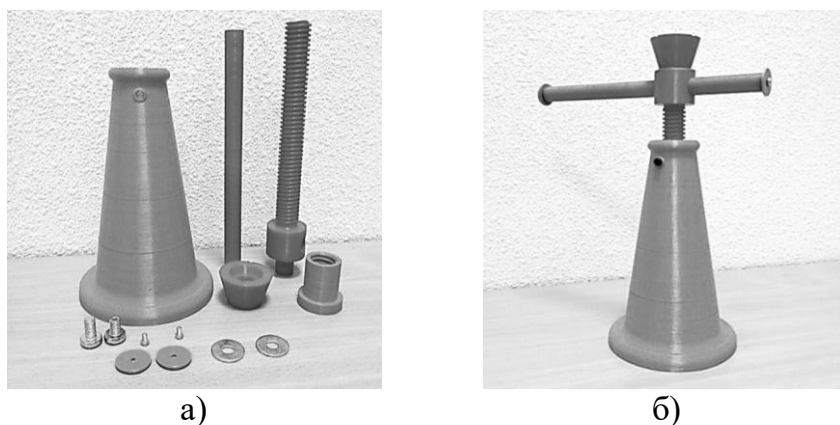


Рисунок 5. Конструкторский макет бутылочного домкрата, распечатанного на 3D принтере:  
а) используемые детали, б) сборка

После 3D-печати все детали потребовали небольшой пост-обработки, в частности, легкой шлифовки. Винтовой механизм винт-штулка потребовал дополнительной операции – смазки. После смазывания винта парафином и прокручивания на всю длину через резьбу во штулке, был получен полностью работающий инструмент.

### Заключение

Таким образом, в данной работе рассмотрена интегрированная система компьютерного проектирования и аддитивного производства для разработки конструкторского макета бутылочного домкрата. По имеющемуся рабочему чертежу были разработаны компьютерные 3D-модели деталей, входящих в изделие, произведена их 3D-печать и сборка рабочего прототипа изделия (домкрата).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вишняков А. Ю., Дерюгин Ю. Н. Пакет программ Логос. Модуль расчета сопряженных и связанных задач теплопереноса // Труды Московского физико-технического ин-та [Электронный ресурс]. URL: <http://www.sapr.ru/article.aspx?id=22132&iid=1013>.
2. Алексеев А. Н. Государственное регулирование инвестиционной деятельности в машиностроении России // Инновационные технологии и экономика в машиностроении: сб. тр. V Междунар. науч.-практ. конф. / Томск. гос. политехн. ун-т. 2014. С. 97-101.
3. ГОСТ 24738-81. Основные нормы взаимозаменяемости. Резьба трапецеидальная однозаходная. Диаметры и шаги. Взамен ГОСТ 9484-73 в части диаметров и шагов. Введен в действие 01.01.1982
4. Детали машин и основы конструирования: учебное пособие / И.М. Егоров, М.В. Жавнер, В.А. Жуков [и др.]; под редакцией В.А. Жукова; Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. - Санкт-Петербург, 2019. - 1 файл (1,95 Мб). - Загл. с титул. экрана. - Электронная версия печатной публикации. - Доступ по паролю из сети Интернет (чтение, печать, копирование). - Adobe Acrobat Reader 7.0. - <URL:<http://elib.spbstu.ru/dl/2/s20-22.pdf>>. - DOI 10.18720/SPBPU/2/s20-22. - Текст: электронный

Тан Цзяяо, Г.В Иванова, Е.А. Тарасенко  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Санкт-Петербург, Россия, [tangjiayao1104@163.com](mailto:tangjiayao1104@163.com)

## ИССЛЕДОВАНИЕ СИНХРОНИЗАТОРА КОРОБКИ ПЕРЕДАЧ

### Аннотация

Работа посвящена вопросу исследования характеристик синхронизатора в зависимости от его формы и геометрических параметров. Выполнены экспериментальные исследования с использованием системы автоматического проектирования «Компас-3D», программы Ansys, проанализированы полученные результаты влияния угла наклона зубьев синхронизатора на величину напряжений рабочих поверхностей.

*Ключевые слова:* синхронизатор, зубчатый привод, анализ напряжений

### Введение

Синхронизаторы являются важной частью коробки передач и широко используются в сельскохозяйственной технике, автомобильной промышленности, технике оборонно-промышленного комплекса. Использование синхронизатора позволяет коробке передач переключать передачи быстро и без ударов. Такой режим нагружения приводит к износу рабочих поверхностей синхронизатора и срок службы как самого устройства, так и коробки передач в целом.

В ходе экспериментальных исследований проводилась оценка влияния формы синхронизатора на величину эквивалентных напряжений. Снижение напряжений на рабочих поверхностях деталей синхронизатора позволит увеличить долговечность устройства.

### Методы

Для достижения поставленной цели использовали аналитические методы в программе Ansys и систему автоматического проектирования «Компас-3D» [1,2].

### Результаты и обсуждение

В работе использована методика расчета синхронизатора [3,4,5].

Исследования проводились для конусного инерционного синхронизатора расчетная схема которого показана на рисунке 1.

Проведен анализ влияния величины угла конуса на параметры трансмиссии.

Площадь поверхности трения синхронизатора определяют по формуле:

$$F_c = 2 \times \pi \times r \times b_c, \quad (1)$$

где  $r$  – средний радиус поверхности трения конуса синхронизатора, м;

$b_c$  – ширина кольца трения по образующей конуса, м.

$$r = \frac{M_T \times \sin \delta}{\mu \times S}, \quad (2)$$

где  $M_T$  – момент трения на поверхности конуса, Н × м;  
 $\delta$  – половина угла при вершине конуса, град.  
 $\mu$  – коэффициент трения.  
 $S$  – осевая сила, Н.

$$M_T = \frac{J_{\text{пр}} \times \omega_e \times \left( \frac{1}{i_{k+1}} - \frac{1}{i_k} \right)}{t_c}, \quad (3)$$

где  $t_c$  – время синхронизации, с.

$$S = P_{\text{рыч}} \times i_{\text{рыч}}, \quad (4)$$

где  $P_{\text{рыч}}$  – усилие, прикладываемое к рычагу коробки передач, Н;  
 $i_{\text{рыч}}$  – передаточное число рычага переключения передач.

$$b_c = \frac{M_T}{2 \times \pi \times \mu \times r^2 \times P_N}, \quad (5)$$

где  $P_N$  – допустимое давление на поверхность конуса, Па.

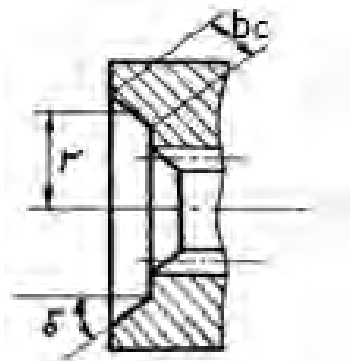


Рисунок 1 – Расчетная схема конусного инерционного синхронизатора

Принимаем  $t_c = 0,5$  с,  $\mu = 0,15$ ,  $i_{k+1} = 1$ ,  $i_k = 1,22$ ,  $J_{\text{пр}} = 0,1231 \text{ кг} \times \text{м}^2$ ,  
 $\omega_e = 527,5 \text{ с}^{-1}$ ,  $\delta = 10-14$ ,  $P_{\text{рыч}} = 100 \text{ Н}$ ,  $i_{\text{рыч}} = 11$ .

Изменение величины угла влияет на размер поверхности трения. На рис. 1 показан график зависимости  $r$  при изменении половины угла  $\delta$  от  $10^0$  до  $14^0$ .

Можно сделать вывод, что чем больше средний радиус поверхности трения  $r$ , тем меньше величина ширины кольца трения по образующей конуса  $b_c$ , поверхность трения  $F_c$  синхронизатора, поэтому при увеличении угла уменьшается осевая сила  $S$  для выравнивания угловых скоростей вала и включаемой шестерни.

Схема установки синхронизатора в коробке передач показана на рисунке 3.

На рис. 4 слева показана 3D модель, после установки синхронизатора, спроектированная в системе автоматического проектирования «Компас-3D», а справа - 3D модель синхронизатора.

При моделировании использована сталь 45 характеристика которой показана в таблице 1.

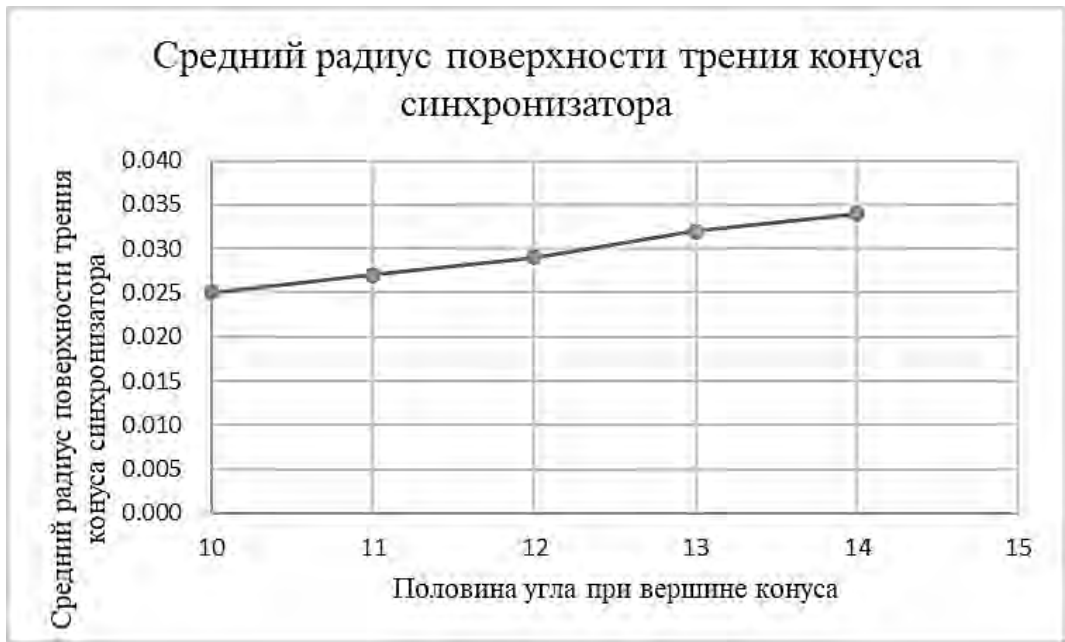


Рисунок 2 – График зависимости среднего радиуса поверхности трения конуса от величины половины угла синхронизатора

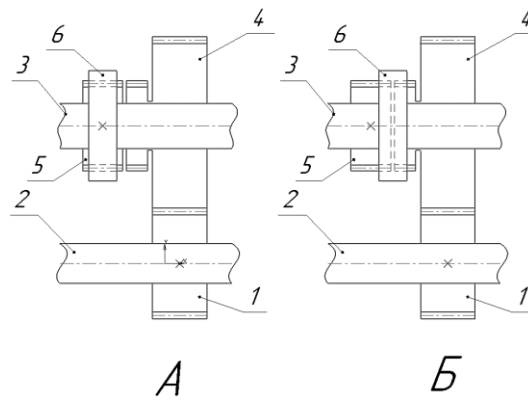


Рисунок 3 – Схема работы ступицы скользящей муфты: 1 - ведущее колесо, 2- ведущий вал, 3 - ведомый вал, 4 - ведомое колесо, 5 - ступица скользящей муфты, 6 - скользящая муфта

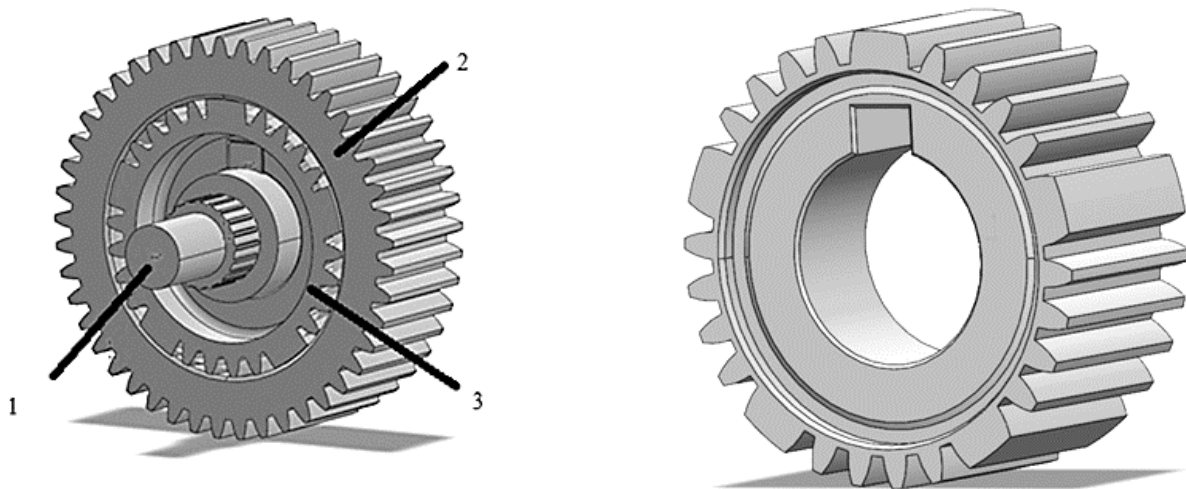


Рисунок 4 – Ступица скользящей муфты: 1 - ведомый вал, 2 - скользящая муфта, 3 - ступица скользящей муфты



Таблица 1 – Исходные данные для расчета

Плотность	Коэффициент Пуассона	Модуль упругости Е, ГПа	Предел прочности $\sigma_B$ , МПа	Предел текучести $\sigma_T$ , МПа
7890кг/м <sup>3</sup>	0,269	206	600	340

На рисунке 5 показан синхронизатор с углом наклона зубьев  $10^0$ .

В процессе исследования изменялся угол наклона зубьев до  $10^0$  при нагрузке 56000Н. Результаты расчета представлен на рисунках 6 и 7.

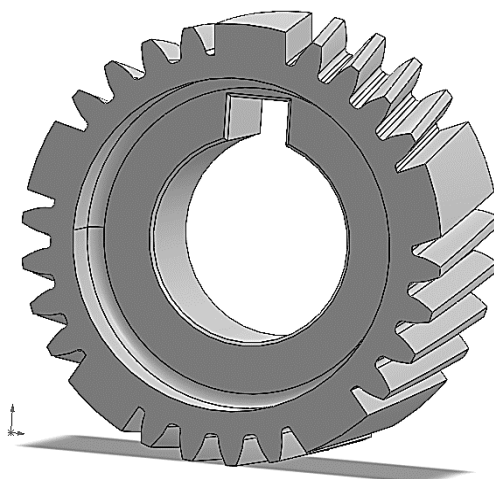


Рисунок 5 – Ступица скользящей муфты (угол  $10^0$ )

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ansys [Электронный ресурс]  
[https://mircompozitov.ucoz.ru/05\\_ansys\\_workbench](https://mircompozitov.ucoz.ru/05_ansys_workbench)
2. К.В. Елисеев; А.К. Кузин; С.Г. Орлов Вычислительная механика. Вычислительный практикум в системе ANSYS: учебное пособие [Электронный ресурс] <https://elib.spbstu.ru/dl/2/si20-389.pdf/view>
3. Горбацевич А.Ф., Шкред В.А. Курсовое проектирование по технологии машиностроения – Высш.школа 2007. - 280 с.
4. Исайчев, В.Т. Проектирование и расчет агрегатов и систем автотранспортных средств (трансмиссия): методические указания / В.Т. Исайчев; Оренбургский гос. ун-т. – Оренбург: ОГУ, 2013. – 93 с. Огородникова О.М. Статический конструкционный анализ.
5. Вахламов, В.К. Автомобили. Конструкция и элементы расчета / В.К. Вахламов. Изд. 2-е. – М.: Академия, 2006. – 480 с.

Е.В. Васильева, Г. Шеслер, М. Банда, Г.В. Иванова  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Санкт-Петербург, Россия, [galura@yandex.ru](mailto:galura@yandex.ru)

## АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ ПЕЧАТИ МЕХАНИЗМОВ С РЕЗЬБОВЫМИ СОЕДИНЕНИЯМИ

### Аннотация

В работе описывают опыт применения аддитивных технологий к полученным знаниям по курсу «Детали машин и основы конструирования», по сборочному чертежу разработаны цифровые модели механизма струбцины, а также передача винт-гайка с последующей 3D-печатью, сборкой и проверкой работоспособности прототипа. На протяжении всех этапов работы работоспособность резьбового соединения являлась приоритетом, так как от нее зависит работоспособность всего механизма. В результате проделанной работы мы создали модель струбцины с рабочим резьбовым соединением, подобрали оптимальный для резьбы зазор, который исключает риск поломки винта при проверке работы передачи.

*Ключевые слова:* аддитивные технологии, 3D-печать, 3D-модель, резьбовое соединение, макет твердотельного изделия.

### Введение

В наше время аддитивные технологии, такие как 3D-печать, стремительно развиваются: они экологичны, так как отходов от такого производства меньше, чем от механообработки, основной принцип которых – послойное снятие материала; они обладают и многими другими преимуществами перед традиционными методами производства.

Но можно ли полагаться на ту же 3D-печать изделия из пластика при проектировании и изготовлении деталей с резьбовыми соединениями? Как избежать сваривания пластика при трении, которое присутствует в данном виде соединения? Ответам на поставленные вопросы и посвящена данная работа.

### Методы и материалы

Для достижения поставленной цели была использована САПР «КОМПАС-3D» и программа «Cura».

Компьютерное моделирование резьбового соединения выполняли в САПР «КОМПАС-3D».

Макет твердотельного изделия резьбового соединения выполняли из проволочного пластичного материала «PLA», на 3D-принтере «Anet A8» в программе «Cura».

В слайсере на этапе создания gcode выбиралось оптимальное положение детали в пространстве при печати, с целью уменьшения время печати, расхода проволоки, риска деформаций и неплановой остановки печати.

Для печати в слайсере применялись следующие настройки: сопло принтера – 0.4 мм; толщина слоя при печати – 0.2 мм; скорость печати – 30 мм/с; толщина стенок – 1.2 мм; заполнение – 25%.

Общее время печати струбины 49 часов 39 минут – чуть более двух суток; Общий вес напечатанных деталей составил 459 граммов, из которых 171 грамм – расход материала на поддержки для скобы.

### Результаты и обсуждение

Современная цифровая экономика характеризуется внедрением новых цифровых технологий в машиностроение. САПР на этапе создания цифровых макетов позволяет провести проверку работающего механизма, а применение аддитивных технологий - проверит макет на работоспособность [2-4].

В СПбПУ при выполнении расчетного-графической работы «Винт-Гайка» по курсу «Детали машин и основы конструирования» были рассчитаны нагрузки, материалы, допускаемые напряжения и тип резьбы. [1]

При изучении дисциплины «Проектирование и исследование деталей машин» были применены полученные знания для разработки 3D-моделей деталей механизма струбины (также была разработана передача винт-гайка), произведена последующая их печать и сборка рабочего прототипа струбины.

Рассмотрим первый этап работы – создание 3D-моделей деталей струбины. Все модели были выполнены в САПР «КОМПАС-3D» строго по чертежу, 3D-модели приведены на рисунке 1.

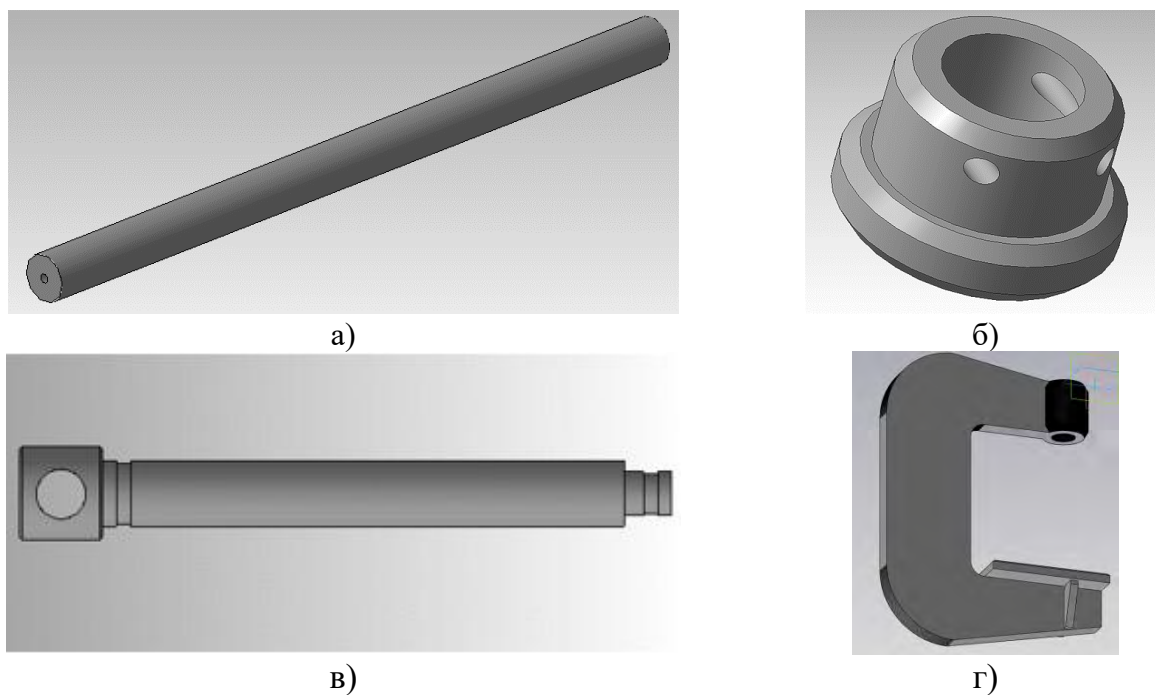


Рисунок 1–3D-модели струбины в САПР «КОМПАС-3D»: а) рукоятка; б) колодка; в) винт с резьбой; г) скоба.

Второй этап работы – разработка передачи винт-гайка. Работоспособность резьбового соединения является приоритетной задачей, так как от нее зависит работоспособность всего прототипа. Были разработаны резьбы с зазором 0,6 – он исключает поломку винта при работе передачи, а также сваривание пластиковых поверхностей от их нагрева при трении. Иллюстрации внешней и внутренней резьбы приведены на рисунке 2.

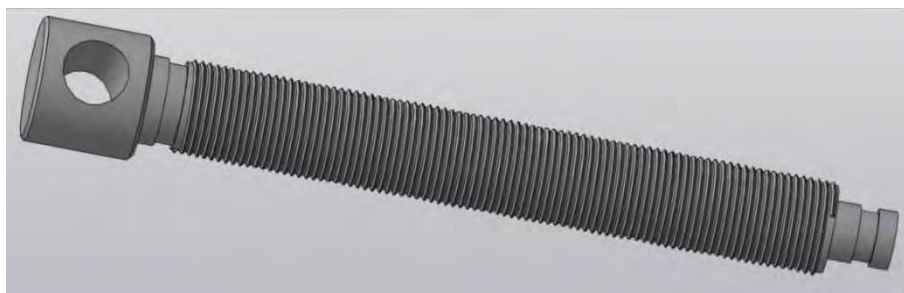


Рисунок 2–Резьба на детали винт

Третий этап – разработка g-содав слайсере «Cura», выбор оптимального положения деталей на столике 3D-принтера, расчет количества пластика и времени печати. На печать всех деталей потребовалось 49 часов 39 минут и 459 граммов (171 грамм ушел на поддержки – структуры, предотвращающие деформации модели во время печати). При работе в слайсере все детали были отмасштабированы с коэффициентом 0,78. Печать произведена со стандартными параметрами.

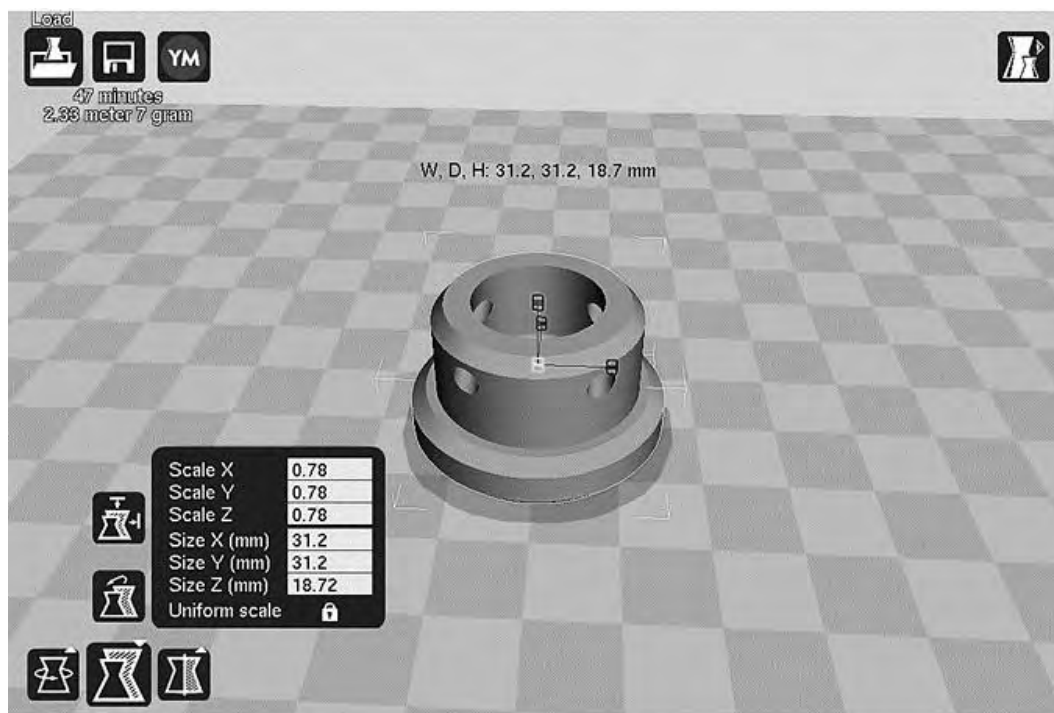


Рисунок 3–Разработка g-codeколонки струбцины в слайсере «Cura»

Четвертый этап работы – сборка и проверка работоспособности механизма. Зазор 0,6 является оптимальным зазором, и передача винт-гайка исправно работает. Остальные детали были напечатаны без ошибок, и сборка и испытания механизма прошли без проблем. Также нам удалось сохранить особенность конструкции, частично подвижную колодку, которая из-за своей особенности дает возможность зафиксировать объекты сложной формы. Это свидетельствует о верности проектирования и печати.

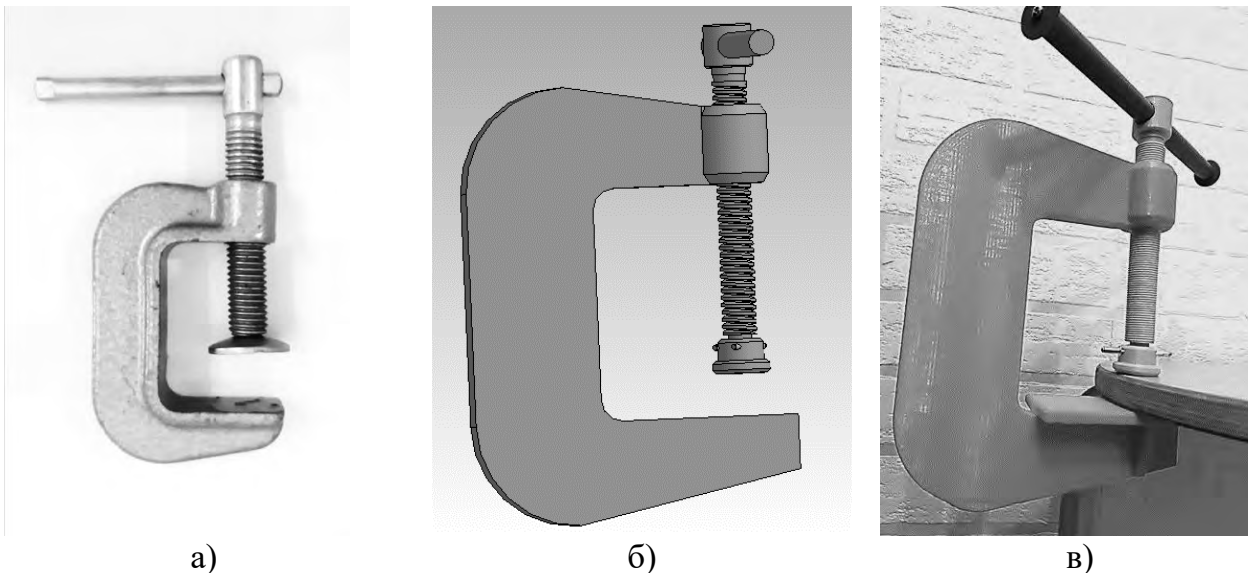


Рисунок 4– Струбцина: а) изделие из металла; б) 3D модель в КОМПАС-3D; в) распечатанная модель из пластика PLA

### Заключение

Таким образом, в данной работе рассмотрена интегрированная система компьютерного проектирования и аддитивного производства для разработки макета струбцины. По имеющемуся рабочему чертежу были разработаны компьютерные 3D-модели деталей, входящих в изделие, произведена их 3D-печать и сборка рабочего прототипа изделия (струбцины).

Правильное проектирование 3D-моделей, подбор оптимального зазора для резьбы с учетом специфики такого материала как пластик и корректная работа 3D-принтера позволили получать рабочий прототип изделия с резьбовым соединением.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Детали машин и основы конструирования: учебное пособие / И. М. Егоров, М. В. Жавнер, В. А. Жуков [и др.]; под редакцией В. А. Жукова; Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. - Санкт-Петербург, 2019. - 1 файл (1,95 Мб). - Загл. с титул. экрана. - Электронная версия печатной публикации. - Доступ по паролю из сети Интернет (чтение, печать, копирование). - Adobe Acrobat Reader 7.0. - <URL: <http://elib.spbstu.ru/dl/2/s20-22.pdf>>. - DOI 10.18720/SPBPU/2/s20-22. - Текст: электронный
2. Лейбов, А.М., Каменев Р.В., Осокина О.М. Применение технологий 3D-прототипирования в образовательном процессе // Современные проблемы науки и образования. 2014. №5. С. 93.
3. Зленко, М.А., Попович А.А. Мутылина И.Н. Аддитивные технологии в машиностроении: учеб. пособие. СПб.: СПбПУ, 2013. 222с.
4. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 14.07.2021 № 1913-р «Об утверждении Стратегии развития аддитивных технологий в Российской Федерации на период до 2030 года» // Собрание законодательства Российской Федерации от 2021. № 30 ст.5818.25.

Чэнь Шуньчао, Г.В. Иванова, Е.А. Тарасенко  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Санкт-Петербург, Россия, [2931168985@qq.com](mailto:2931168985@qq.com)

## АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ КЛАПАНА ПОДАЧИ ЖИДКОСТИ

### Аннотация

В работе представлена классификация клапанов прямого и непрямого действия, выполнены исследования для шарового предохранительного клапана прямого действия, проанализированы полученные результаты потери давления, перемещения клапана, жесткости пружины и других основных параметров клапана при различных плотностях жидкости.

*Ключевые слова:* шариковый предохранительный клапан прямого действия, потери давления, жесткость пружины, деформация пружины.

### Введение

Предохранительный клапан предназначен для защиты систем отопления, транспортировки жидкости и газов для защиты систем водоснабжения, отопления, транспортировки в химической, нефтегазовой, пищевой и других отраслях промышленности [1].

Предохранительный клапан прямого действия (рис.1,2,4) можно разделить по форме золотника на два вида: седельный клапан и золотниковый клапан. Конструкция седельного клапана делится на два типа: шаровой клапан и конусный клапан; конструкция золотникового клапана имеет три типа: золотниковый клапан, золотниковый клапан с демпфирующим отверстием и дифференциальный золотниковый клапан. На рисунке 2 представлена принципиальная схема седельного конусного клапана [2].

Предохранительный клапан прямого действия имеет простую конструкцию и высокую чувствительность. В клапанах прямого действия на запорно-регулирующий элемент действует усилие пружины, с противоположной стороны сила давления жидкости. В исходном состоянии золотник 3, установленный в корпусе 1, перекрывает каналы в напорной и сливной линиях. При увеличении силы давления до величины, превышающей усилие пружины 2, золотник будет перемещаться вверх, открывая канал для прохода потока из напорной линии в сливную (Рис.1) [3,4].

На давление сильно влияют изменения расхода перелива, а отклонение регулирования давления велико. Он не подходит для работы при высоком давлении и большом расходе. Он часто используется в качестве предохранительного клапана или там, где регулирование давления точность невелика.

Когда предохранительный клапан подключен к системе, гидравлическое масло создает усилие на сердечнике клапана. Направление усилия противоположно направлению усилия пружины. Когда давление на входе масла ниже, чем отрегулированное давление предохранительного клапана, сердечник клапана не откроется. В это время давление на входе масла в основном зависит от внешней нагрузки. Когда сила масла превышает силу пружины, сердечник клапана открывается, и масло поступает обратно в бак из переливного отверстия. Усилие пружины увеличивается с увеличением открытия предохранительного клапана до тех

пор, пока оно не уравнивается с гидравлическим усилием. Когда предохранительный клапан начинает переполняться, давление на входе масла в основном остается стабильным на заданном значении, что играет роль регулирования давления переполнения. Величина предварительного сжатия пружины регулируется винтом регулирования давления, и можно регулировать значение давления сброса предохранительного клапана.

Предохранительный клапан непрямого действия, состоящий из основного и управляющего клапана (Рис.4), используют при больших значениях расхода. Клапан управления представляет собой классический предохранительный клапан прямого действия. Этот клапан способен пропустить лишь небольшой расход, но при его открытии за счет перепада давления на постоянном дросселе 6 запорно-регулирующий элемент переместится вверх и соединит напорную линию со сливом. Пружина 4 в этом клапане мягкая, она предназначена для возвращения запорно-регулирующего элемента в исходное состояние. Настройка клапана осуществляется регулировочным винтом 1, который позволяет изменить предварительное поджатие силовой пружины 2.

Определение и выбор конструктивных параметров элементов клапанного устройства с учетом технологической нагрузки и свойствами перекачиваемой жидкости позволит увеличить его долговечность, снизить эксплуатационные затраты.

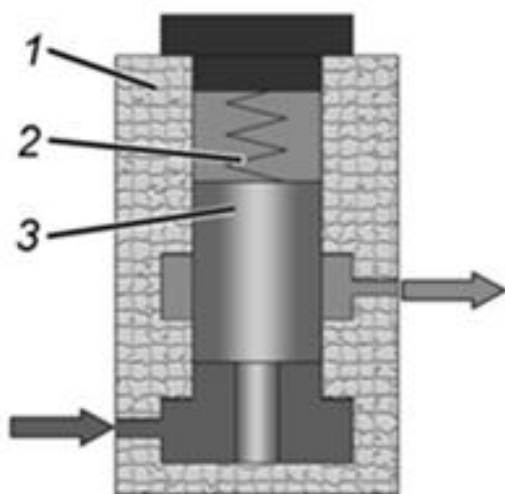


Рисунок 1 – Предохранительный клапан прямого действия: 1 - клапан, 2 - пружина, 3 - золотник

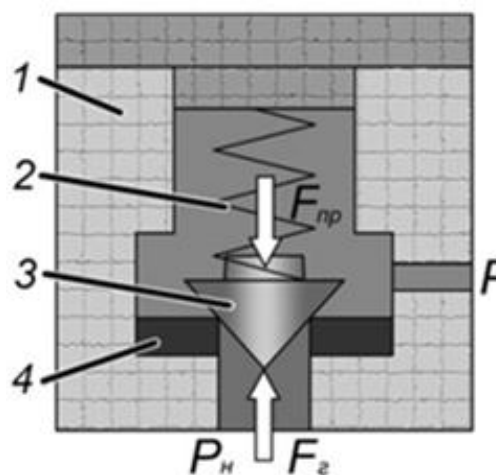


Рисунок 2 – Предохранительный клапан седельного типа: 1 - корпус, 2 - пружина, 3 - запорно-регулирующий элемент, 4 - седло

### Методы

Для достижения поставленной цели использовали Компас для оцифровки чертежей и MSExcel для обработки полученных данных.

Исследования выполнены для условия: подача насоса  $Q_{н,} = 5 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$ , предохраняемый объем  $V = 3 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3$ , настроенное давление  $P_{н} = 5 \text{ МПа}$ , плотность жидкости  $\rho = 800 \text{ кг/м}^3$ ;  $\rho = 900 \text{ кг/м}^3$  и  $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$ . Расчетная модель показана на рисунке 5а,б.

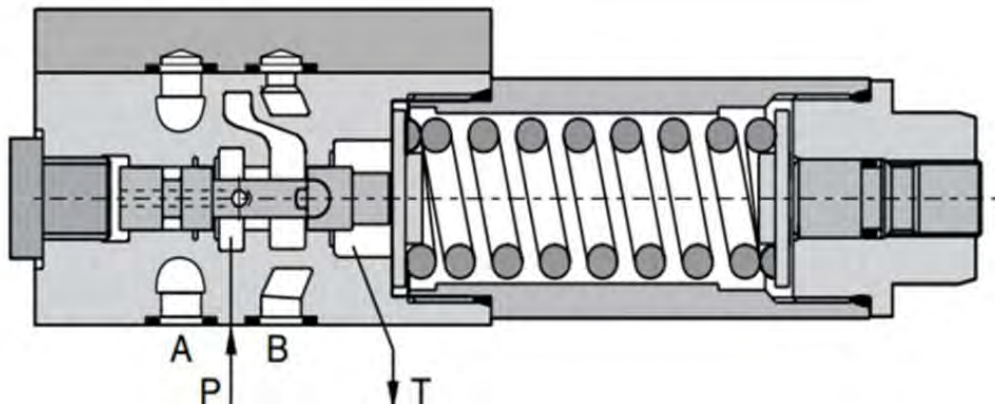


Рисунок 3 – Предохранительный клапан прямого действия (VB\*A06)

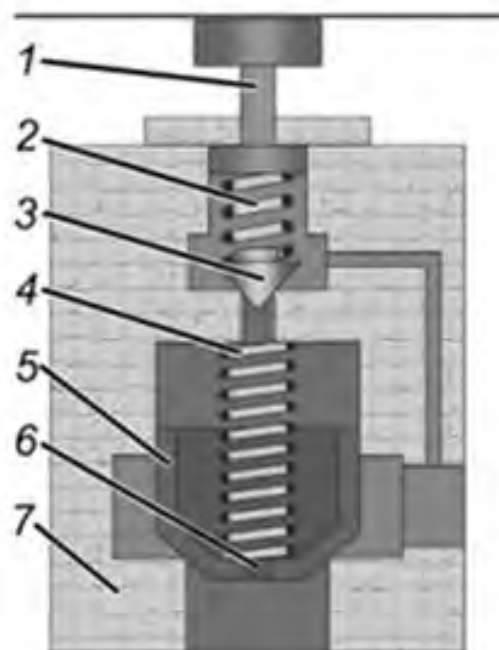


Рисунок 4 – Непрямой предохранительный клапан: 1 - регулировочный винт, 2 - пружина, 3 - золотник, 4 - пружина, 5 - запорно-регулирующий элемент, постоянный дроссель, 7 - корпус

По формуле 1 определяются потери давления на сливе:

$$\Delta p_{\text{сл}} = \lambda \rho \cdot \frac{8L_{\text{э}} \cdot Q_{\text{н}}^2}{\pi^2 \cdot d_{\text{сл}}^5} \quad (1)$$

$$\lambda = 0,11 \left( \frac{\Delta}{d_{\text{сл}}} \right)^{0,25} \quad (2)$$

где  $\Delta$  - высота микронеровностей сливного клапана;

$\lambda$  - коэффициент Дарси, определяемый по формуле Шифринсона;

$d_{\text{сл}}$  - диаметр сливного канала;

$L_{\text{э}}$  - эквивалентная длина сливного канала;

$Q_{\text{н}}$  - подача насоса.

По формуле 3 определяются жесткость пружины:



$$C_{\text{пр}} = \frac{\Delta F}{x} = \frac{\Delta P \cdot \pi \cdot D_{\text{кл}}^2}{4x} \quad (3)$$

$$\Delta p = 0,2p_H \quad (4)$$

$$x = \frac{Q_{\text{кл}}}{\mu \cdot \pi \cdot D_{\text{кл}} \cdot \sin \alpha} \cdot \sqrt{\frac{\rho}{2(p_H - \Delta p_{\text{сл}})}} \quad (5)$$

$p_H$  -настроечное давление;

$D_{\text{кл}}$ -диаметр канала;

$\alpha$  - угол конусности клапанаЖ

$\Delta p_{\text{сл}}$ - потери давления;

$Q_{\text{кл}}$ -подача канала;

$\mu$  - коэффициент расхода;

$x$ -перемещение клапана;

$\rho$  - плотность жидкости.

По формуле 6 деформация пружины:

$$x_0 = \frac{F_0}{C_{\text{пр}}} \quad (6)$$

$$F_0 = P_H \cdot A_{\text{кл}} = P_H \cdot \frac{\pi \cdot D_{\text{кл}}^2}{4} \quad (7)$$

$p_H$  -настроечное давление;

$D_{\text{кл}}$ -диаметр канала;

$C_{\text{пр}}$ -жесткость пружины

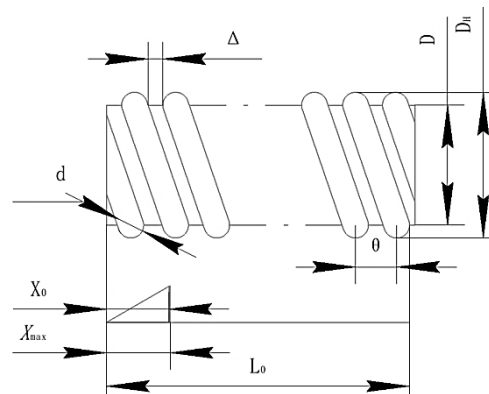


Рисунок 5 – Пружина

На рисунке 7 представлены графики потери давления, на рисунке 8 а, б жесткость и деформация пружины в зависимости от плотности жидкости. Жесткость пружины  $C_{\text{пр}}$  определяется из условия, чтобы шарик пропустил жидкость он должен подняться над седлом, для этого необходимо сжать пружину дополнительной силой. Деформация пружины определяется как сумма предварительно деформации  $X_0$  и перемещение клапан  $X$ , конструктивные параметры пружины.

### Результаты и обсуждение

Анализ полученных результатов показывает, что с увеличением плотности жидкости:

1. перепад давления в клапане увеличивается, что приводит к увеличению максимальной силы сжатия пружины  $F_{\text{max}}$ ;
2. жесткость пружины уменьшается с увеличением плотности жидкости;

3. деформация пружины увеличивается с увеличением плотности жидкости.

Изменение величины жесткости и деформации приводит к увеличению диаметра и количеству витков пружины.

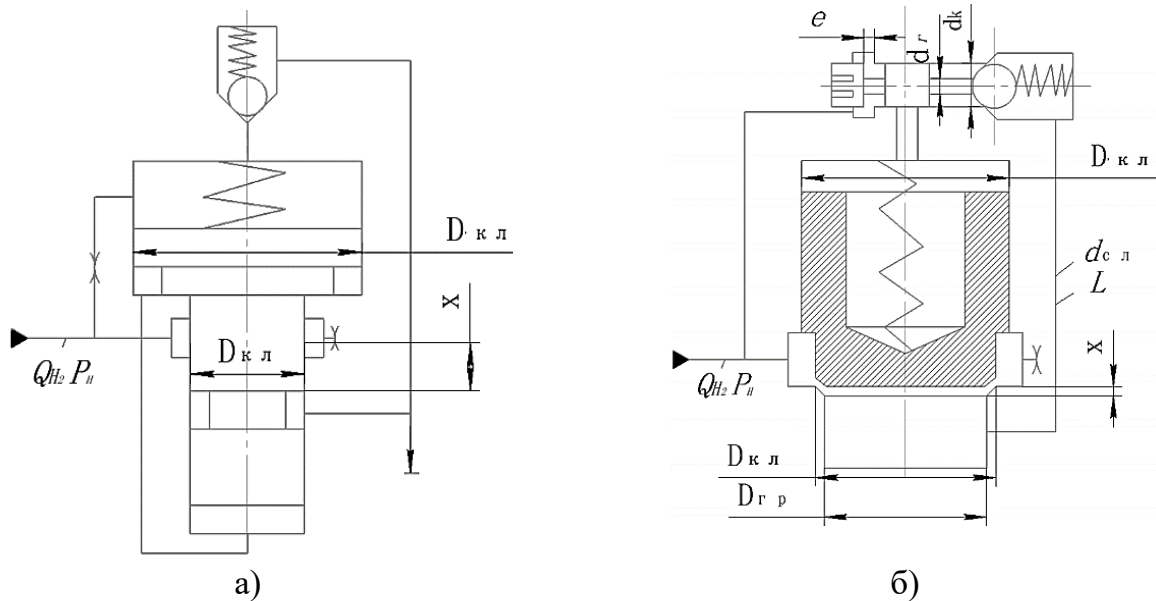


Рисунок 6 – Расчетная схема клапана: а) с постоянным дросселем; б) автоматическим дросселем

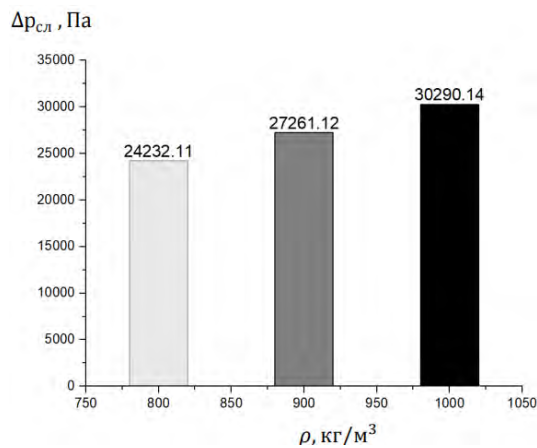


Рисунок 7 – Потери давления от плотности жидкости

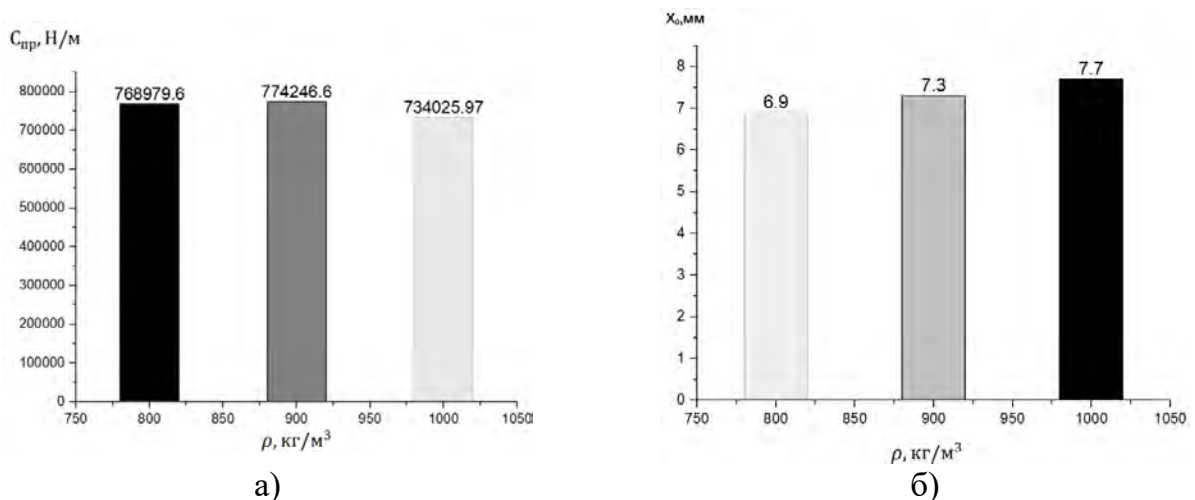


Рисунок 8 – Жесткость пружины и деформация пружины от плотности жидкости

## Заключение

С помощью теоретических расчетов определены механические параметры клапана прямого действия, влияние плотности жидкости на характеристики деталей клапана и пружинные устройства, что возможно использовать при проектировании клапанов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Конструирование безопасных аппаратов для химических и нефтехимических производств Г. Г. Смирнов, А. Р. Толчинский, Т. Ф. Кондратьева; Под общ. ред. А. Р. Толчинского. — Л.: Машиностроение. Ленинградское. отделение, 1988.

2. Расчет предохранительных клапанов: Учебно-метод. пособие по дисциплине «Средства гидропневмоавтоматики» для студ. спец. Т.05.11 «Гидропневмосистемы транспортных и технологических машин» (дневная и заочная формы обучения) / П.Р.Бартош, П.Н.Кишкевич. - Мн.:БГПА, 2001. - 60 с.

3. Клапан прямого действия принцип работы [Электронный ресурс] URL: <https://iobogrev.ru/klapan-prjamogo-dejstvija-princip-raboty?ysclid=12gmexckdb>

4. Технологии движения и средства управления Parker Гидравлика Parker. Клапаны давления [Электронный ресурс] URL: <https://www.newic.ru/catalog/gidravlika/parker/>

П.В. Болокан<sup>1</sup>, К.И. Золотарев<sup>1</sup>, И.А. Дьяченко<sup>2</sup>, Г.В. Иванова<sup>1</sup>, А.А. Москалец<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Санкт-Петербург, Россия, galura@yandex.ru  
<sup>2</sup>АО «ГОЗ Обуховской завод», Санкт-Петербург, Россия

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ 3D ПЕЧАТИ ДЛЯ СОЗДАНИЯ МОДЕЛЕЙ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ МЕХАНИЗМОВ НА ПРИМЕРЕ РУЧНОГО ПРЕССА**

### **Аннотация**

В работе рассмотрен опыт применения компьютерного проектирования и аддитивного производства для разработки функционального механизма на примере ручного пресса. Произведены печать отдельных деталей при помощи аддитивных технологий FDM-печати 3D-моделей и сборка рабочего прототипа механизма. Полученная модель служит наглядным прототипом для изучения работы механизма.

*Ключевые слова:* аддитивные технологии FDM-печати, 3D-модель, ручной пресс, макет твердотельного изделия.

### **Введение**

Без использования прессового оборудования, при помощи которого можно выполнять большой перечень технологических операций, сегодня не обходится ни одно производственное предприятие. Ручной пресс, обычно используется в условиях небольших цехов. Настольный ручной пресс, несмотря на свои компактные размеры, также позволяет выполнять множество технологических операций с деталями, изготовленными из различных материалов.

Цель данной работы заключалась в компьютерном проектировании, создании 3D-модели изделия и разработки его конструкторского макета в пластике. Прототип механизма (ручного пресса) позволит обнаружить все ошибки и недочеты при проектировании изделий и их составляющих на проверку собираемости, отработку технологии сборки, поиск ошибок и неточностей в конструкторской документации, схем разводки электрики, систем смазки и др. В учебном процессе конструкторский макет пресса будет выставляться для его наглядного изучения [1-6].

### **Методы и материалы**

Компьютерное моделирование ручного пресса выполняли в САПР программе Компас-3D.

Конструкторский макет пресса изготавливали из проволочного пластичного материала «PLA», на 3D-принтере «Anet A8» в Программе «Слайсер Cura» – это слайсер 3D-моделей с открытым исходным кодом для 3D-принтеров. Он работает, разрезая файл модели пользователя на слои и генерируя специфический для принтера g-code. G-code – это стандартный язык, используемый многими моделями 3D-принтеров для управления процессом печати, и содержимое файлов GCODE представляет собой обычный текст и может быть открыто даже в текстовом редакторе. После генерации g-code может быть отправлен на принтер для изготовления физического объекта.

Для печати в слайсере применялись следующие настройки: сопло принтера – 0.4 мм; толщина слоя при печати – 0.2 мм; скорость печати – 30 мм/с; толщина стенок – 1.2 мм; заполнение – 25%.

В среднем время 3D-печати ручного пресса составило 50 часов 52 минут; общий вес напечатанных деталей составил 824 грамма с учётом железных крепежей.

### Результаты и обсуждение

Разработка 3D-модели в Компасе, создание stl модели

Для создания прототипа основным источником исходных данных является сборочный чертеж и оригинальный механизм (рисунок 1).

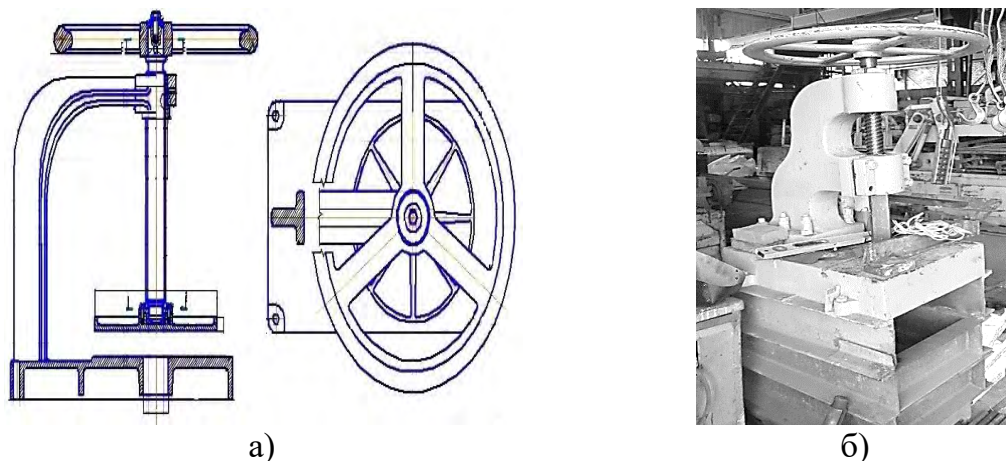


Рисунок 1 – Ручной пресс: а) сборочный чертеж; б) оригинальный механизм.

По имеющемуся чертежу разработать 3D-модели деталей, входящих в механизм, произвести их печать и сборку рабочего прототипа механизма (ручного пресса).

Печать производится с помощью аддитивной технологии FDM-печати, которая реализовывается благодаря экструзии материалов. В FDM-печати, объект строится путем нанесения расплавленного материала по заранее установленному алгоритму, слой за слоем. Используемые материалы представляют собой термопластичные полимеры и имеют форму нити. Эта технология является начальной стадией знакомства с 3D-печатью, а также относится к бюджетному варианту. Она особенно популярна в производстве деталей и запчастей, образцов и макетов, несложных медицинских изделий и сувенирной продукции.

При работе над проектом были разработаны 3D-модели деталей в программе КОМПАС-3D.

При разработке моделей часть деталей убиралась из итоговой сборки, также перерабатывалась деталь «Станина» (рисунок 2, а). Деталь «Пята» заменялась деталью «Колодка» (рисунок 2, ж).

Разработка gcode в слайсере Cura, расчет времени печати и количества пластика

В слайсере на этапе создания g-кода выбиралось оптимальное положение детали в пространстве при печати, с целью уменьшения время печати, расхода проволоки, риска деформаций и неплановой остановки печати (рисунок 3).

В связи с техническими ограничениями принтера каждая модель была отмасштабирована с коэффициентом 0,57. Так же при разработке моделей была

учтена усадка пластика, исходя из этого каждая деталь имеет зазор от 0,2 мм до 0,4 мм. Расчет количества пластика и времени печати деталей в программе производилось автоматически.

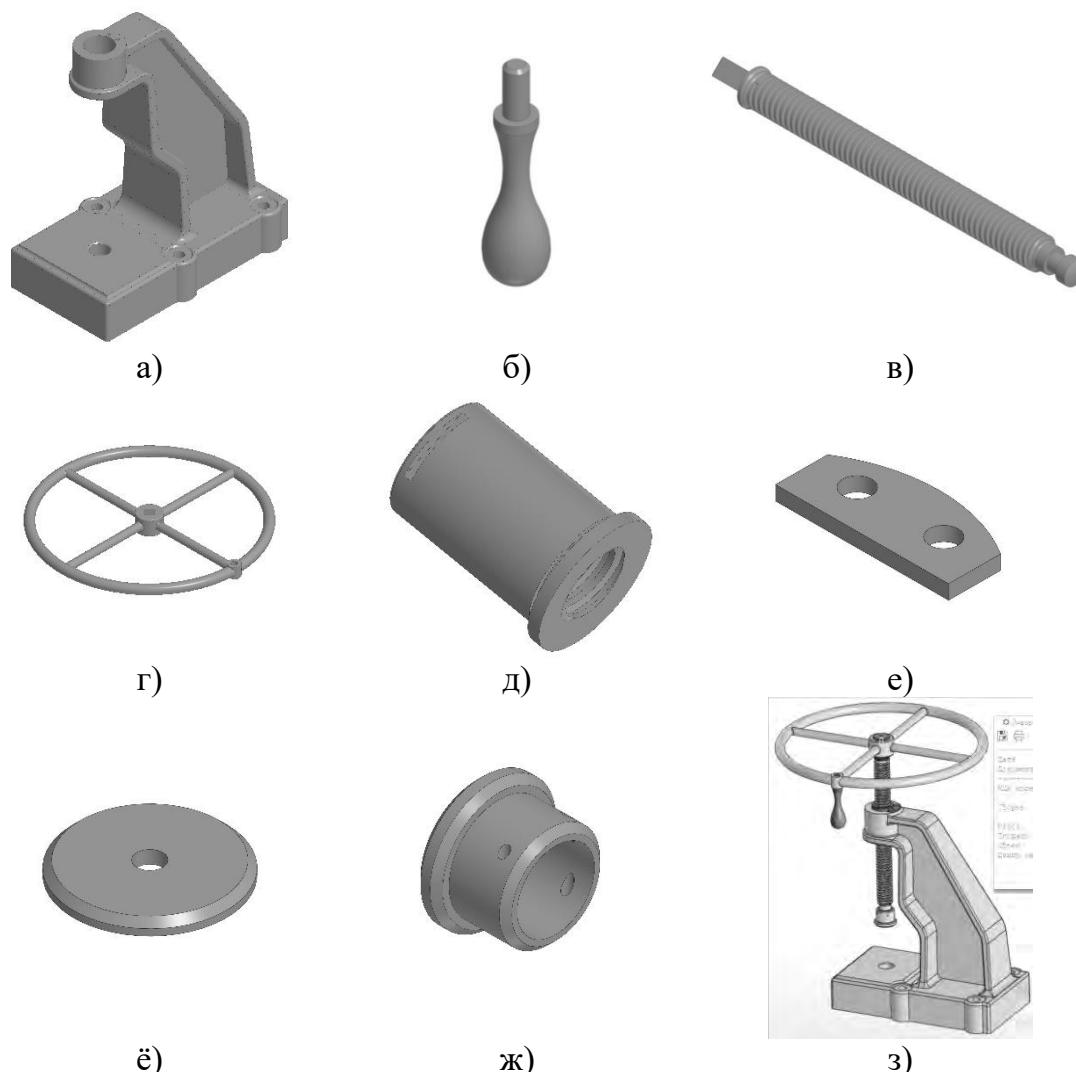


Рисунок 2 – Детали ручного пресса в Компас-3D: а) станина, б) рукоятка, в) винт, г) маховик, д) гайка, е) планка, ё) шайба, ж) колодка, з) общий, сборочный чертёж ручного пресса

Для детали «станина» (рисунок 3, а) были построены поддержки, которые служат увеличением качества и стабильности изготовления. У данной модели имеются нависающие конструкции и полости.

#### Печать 3D-модели и сборка рабочего винтового механизма

При использовании аддитивных технологий FDM-печати мы столкнулись с несколькими проблемами:

- низкая размерная точность;
- необходимость чистовой обработки и подгонке при сборке;
- наличие у деталей анизотропии из-за наличия четко выраженных слоев материала.

По результате выполненной работы были напечатаны все детали, представленные на рисунке 2. Детали собраны в механизм и прошли проверку

работоспособности. Неточности печати были устранены с помощью дополнительной обработки поверхностей наждачной бумагой и различными шлифовальными насадками гравера. Собранный ручной одностоечный пресс изображен на рисунке 4.

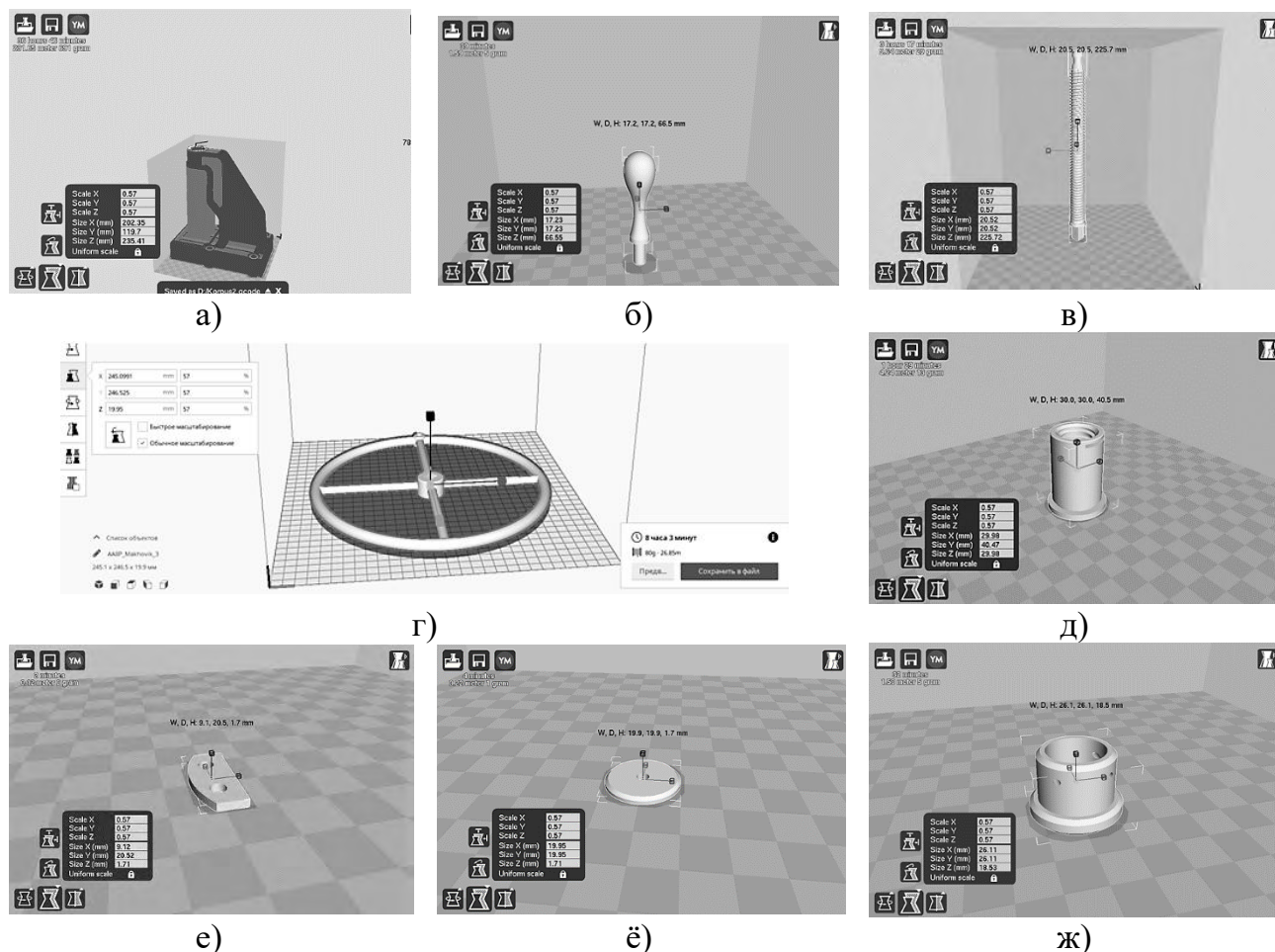


Рисунок 3 – Детали ручного пресса в слайсере Cura: а) станина, б) рукоятка, в) винт, г) маховик, д) гайка, е) планка, ё) шайба, ж) колодка

Таблица 1 – Параметры печати деталей на 3D принтере

	Время печати, ч:мин	Количество пластика, м	Расчетный вес детали, г
станина	36:46	231,65	691
рукоятка	00:39	1,59	5
винт	03:17	9,64	29
маховик	08:03	26,85	80
гайка	01:29	4,24	13
планка	00:02	0,12	0
шайба	00:04	0,22	1
колодка	00:32	1,58	5
итого	50:52	275,89	824

При сборке механизма были подобраны подходящие по размеру болты. Для более плавной работы винтовой механизм был смазан воском. Выбор смазочного материала был основан на специфике смазываемости пластика винт и гайка.

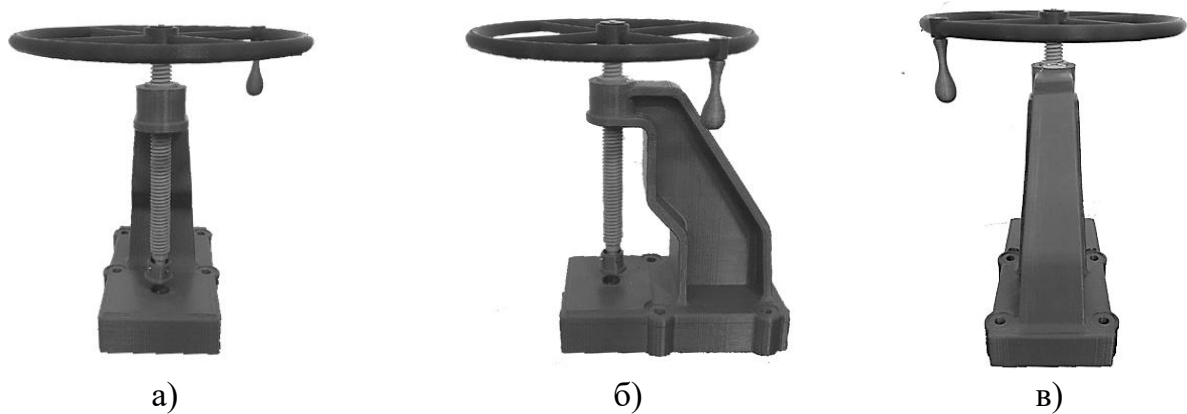


Рисунок 4 – Ручной пресс распечатанный на 3D принтере: а) сборка вид справа б) сборка вид спереди в) сборка вид слева

### Заключение

С помощью компьютерного проектирования и аддитивного производства был разработан конструкторский макет (прототип) ручного пресса, являющийся уменьшенной копией в 0,57 раза реального устройства, применяемого на предприятиях машиностроения. С помощью данного прототипа можно получить представления о внешнем виде, работе и сборке ручного одностоечного пресса, что поможет в обучении студентов и наглядном применении теоретических аспектов таких дисциплин, как детали машин и основы конструирования.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Детали машин и основы конструирования: учебное пособие / И.М. Егоров, М.В. Жавнер, В.А. Жуков [и др.]; под редакцией В.А. Жукова; Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. - Санкт-Петербург, 2019. Электронная версия печатной публикации. - Доступ по паролю из сети Интернет - <URL:<http://elib.spbstu.ru/dl/2/s20-22.pdf>> - DOI 10.18720/SPBPU/2/s20-22.
2. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 14.07.2021 № 1913-р «Об утверждении Стратегии развития аддитивных технологий в Российской Федерации на период до 2030 года» // Собрание законодательства Российской Федерации от 2021. № 30 ст.5818.25.
3. Зленко М.А., Попович А.А. Мутьлина И.Н. Аддитивные технологии в машиностроении: учеб. пособие. СПб.: СПбПУ, 2013. 222с.
4. Лейбов А.М., Каменев Р.В., Осокина О.М. Применение технологий 3D-прототипирования в образовательном процессе // Современные проблемы науки и образования. 2014. №5. С. 93.
5. Cura [Электронный ресурс]: Википедия. Свободная энциклопедия. - Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Cura> (дата обращения 30.04.2022).
6. G-code [Электронный ресурс]: Википедия. Свободная энциклопедия. - Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki/G-code> (дата обращения 30.04.2022).



А.Ю. Рябикин, М.А. Скотникова, Г.В. Иванова, Е.К. Иванов  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Санкт-Петербург, Россия, [ryabikin-98@mail.ru](mailto:ryabikin-98@mail.ru)

## СРАВНИТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ ИЗНОСОСТОЙКИХ СТАЛЕЙ

### Аннотация

В работе представлены сравнительные результаты триботехнических испытаний трёх износостойких сталей (Hardox 550, Hardox 500, Hardox 450) по сравнению с конструкционной сталью 09Г2С. Показано, что с понижением относительной износостойкости стали, уменьшаются прочностные (предел прочности и текучести) и увеличиваются пластические (относительное сужение и удлинение) свойства. Прослеживается корреляция износостойкости с микротвёрдостью исходной структуры и микротвёрдостью поверхности трения образцов (роликов) после испытания.

*Ключевые слова:* износостойкость, микротвёрдость, машина трения, сталь, весовой износ.

### Введение

Согласно практическим наблюдениям, после выработки 35 тыс. кубометров песчано-щебёночного грунта, зубья ковшей экскаваторов находятся в стадии полного износа, (рисунок 1). Их угол заострения увеличивается в 2,5 раза, а рабочая длина уменьшается более, чем в 3 раза, что резко снижает общую производительность строительной спецтехники за счет абразивного механизма изнашивания. Это значит, что разрушение изделия происходит вследствие перетирания металлической поверхности режущего инструмента частицами грунта большой твёрдости, в условиях воздействия воздуха и грунтовых вод.



Рисунок 1 – Зубья ковша экскаватора после выработки 35 тыс. м<sup>3</sup> песчано-щебёночного грунта

Предупредить отказ строительной техники вследствие износа, позволяет правильно выбранная марка износостойкой стали [1-4].

Поэтому целью работы явился выбор материала для зубьев ковшей экскаваторов в результате сравнительных исследований механических,

металлографических и триботехнических свойств трех износостойких сталей по сравнению с конструкционной сталью 09Г2С.

Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

- провести сравнительные испытания на износостойкость 4-х сталей на машине трения СМЦ-2;
- провести сравнительные металлографические исследования структуры и микротвердости сталей в поверхностном слое листового полуфабриката.
- выбрать марку износостойкой стали, обладающей оптимальными механическими и трибологическими свойствами.

### Методы

В качестве материала для исследования были выбраны три износостойкие стали марки Hardox (Hardox 550, Hardox 500, Hardox 450) по сравнению с конструкционной сталью 09Г2С. Мелкозернистые горячекатаные стали после закалки и отпуска обладали твердостью 550, 500, 450 НВ, соответственно. Такие стали устойчивы ко всем видам износа. Благодаря этому срок эксплуатации изделий и конструкций из Hardox в пять раз выше, чем у аналогичного металлопроката из других марок сталей [5-7].

Как видно из таблицы 1, увеличению твердости сталей Hardox способствует увеличение в них содержание углерода, хрома, никеля, молибдена при наличии бора.

Триботехнические испытания проводились на стандартной Машине трения СМЦ-2 (Рисунок 1, а) на образцах в виде «роликов» (Рисунок 2, а) по схеме «Ролик – абразивный Ролик» (Рисунок 2, б), в соответствии с методикой МНОЦ «BaltTribology».

Таблица 1 – Химический состав исследованных сталей

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	B
Hardox 550	0,37	0,50	1,30	0,020	0,010	1,40	1,40	0,60	0,004
Hardox 500	0,30	0,80	1,60	0,025	0,010	1,00	1,00	0,50	0,005
Hardox 450	0,22	0,48	1,45	0,020	0,007	0,75	0,80	0,32	0,004
09Г2С	0,12	0,65	1,50	0,035	0,040	0,30	0,30	-	-

Измерение микротвёрдости листового металла по методу Виккерса проводили на автоматическом твердомере FUTURE-TECH (Япония), (Рисунок 1, б), в соответствии с требованиями ГОСТ 9450-76 при нагрузке 50 г. Измерения проводились в поверхностном слое листового полуфабриката: на глубине 3 мм. Измерение микротвёрдости на рабочих поверхностях роликов до и после испытания на износ, проводили при нагрузке 500 г.

### Результаты и обсуждение

Результаты испытаний по определению микротвердости (кгс/мм<sup>2</sup>) приведены на рисунке 3 и в таблице 2.

На рисунке 4 представлены значения весового износа образцов (г) после испытаний в течении 2-х часов.

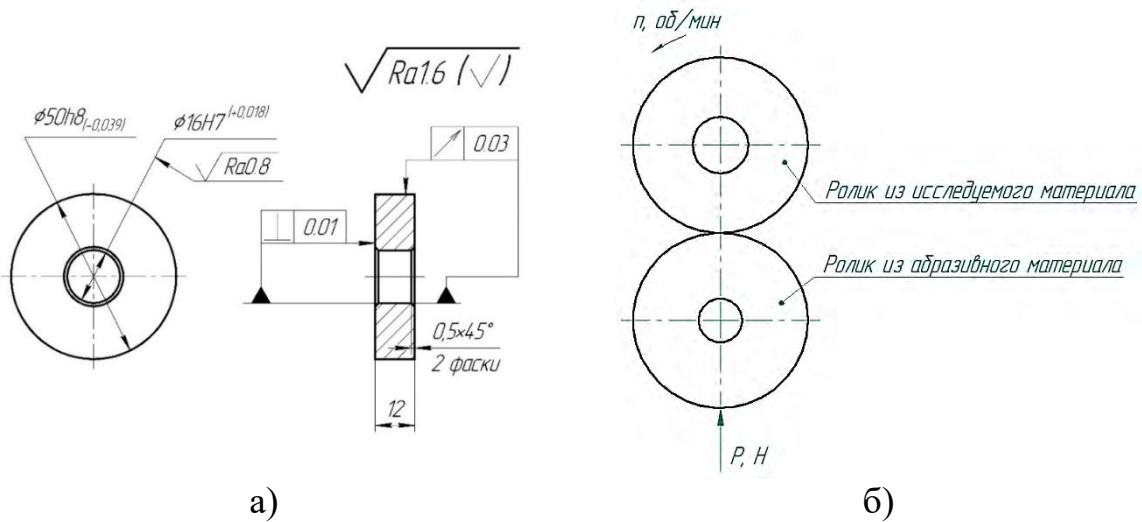


а)



б)

Рисунок 1 – Оборудование для испытания: а) машина трения СМЦ-2; б) автоматический микротвердомер FUTURE-TECH FM-300



а)

б)

Рисунок 2 – Образец для проведения испытаний: а) чертеж; б) схема «Ролик – Ролик»

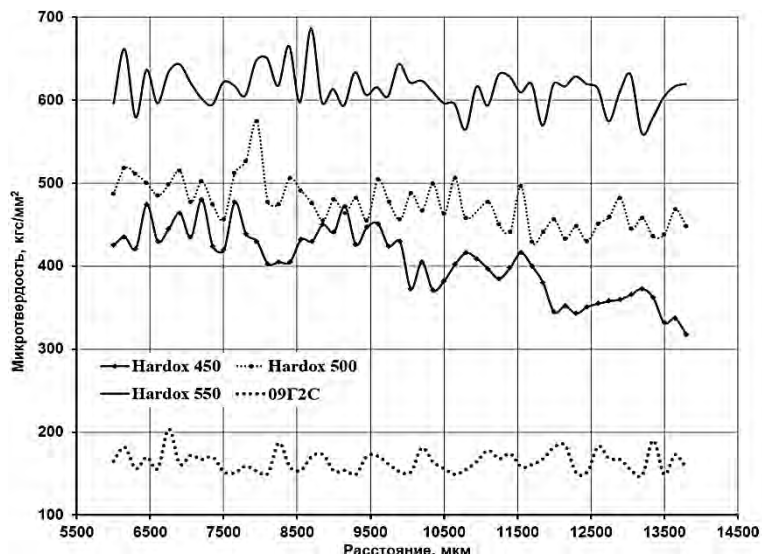


Рисунок. 3 – Микротвердость структуры исследованных образцов в осевом и поверхностном слоях плоской листовой заготовки до испытаний

На рисунке 5 представлены корреляционные зависимости между износом, прочностными, пластическими свойствам и ударной вязкостью, изменением микротвердости до и после испытания сталей в следующей последовательности по мере снижения износостойкости сталей: Hardox 550, Hardox 500, Hardox 450 по сравнению с обычной сталью 09Г2С.

Таблица 2 – Средние значения микротвёрдости образцов до испытаний, HV

№ образца	Поверхность	Середина
<b>1-Hardox 550</b>	614±25	623±22
<b>2-Hardox 500</b>	475±29	539±30
<b>3-Hardox 450</b>	406±41	434±25
<b>4-09Г2С</b>	164±13	174±15

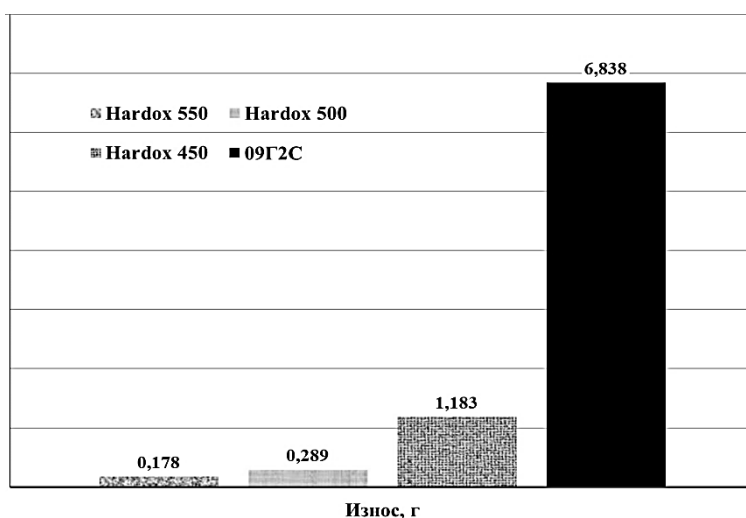


Рисунок 4 – Диаграмма потери веса (абразивного износа) всех исследованных образцов за время испытания

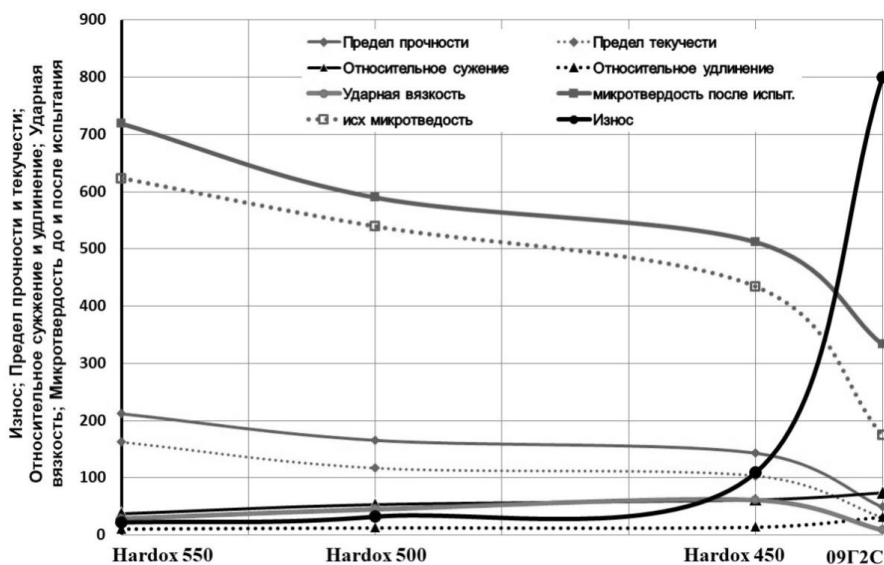


Рисунок. 5 – Корреляционные зависимости износостойкости с микротвердостью и результатами механических испытаний

## Заключение

1. В результате триботехнических испытаний показано, что относительная износостойкость сталей Hardox 550, Hardox 500, Hardox 450 по сравнению с обычной сталью 09Г2С возросла в 38, 24 и 8 раз, соответственно.

2. С понижением относительной износостойкости, уменьшаются прочностные (предел прочности и текучести) и увеличиваются пластические (относительное сужение и удлинение) свойства. Прослеживается корреляция износостойкости с микротвердостью исходной структуры и микротвердостью поверхности трения образцов (роликов) после испытания.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Meng Y., Xu J., Prakash B., Hu Y., Jin Z. A review of recent advantages in tribology. *Friction*, 2020. Т. 8. № 2. с. 221-300.

2. Skotnikova, M.A., Ivanov, E.K., Ivanova, G.V., Syundyukov, I.S., Ryabikin, A.Y. Comparative Studies of Motor Oils on Upgraded Friction Machine // *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, 2022, стр. 59–69. DOI: 10.1007/978-3-030-91553-7\_7

3. Skotnikova, M.A., Breki, A.D., Evsinc, M.G., Kalinind, V.Y., Wasilewski, M.R. Influence of the Concentration and Particle Size of Rock Powders on the Anti-Wear Properties of Oils // *AIP Conference Proceedings*, 2021, 2340, 060005.

4. Syundyukov, I.S., Ivanov, E.K., Skotnikova, M.A., Medvedeva, V.V., Krylov, N.A. Tribotechnical diagnostics of an internal combustion engine according to the condition of the oil // *Key Engineering Materials*, 2019, 822, с. 649–655.

5. Стрельникова С.С. Тенденции развития методов трибологических исследований. В сборнике: *Трибология - машиностроению. Труды XIII Международной научно-технической конференции*, 2020. с. 281-286.

6. М.В. Харченко, Р.Р. Дема, С.П. Нефедьев, О.А. Осипова. Универсальный испытательный комплекс по определению триботехнических характеристик смазочных материалов на базе серийной машины трения СМЦ-2. *Технология и технологические машины*, 2017. с. 60-62.

7. Леванов И.Г., Задорожная Е.А., Никитин Д.Н. Модернизация машины трения ИИ5018 для проведения исследований гидродинамических подшипников скольжения. *Материалы 9-й Международной научно-практической конференции / Под ред. А.Н. Евграфова и А.А. Поповича. – СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2020. - с. 207-223.*

М.П. Шишкарев, М.Д. Гавриленко, М.А. Мотько  
Донской государственный технический университет  
Ростов-на-Дону, Россия, aaakot@yandex.ru

## СИНТЕЗ АДАПТИВНОЙ ФРИКЦИОННОЙ МУФТЫ С ПОЛОЖИТЕЛЬНО-ОТРИЦАТЕЛЬНОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ

### Аннотация

Показано, что применение в адаптивной фрикционной муфте управляющего устройства положительно-отрицательной обратной связи, функционирующей в режиме разделения работы ее компонент по времени, позволяет значительно повысить номинальную нагрузочную способность при настройке муфты по минимальному коэффициенту трения.

*Ключевые слова:* адаптивная фрикционная муфта, положительно-отрицательная, обратная связь, синтез, коэффициент трения, коэффициент усиления.

### Введение

Положительная обратная связь пока не находит широкого применения в конструкциях адаптивных фрикционных муфт вследствие технической сложности при реализации [1, 2]. Отрицательная одноконтурная обратная связь на данном этапе развития и совершенствования АФМ не позволяет существенно повысить точность срабатывания, кроме того, ее действие сопровождается снижением номинальной нагрузочной способности [3, 4].

### Методы

Для достижения поставленной цели использовали метод математического моделирования нагрузочной способности адаптивной фрикционной муфты с положительно-отрицательной обратной связью.

Рассмотрим принципиальную схему адаптивной фрикционной муфты со смешанной – положительно-отрицательной обратной связью (рисунок). Полумуфты 1 и 2 связаны между собой фрикционной группой, состоящей из дисков трения 3 и 4. Диски 3 связаны с барабаном полумуфты 2, диски 4 – со ступицей нажимного диска 5, который установлен на втулке 6 и связан с ней в окружном направлении при помощи шпонки 7. Слева (по рис. 1, а) фрикционная группа и втулка 6 опираются на упорный диск 8 с помощью упорных подшипников.

Нажимное управляющее устройство (управляющее устройство положительной обратной связи) состоит из тел качения 9, которые размещены в гнездах со скошенными боковыми стенками, выполненных в нажимном диске 5 и опорном диске 10, связанном со ступицей полумуфты 1 при помощи направляющей шпонки 11 (рисунок, б). Опорный диск поджат пружиной 12 в направлении нажимного диска 5.

Отжимное управляющее устройство отрицательной обратной связи состоит из тел качения 13, размещенных с зазором в гнездах со скошенными боковыми стенками, выполненных во втулке 6 и опорном диске 10 (рисунок, в).

Настройка муфты, т. е. регулирование силы натяжения пружины 12, осуществляется таким образом, что при настроенном (номинальном) значении вращающего момента муфты дополнительная осевая деформация пружины (под

действием распорной силы на тела качения 9 во время работы) отсутствовала. Поскольку настройка муфты производится с учетом минимального коэффициента трения  $f_{\min}$  [5, 6], значение номинального (настроечного) вращающего момента муфты равно:

$$T_n = z(F_n + F_{\text{тр}})R_{\text{ср}}f_{\min}, \quad (1)$$

где  $z$  – число пар трения фрикционной группы;

$F_n$  – сила натяжения пружины 12;

$F_{\text{тр}}$  – сила трения между опорным диском 10 и направляющей шпонкой 11;

$R_{\text{ср}}$  – средний радиус поверхностей трения фрикционных пар.

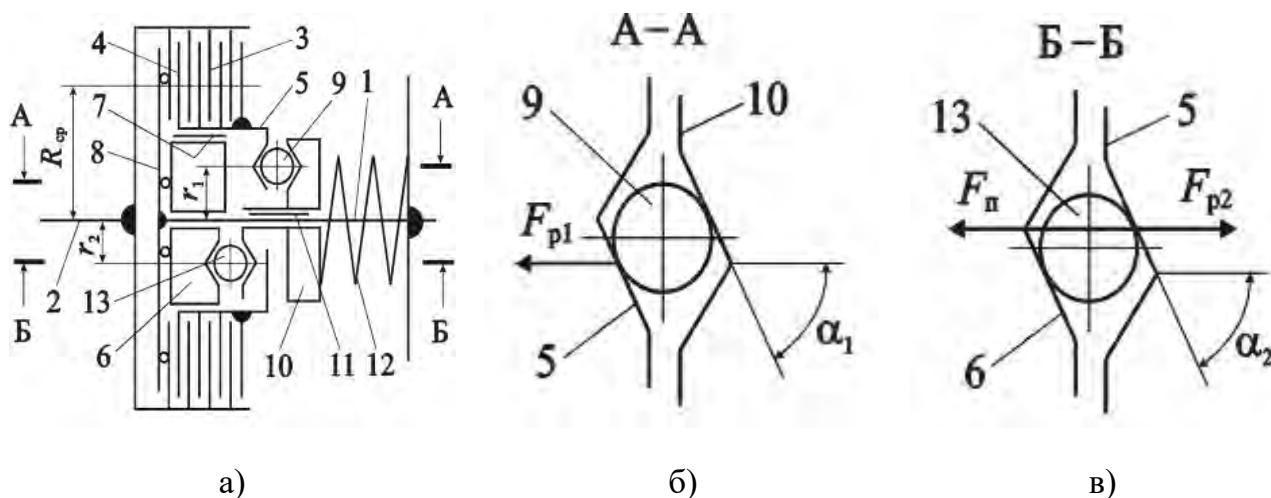


Рисунок 1 – Принципиальная схема АФМ с положительно-отрицательной связью

Поставим дополнительное условие, которое заключается в том, что значение распорной силы  $F_{p1}$  между телами качения 9 и нажимным диском 5 при передаче муфтой вращающего момента  $T_n$  равно значению силы натяжения  $F_n$  пружины 12 и силы трения  $F_{\text{тр}}$  между опорным диском 10 и направляющей шпонкой 11.

На основании поставленного условия запишем:

$$F_{p1} = F_n + F_{\text{тр}}, \quad (2)$$

Значение распорной силы  $F_{p1}$  вычисляется по следующей формуле:

$$F_{p1} = \frac{T_n}{r_1} \operatorname{tg} \alpha_1, \quad (3)$$

где  $\alpha_1$  – угол скоса боковой стенки гнезда под тело качения 9;

$r_1$  – радиус окружности, на которой расположены тела качения 9.

Значение силы трения  $F_{\text{тр}}$  определяется по следующей формуле:

$$F_{\text{тр}} = \frac{2T_{\text{н}}}{d} f_1, \quad (4)$$

где  $f_1$  – коэффициент трения между опорным диском 9 и направляющей шпонкой 11;  $d$  – диаметр посадочной поверхности ступицы полумуфты 1.

Подставляя правую часть формулы (4) в равенство (1) и решая составленное уравнение относительно неизвестного  $T_{\text{н}}$ , получаем:

$$T_{\text{мин}} = T_{\text{н}} = zF_{\text{п}}R_{\text{ср}} \frac{f_{\text{мин}}}{1 - 2zR_{\text{ср}}f_{\text{мин}}f_1/d}. \quad (5)$$

Используя формулы (3), (4) и (5) в равенстве (2), находим:

$$C_1 = \frac{1}{zf_{\text{мин}}}. \quad (6)$$

В формуле (6) параметр  $C_1$  представляет собой коэффициент усиления (КУ) положительной обратной связи [7]:

$$C_1 = \frac{R_{\text{ср}}}{r_1} \text{tg}\alpha_1, \quad (7)$$

При увеличении коэффициента трения и наступлении перегрузки возрастает распорная сила  $F_{\text{р1}}$  [8], в результате чего нарушается осевое равновесие опорного диска 10 и происходит поворот нажимного диска 5 и втулки 6 относительно полумуфты 1. После того как будут выбраны зазоры между телами качения 13 и боковыми стенками соответствующих гнезд (это достигается благодаря тому, что тела качения 9 и 13 расположены на окружностях с различными радиусами), на телах качения 13 возникает распорная сила  $F_{\text{р2}}$ , которая стремится отжать вправо (по рис. 1, а) опорный диск 10, уменьшая при этом силу действия пружины 12 на фрикционную группу.

Движение опорного диска 10 при этом прекращается и значение вращающего момента, который будет передавать муфта, вычисляется по следующей формуле:

$$T_i = zR_{\text{ср}}f_i(F_{\text{п}} + cx - F_{\text{pi}}), \quad (8)$$

где  $f_i$  – текущее значение коэффициента трения;

$c$  – осевая жесткость пружины 12;

$x$  – дополнительная осадка пружины 12 под действием нажимного устройства положительной обратной связи;

$F_{\text{pi}}$  – текущая распорная сила отжимного УУ.

Заменяя хордой дугу окружного зазора между телами качения 13 и боковыми стенками гнезд (это вполне допустимо при небольших величинах зазора), находим



величину окружного перемещения нажимного диска 5 в точке его контакта с телом качения 9:

$$t = \frac{r_1}{r_2} y, \quad 9)$$

и соответствующее ему осевое перемещение опорного диска 10:

$$x = \frac{r_1 y}{r_2 \operatorname{tg} \alpha_1} \left( 1 + \frac{r_1 \operatorname{tg} \alpha_2}{r_2 \operatorname{tg} \alpha_1} \right), \quad 10)$$

где  $y$  – удвоенная величина окружного зазора между телом качения 13 и боковой стенкой гнезда;

$r_2$  – радиус окружности, на которой расположены тела качения 13.

В последней формуле учтено увеличение окружного зазора между телом качения 13 и боковой стенкой гнезда в результате осевого перемещения опорного диска 10.

Таким образом, значение дополнительной осадки пружины 12 прямо пропорционально величине зазора  $y$ , и увеличение силы натяжения пружины, равное  $sx$ , зависит от упомянутого зазора.

### **Обсуждение и результаты**

Результаты исследования показали, что применение в адаптивной фрикционной муфте положительно-отрицательной обратной связи, функционирующей в режиме разделения работы ее компонент по времени, позволяет значительно повысить номинальную нагрузочную способность при настройке муфты по минимальному коэффициенту трения.

Результаты исследования могут быть использованы при расчетах и проектировании адаптивной фрикционной муфты с положительно-отрицательной обратной связью, компоненты обратной связи которой работают в режиме разделения по времени.

### **Заключение**

Применение в адаптивной фрикционной муфте положительно-отрицательной обратной связи, функционирующей в режиме разделения работы ее компонент по времени, позволяет значительно повысить номинальную нагрузочную способность при настройке муфты по минимальному коэффициенту трения.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Шишкарев, М.П. Улучшение эксплуатационных показателей адаптивных фрикционных муфт / ГОУ Рост. гос. акад. с-х. машиностроения, Ростов н/Д, 2008. - 148 с.
2. Шишкарев, М.П., Гавриленко, М.Д. Определение величины коэффициента усиления адаптивных фрикционных муфт с положительной обратной связью // Известия ОрелГТУ, серия «Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии», 2011. - № 6-3 (290), ноябрь-декабрь. - С. 123-127.
3. Фокин, А.Е., Гавриленко, М.Д., Шишкарев, М.П. Исследование адаптивной фрикционной муфты с дифференцированными парами трения // Вестн. ДГТУ. - 2011.

- Т. 11. - № 1 (52). - С. 49-56.

4. Шишкарев, М.П. Оптимальный способ настройки предохранительных фрикционных муфт // Вестн. машиностроения. - 2006. - № 3. - С. 16-19.

5. Шишкарев, М.П. Аналитическое обоснование оптимального способа настройки предохранительных фрикционных муфт // Вестник машиностроения. - 2009. - № 9. - С. 3-6.

6. Шишкарев, М.П. Оптимизация коэффициента усиления адаптивных фрикционных муфт первого поколения с дифференцированными парами трения // Тракторы и сельхозмашины. - 2010. - № 4. - С. 36-39.

7. Шишкарев, М.П. Оптимизация величины коэффициента усиления адаптивных фрикционных муфт // Вестн. машиностроения. - 2003. - № 6. - С. 30-31.

8 Шишкарев, М.П. Анализ переходного периода адаптивных фрикционных контактов в условиях положительного прироста коэффициента трения // Изв. вузов. Машиностроение. - 2000. - № 3. - С. 14-17.

Е.О. Куома, Э.Г. Мохсени, А.М. Тупиков, М.А. Скотникова  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Санкт-Петербург, Россия, [skotnikova@mail.ru](mailto:skotnikova@mail.ru)

## ЭКСПЕРТИЗА РАБОТОСПОСОБНОСТИ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ МЕХАНИЗМОВ ПЕРФОРАТОРА МАКИТА

### Аннотация

В перфораторе фирмы «Makita6270 DWPE» модели HR3000C с *гарантийным сроком 2 года, заклинило двигатель*. Проведены сравнительные испытания перфоратора в неисправном состоянии и нового той же модели в штатных условиях эксплуатации (при шести режимах удара). Показано, что по причине длительной безостановочной работы перфоратора с чрезмерным усилием на инструмент в режиме удара и перегрева инструмента, произошло разрушение элементов, служащих для предохранения от разрушения кривошипно-шатунного и ударного механизмов и увеличения срока службы перфоратора Makita.

*Ключевые слова:* перфоратор, эксплуатация, дефект вследствие износа, устранимый дефект.

### Введение

В процессе эксплуатации перфораторов [1-4], их детали постепенно теряют работоспособность. Перфоратор в неисправном состоянии имеет дефекты, связанные с нарушением работы ударного механизма производственного [5-6] или эксплуатационного [7-8] характера, возникших в результате нарушения правил эксплуатации, интенсивного использования изделия, либо из-за естественного износа.



Рисунок 1 –Перфоратор "Makita"

Ударный механизм перфоратора «Makita6270 DWPE», рисунок 1, состоит из возвратно-поступательного устройства, приводящего в движение поршень, который сжимает столб воздуха и ускоряет металлический снаряд, называемый ударником, что приводит к удару о другой компонент, наковальню. Удар создает волну напряжения, которая проходит через наковальню, по длине сверла и в бетонную заготовку, вызывая разрушение бетона.

### Методы

На экспертизу был представлен перфоратор в неисправном состоянии фирмы Makita модели HR3000C (серийный номер 160829E), а также новый перфоратор той же модели (серийный номер 255120E) для проведения сравнительных испытаний в штатных условиях эксплуатации (при шести режимах удара).

В рамках экспертизы был разработан и создан испытательный стенд, представляющий собой стойку с приваренными фиксаторами, обеспечивающими вертикальное расположение перфоратора (Рисунок 2). Время проведения каждого испытания составляло 5 секунд, с максимальной энергией 1 удара 5,3 Дж. Отсчёт времени работы перфоратора производили секундомером.



а)



б)

Рисунок 2 – Перфоратор в исправном состоянии: а) без нагрузки; б) под нагрузкой 7 кг

Проведение сравнительных испытаний двух перфораторов в исправном и неисправном состояниях на стенде в штатных условиях эксплуатации проводили при шести режимах удара, при положениях регулятора удара № 1, 2, 3, 4, 5, 6, соответствующих скоростям вращения, суммарному количеству ударов, суммарной энергии удара за 5 секунд работы каждого перфоратора и представленных в таблице 1.

Из листового мало прочного алюминиевого материала из сплава Д16 были приготовлены тест – образцы круглой и прямоугольной формы.

Оценка размера отпечатков производилась при помощи микровизора отраженного света  $\mu$ Vizo-MET. Суммарная энергии удара за 5 сек. работы перфоратора оценивалась по величине внедрения инструмента - пирамидального долота в алюминиевую пластину за пять секунд работы перфоратора.

Таблица 1 – Штатные условия эксплуатации перфоратора

№ положений регулятора удара	1	2	3	4	5	6
Количество ударов в мин, уд/мин	1650	1800	2250	2700	3150	3300
Количество ударов в секунду, уд/сек	27,5	30,0	37,5	45,0	52,5	55,0
Число ударов за 5 секунд	137,5	150,0	187,5	225,0	262,5	275,0
Суммарная энергия удара за 5 секунд работы перфоратора, Дж	728,8	795,0	993,8	1192,5	1391,3	1457,5

### Результаты и обсуждение

Проводились сравнительные испытания двух перфораторов в исправном и неисправном состояниях на стендах в штатных условиях эксплуатации (при шести режимах удара).

В качестве критерия оценки ударного воздействия был выбран размер (диагональ) отпечатка, оставляемого в мало прочном алюминиевом материале пирамидальным долотом (штатным инструментом). Размер диагонали получаемого отпечатка (рисунок 3) оказался пропорциональным глубине проникновения пирамидального долота и являлся характеристикой работы ударного механизма.

Эксперимент проходил в режиме «только ударного действия» в двух состояниях: без осевой нагрузки (под действием собственного веса перфоратора 4,8 кг, рис. 4) и с осевой нагрузкой в размере 7 кг (рисунок 3).

На основании полученных данных были построены графики изменения размера отпечатка от внедрения пирамидального долота в алюминиевую пластину в зависимости от положения регулятора удара (рисунок 4).

### Заключение

В результате сравнительных испытаний перфораторов в исправном и неисправном состояниях, можно сделать следующие выводы:

1. При одном и том же режиме испытания, перфоратор в неисправном состоянии оставляет отпечатки в 1,4 раза меньшие по сравнению со штатным, что свидетельствует о нарушении работы ударного механизма перфоратора (серийный номер 160829E). Вероятно, произошло разрушение элементов, служащих для предохранения от разрушения кривошипно-шатунного и ударного механизмов перфоратора Makita.

2. Несмотря на уменьшение размеров отпечатков (особенно при высоких скоростях удара), общая зависимость от режимов удара сохраняет линейный характер, что свидетельствует об общей причине снижения эффективности работы ударного механизма.

3. Для установления природы дефекта работы ударного механизма перфоратора необходимо вскрыть перфоратор и провести осмотр состояния деталей.




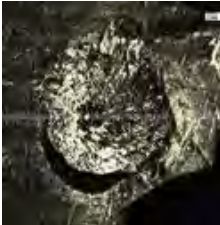




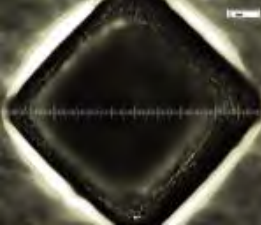

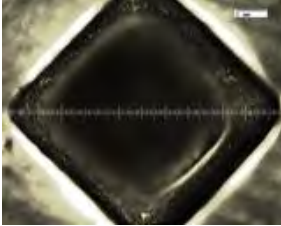
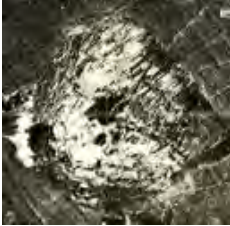
№ положений регулятора удара	Количество ударов в мин, уд/мин	Новый перфоратор в исправном состояниях x 1,3	Перфоратор в неисправном состояниях x 5
1	1650		
2	1800		
3	2250		
4	2700		
5	3150		
6	3300		

Рисунок 3 – Отпечатки пирамидального долота после ударов поршня по бойку перфоратора в исправном и неисправном состоянии за 5 секунд при различных положениях регулятора удара под нагрузкой 7 кг

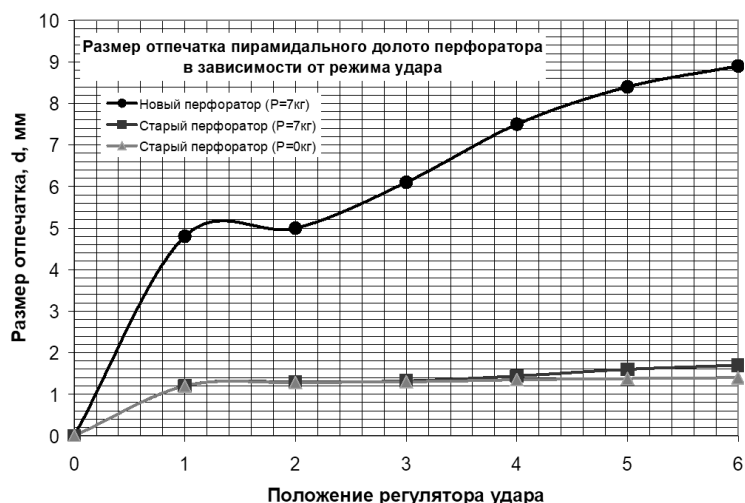


Рисунок 4 – Изменение размера отпечатка от внедрения пирамидального долота перфоратора в алюминиевую пластину в зависимости от положения регулятора удара

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. «Основные неисправности инструмента (гарантийные и не гарантийные случаи)». - Москва, 2006.
2. «Электронный перфоратор Makita. Инструкция по эксплуатации». – Москва, 2006.
3. «Бурильный молоток для вращательного бурения. Модели MakitaHR3000C. Руководство по эксплуатации». Makita Corporation Anjo, Aichi, Japan.
4. [http://www.baltoptorg.ru/makita\\_parts/727/](http://www.baltoptorg.ru/makita_parts/727/).
5. <http://www.stroysila.by/info/vse-o-perforatorakh-kak-vybrat-perforator-na-cto-obratit-vnimanie>.
6. Закон Российской Федерации от 07.02.1992 N 2300-1 «О защите прав потребителей».
7. «Трение, износ и смазка (трибология и триботехника)» / под общ. ред. А.В. Чичинадзе. - М.: Машиностроение, 2003. - 576 с.
8. ГОСТ 27674 «Трение, изнашивание и смазка»

Д.В. Зимин, А.Д. Бреки  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Санкт-Петербург, Россия, [tkvaug@mail.ru](mailto:tkvaug@mail.ru)

## ПРОБЛЕМЫ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПЛАСТИЧНЫХ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ ТРИБОТЕХНИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ИХ БИОПОВРЕЖДЕНИЙ

### Аннотация

В современном мире машины, как транспортные, так и технологические, играют важную роль. Работоспособность машин во многом зависит от степени износа пар трения. Для уменьшения износа узлов трения используются пластичные смазочные материалы, на которые может оказываться биологическое воздействие. В статье рассмотрены нежелательные процессы, которые могут возникнуть при таком воздействии, и сделан вывод о необходимости проведения исследований в данной области.

*Ключевые слова:* пластичный смазочный материал, биоповреждение, микроорганизмы, окисление.

### Введение

В машинах и механизмах имеются пары трения. Для снижения их износа используются пластичные смазочные материалы (ПСМ) – вид смазочных материалов, представляющий собой коллоидную систему, состоящую из дисперсной среды (базовое масло), дисперсной фазы (загустителя) и наполнителя. Основными задачами ПСМ являются снижение трения и отведение тепла от места контакта трущихся поверхностей. Состав ПСМ приведён на диаграмме (рисунок 1).

### ПЛАСТИЧНЫЙ СМАЗОЧНЫЙ МАТЕРИАЛ



Рисунок 1 – Состав пластичного смазочного материала



Дисперсная среда (масло) – основной компонент ПСМ (70–90 %). Большинство ПСМ изготовлены на минеральных маслах. Синтетические масла применяются в смазках с широким диапазоном рабочих температур.

Дисперсная фаза (загуститель) – это вещество, создающее в смазке пространственный скелет и коллоидную структуру. В масло он добавляется в количестве 5–25 %. Чаще всего в качестве загустителя применяются мыла. Твёрдые углеводороды и воски обладают относительно слабой загущающей способностью, и для более сильного загущения их приходится добавлять в масло в значительном количестве (20–30 %).

Наполнители бывают активными и неактивными. Активные наполнители – это вещества, вводимые в ПСМ и принимающие активное участие в процессе смазывания. Неактивные наполнители (утяжелители), в свою очередь, не принимают активного участия в процессе смазывания. В качестве активных наполнителей применяются твёрдые смазочные материалы в виде порошков, например, графит, дисульфид молибдена, дисульфид вольфрама.

Остановимся подробнее на структуре ПСМ. Загуститель, введённый в масло, образует с ним пространственный скелет. В ячейках сетки этого скелета закреплено масло (как мёд в сотах). Действие касательных сил при трении приводит к разрушению скелета загустителя, что вызывает пластические деформации и течение смазки. А в состоянии покоя происходит постепенное восстановление структуры, разрушенной под действием механических сил [1].

Проблема биоповреждений горюче-смазочных материалов существовала всегда и осталась актуальна в наши дни. Наличие даже небольшого количества воды, минеральных загрязнений и благоприятной температуры даёт возможность развиваться различным группам микроорганизмов [2]. Составляющие смазочных масел могут быть пищей для них. В итоге деятельность микроорганизмов ведёт не только к разложению масел, но и к повреждению контактирующих с ними материалов и конструкций [3].

Особенности и закономерности воздействия биофактора изучены гораздо меньше, чем влияние небиологических факторов, таких как температура, механические напряжения и агрессивные среды [4]. Биоповреждениям подвержены не только смазочные масла и топлива, но и пластичные смазочные материалы (ПСМ). А поскольку от качества ПСМ зависит надёжность работы различных машин и механизмов, то необходимо проведение исследования влияния микроорганизмов на триботехнические свойства ПСМ [2].

Биологическое повреждение (биоповреждение) объекта – особый вид разрушения материалов и конструкций под влиянием микроорганизмов, нарушающих работоспособное состояние техники. Изучение биологической стойкости смазочных материалов и механизма воздействия микроорганизмов на них является актуальной задачей трибологии.

Согласно исследованию [5], масла не являются грибостойкими и требуют улучшения. ПСМ состоят на 70–90 % из масла [1], что указывает на отсутствие грибостойкости и у них.

Механизм микробиологического повреждения можно представить в виде шести стадий [6]:

1. Перенос микроорганизмов из воздуха, воды или почвы на поверхность материала.

2. Поглощение микроорганизмов и загрязнений поверхностями материалов. Этот процесс определяется активностью микроорганизмов, а также температурой и относительной влажностью воздуха.

3. Рост микроколоний до видимых невооруженным глазом. Процесс сопровождается появлением коррозионно-активных метаболитических продуктов.

4. Воздействие продуктов метаболизма, образующихся в результате жизнедеятельности колоний микроорганизмов, на материал (кислотное, щелочное и ферментативное).

5. Стимулирование коррозионного разрушения металлов, при котором происходит разрушение защитных пассивных пленок на металлах.

6. Синергизм биоповреждений. Взаимосвязи между микроорганизмами могут существенно влиять на процесс повреждения материала. Жизнедеятельность одних групп микроорганизмов может создавать условия для выживания и адаптации других видов. Так, известны случаи разрушения сооружений в результате синергического эффекта, вызванного последовательным действием ацидофильных и ацидофобных тионовых бактерий; обнаружение роста грибов одного вида на погибающих колониях других грибов и др.

### **Обсуждение**

Авторами отмечается [7], что все моторные, дизельные, веретенные, авиационные, почти все трансмиссионные и изоляционные масла и пластичные смазки неустойчивы к грибам и бактериям.

При воздействии микроорганизмов на смазочные материалы в последних возникает ряд проблем:

1. Использование микроорганизмами масел в качестве источника питания (за счёт способности ферментативного окисления жидких углеводов), а также выделение агрессивных продуктов жизнедеятельности (органических кислот, аминокислот), приводящее к разложению и потере рабочих свойств материала [7].

2. После нанесения ПСМ на металлическую поверхность узла трения происходит процесс «обезмасливания», в результате чего увеличивается концентрация дисперсной фазы и смазка уплотняется. В процессе эксплуатации суммарная скорость потери дисперсной среды (в результате растекания, испарения и окисления) мыльными смазками в отдельных случаях может достигать 1,5 % в год. Например, вязкость пластичной смазки ЦИАТИМ 201 при потере 15 % масла возрастает на 30–40 %, при потере 20 % масла – на 80–100 % [8].

3. Существенные изменения значений свойств масел и смазок. Микроорганизмы уменьшают несущую способность смазочного слоя и тем самым способствуют увеличению трения, износа и биокоррозии пар трения.

4. Окисление компонентов ПСМ, инициируемое контактирующими со смазкой металлами и кислородом воздуха, приводит к появлению дополнительного количества поверхностно-активных веществ (кетонов, альдегидов, кислот и др.), которые отрицательно воздействуют на устойчивость коллоидной системы смазки [8]. Это способствует возникновению коррозии узлов и деталей, контактирующих с поврежденными смазочными материалами [7].

### **Заключение**

Для снижения износа пар трения машин используются пластичные смазочные материалы (ПСМ). В рамках данной статьи рассмотрены состав и структура ПСМ, а

также механизм их микробиологического повреждения. На основании проанализированной информации установлено, что существует проблема снижения эффективности смазочных композиций под влиянием микроорганизмов. Данный вопрос почти не изучен, исследований на эту тему крайне мало с точки зрения трибологии. В связи с этим целесообразно проведение исследований по выявлению закономерностей трения и изнашивания в смазочных средах с микроорганизмами, которые позволят получить, с одной стороны, фундаментальные результаты для науки, а с другой – важные практические рекомендации для реальной техники.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хебда М., Чичинадзе А.В. Справочник по триботехнике. Том 2. Смазочные материалы, техника, смазки, опоры скольжения и качения. - М.: Машиностроение, 1990. - 416 с.
2. Влияние микроскопических грибов *Aspergillus niger* на триботехнические свойства пластичного смазочного материала марки «ЛИТА» / Н.Е. Стариков, А.Д. Бреки, С.А. Семенов, А.Е. Гвоздев, А.В. Лаврушин // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2018. Вып. 7. С. 108-117.
3. Биоповреждение смазочных масел в условиях хранения / В.М. Фарзалиев, Э.Р. Бабаев, К.И. Алиева, О.Ю. Полетаева, Э.М. Мовсумзаде, Г.Ю. Колчина // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья, №3, 2016. С. 24-28.
4. Системное биоповреждение авиационной техники / Т.В. Добрынина, Я.В. Иванов // Современные технологии обеспечения гражданской обороны и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций, 2015. С. 194-196.
5. Оценка грибостойкости смазочных материалов, применяемых для защиты изделий машиностроения / А.В. Лаврушин, Н.Е. Стариков, С.А. Семенов, О.А. Жданова, И.С. Науменко // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2019. Вып. 9. С. 307-314.
6. Особенности оценки биоповреждений и биокоррозии материалов в природных средах / Варченко Е.А. // Научный журнал КубГАУ, № 104 (10), 2014. С. 1-18.
7. Биоразрушения материалов и изделий техники / С.А. Семенов, К.З. Гумаргалиева, И.Г. Калинина, Г.Е. Заиков // Вестник МИТХТ. Эколого-экономические проблемы химических технологий, 2007, т. 2, № 6. С. 3-26.
8. Влияние изменения свойств пластичной смазки при хранении в таре и в изделии на надежность работы узлов трения / С.И. Крахмалёв, В.М. Школьников, Р.Г. Платонова // Химия и технология топлив и масел, 2010, № 5. С. 25-30.

Эмад Мохсени, Г.В Цветкова  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Санкт-Петербург, Россия, [tsvetkova\\_gv@mail.ru](mailto:tsvetkova_gv@mail.ru)

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА МИКРОТВЕРДОСТИ ПОСЛЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ТИТАНОВОГО СПЛАВА

### Аннотация

Изучение и контроль свойств поверхности заготовок после механической обработки является важным требованием в промышленности вследствие их существенного влияния на срок службы деталей машин. Титановые сплавы широко используются в машиностроении из-за их превосходных свойств. Поэтому в настоящем исследовании были проведены исследования по влиянию механической обработки на свойства поверхности сплава Ti-6Al-4V. Изучалось влияние условий эксперимента на микротвердость. Результаты показали, что скорость резания является преобладающим параметром для повышения микротвердости поверхности.

*Ключевые слова:* титановые сплавы, микротвердость, микроструктура, механические свойства.

### Введение

Исключительные свойства титанового сплава Ti-6Al-4V (отечественный аналог ВТ-6) обусловили его широкоприменение в военной и автомобильной промышленности, а также при изготовлении чувствительных деталей реактивных двигателей. Подходящая ударная вязкость, сохранение твердости при высоких термических нагрузках, стойкость к износу и коррозии – ряд свойств этого материала [1]. Несмотря на указанные свойства, из-за наличия в сплаве Ti-6Al-4V твердой фазы возникают многочисленные проблемы при механической обработке этого материала. Из-за чувствительности обрабатываемых деталей и возникновения в процессе эксплуатации больших термомеханических нагрузок обработка в несоответствующих условиях вызывает значительные повреждения, в том числе микротрещины в материале [2, 3]. Поэтому экспериментальные исследования для повышения производительности обработки и повышения качества заготовки имеют большое значение [4]. Физический контакт между инструментом и заготовкой в процессе обработки создает термомеханические нагрузки и, как следствие, интенсивную пластическую деформацию приповерхностного слоя обрабатываемых образцов материала. Эти изменения вызывают предварительное упрочнение и микроструктурные изменения и, тем самым, влияют на эффективность и качество службы деталей. Таким образом, контроль качества обрабатываемой части конечного изделия является ключевым вопросом для правильной эксплуатации [3, 5]. В связи с тем, что в процессе механической обработки заготовка подвергается интенсивной пластической деформации, наклепу, деформационному упрочнению и динамической рекристаллизации, происходят микроструктурные изменения в поверхностных слоях обрабатываемых образцов материала [6]. Кроме того, термические нагрузки, возникающие в зоне резания, из-за низкой теплопроводности сплава, также являются одним из факторов, влияющих на микроструктурные изменения и остаточные напряжения, способные снижать работоспособность заготовок [7, 8]. Исходя из

вышеизложенного, на показатели микротвердости влияют параметры резания. Для улучшения каждого из них необходимо контролировать параметры резки. Далее представлены дополнительные исследования целостности поверхности после механической обработки титановых сплавов.

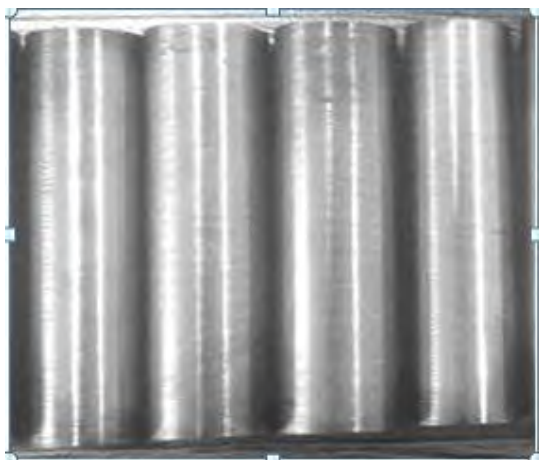
### Методы

Для оценки различных аспектов целостности поверхности после точения жаропрочного сплава Ti-6Al-4V были проведены эксперименты на образцах материала, изготовленных диаметром 100 мм. Эксперименты проводились при различных скоростях подачи, глубины резания и скорости резания, как указано в таблице 1.

Таблица 1 – Условия испытаний для проведения экспериментов по механической обработке

Номер теста	Скорость резки (об/мин)	Глубина резания (мм)	Скорость подачи (мм/об)
Тест 1	300	0,24	0,065
Тест 2	460	0,24	0,065
Тест 3	765	0,24	0,065
Тест 4	1255	0,24	0,065

На рис. 1 показаны станок, заготовки, использованные в этом исследовании. Чтобы исследовать изменения микроструктуры, вызванные токарной операцией, заготовки были вырезаны с помощью проволоочной электроэрозионной обработки, затем отполированы и, наконец, протравлены. После механической обработки образцов для различных условий испытаний были подготовлены образцы для оценки внесенных изменений. Затем с помощью микротвердомера измеряли микротвердость каждого образца и строили графики. После изготовления образцов измеряли изменение микротвердости каждой заготовки на глубине 20-160 мкм от верхнего слоя образцов с шагом 20 мкм. Для измерения микротвердости прикладывалась нагрузка в 3 Н, затем вычислялось значение твердости.



а)



б)

Рисунок 1 – Образцы материала(а) и станок(б)

## Результаты и обсуждение

На рис. 2 показано изменение микротвердости в зависимости от расстояния от поверхности с шагом 20 мкм при различных скоростях резания. Наблюдается, что увеличение скорости резания приводит к повышению твердости поверхностных слоев. Более подробно, с увеличением скорости резания с 460 об/мин до 1255 об/мин микротвердость поверхностных слоев повышается с 3388 до 3706 МПа.

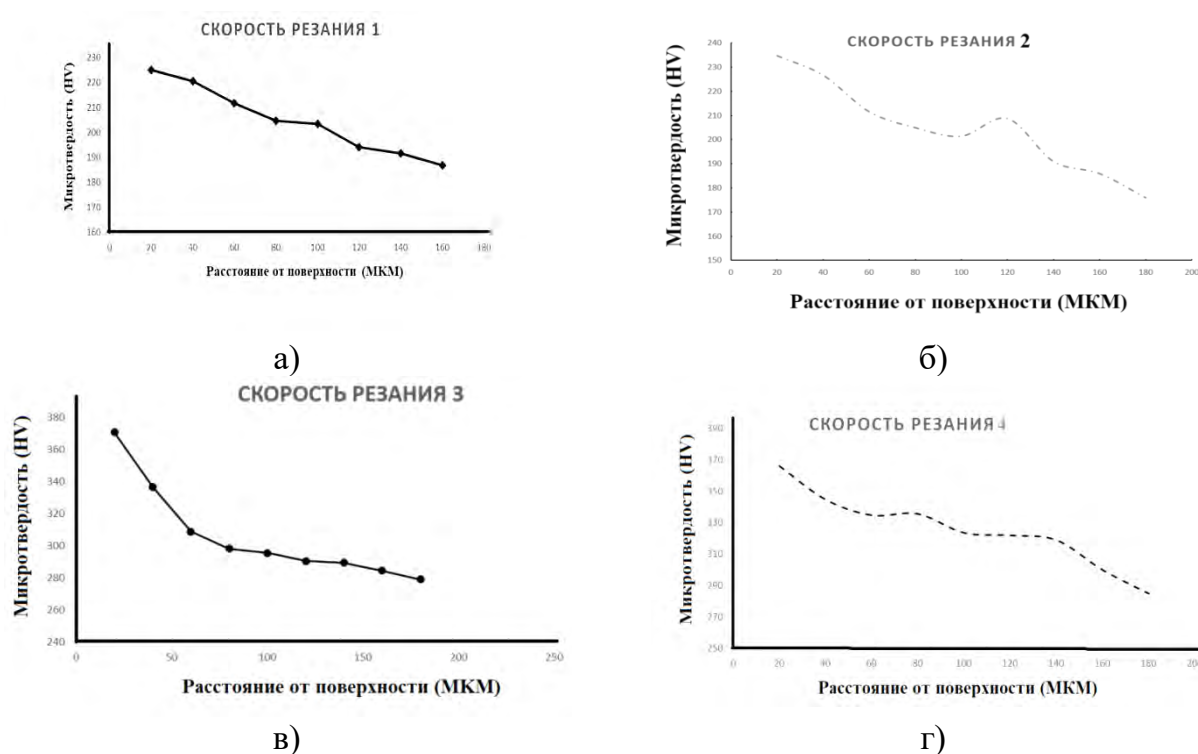


Рисунок 2 – Изменение микротвердости при разных скоростях резания, а – 300 об/мин, б – 460 об/мин, в – 765 об/мин, г – 1255 об/мин

В результатах исследования, проведенного авторами [9], также сообщается об аналогичной тенденции. Можно сказать, что при максимальной скорости резания в поверхностных слоях индуцируется больше механических контактов и, следовательно, более высокие пластические деформации [10].

## Заключение

Растущий спрос на использование титановых сплавов в различных отраслях промышленности побуждает исследователей понимать и оценивать качество и механические свойства этих сплавов, полученных после производственных процессов. Целостность поверхности имеет множество аспектов, в том числе металлургические и механические свойства, а также текстуру поверхности, которые являются наиболее важными параметрами, влияющими на срок службы конечных продуктов. В данной работе было проведено экспериментальное исследование по оценке свойств поверхности после токарной обработки сплава Ti-6Al-4V. В связи с этим сначала были проведены эксперименты при различных скоростях подачи, глубины резания и скорости резания. После этого наиболее характерные свойства поверхности, включая изменения микротвердости, размера зерна, шероховатости и тепловых нагрузок, оценивались при различных условиях эксперимента.

Изменение микротвердости в обработанных приповерхностных слоях оценивали при различных скоростях резания. В результате было получено: при

увеличении скорости резания с 460 до 1255 об/мин микротвердость в поверхностных слоях увеличилась с 3348 МПа до 3706 МПа, происходит упрочнение с поверхности материала.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sartori S., Pezzato L., Dabalà M., Maurizi Enrici T., Mertens A., Ghiotti A. and Bruschi S. Surface Integrity Analysis of Ti6Al4V After Semi-Finishing Turning Under Different Low-Temperature Cooling Strategie, *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol. 27, No.9, (2018), 4810-4818.
2. Farshbaf Zinati R. and Razfar M. R. Multi-objective Constrained Optimization of Turning Process via Modified Harmony Search Algorithm, *Iranian Journal of Science and Technology Transactions of Mechanical Engineering*, Vol. 43, No. 12, (2017), 1-8.
3. Jafarian F. 3D modeling of recrystallized layer depth and residual stress in dry machining of nickel-based alloy, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, Vol. 41, No. 4, (2019), 198.
4. Jafarian F., Ciaran M. I., Arrazola P. J., Filice L., Umbrello D. and Amirabadi H. Effects of the flow stress in finite element simulation of machining Inconel 718 alloy, *Key Engineering Materials*, Vol. 611, No. 2, (2014), 1210-1216.
5. Parida A. K. Analysis of Chip Geometry in Hot Machining of Inconel 718 Alloy, *Iranian Journal of Science and Technology Transactions of Mechanical Engineering*, Vol. 31, No. 5, (2018), 2177-2184.
6. Jafarian F., Masoudi S., Soleimani H. and Umbrello D. Experimental and numerical investigation of thermal loads in Inconel 718 machining, *Materials and Manufacturing Processes*, Vol. 33, No. 9, (2018), 1020-1029.
7. Madyira D. M., Laubscher R. F., Janse van Rensburg, N. and Henning P. F. J. High speed machining induced residual stresses in Grade 5 titanium alloy, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L*, Vol. 227, No. 3, (2013), 208-215.
8. Localization of plastic deformation in HCP-, BCC- and FCC-alloys at indentation. Skotnikova M.A., Popov A.A., Ivanova G.V., Tsvetkova G.V., Padgurskas J. *В сборнике: Materials Today: Proceedings. 2019 International Scientific Conference on Materials Science: Composites, Alloys and Materials Chemistry, MS-CAMC 2019. Amsterdam, 2021. С. 611-618.*
9. Che-Haron C. H., Tool life and surface integrity in turning titanium alloy, *J Mater Process Technol*, Vol. 118, No. 1, (2001), 231-237. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(01\)00926-8](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(01)00926-8).
10. Tabei A., Shih D. S., Garmestani H. and Liang S. Y. Dynamic Recrystallization of Al Alloy 7075 in Turning, *J Manuf Sci Eng*, Vol. 138, No. 7, (2016), 071010. <https://doi.org/10.1115/1.4032807>.

М. Аль-Наджар, Я. Нагхави, Г.В. Цветкова, Г.В. Иванова  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Санкт-Петербург, Россия, [tsvetkova\\_gv@mail.ru](mailto:tsvetkova_gv@mail.ru)

## ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ НАПЛАВОК ДЛЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

### Аннотация

В работе рассматриваются поверхностные свойства материалов, наплавленных на сталь 45 при помощи электродуговой наплавки, для увеличения износостойкости и срока службы деталей, снижения затрат на ремонт изношенного оборудования. В результате исследования получено повышение твердости и износостойкости наплавленных материалов. Было установлено, что наплавленный материал под флюсом ФК-45 оказывает большее влияние на повышение твердости и износостойкости, а материал под флюсом ФЦ-16 целесообразнее использовать для повышения коррозионной стойкости. Была обнаружена связь между твердостью и износостойкостью: увеличение твердости повышает износостойкость для чистых металлов, но для сплавов связь более сложная и неоднозначная.

*Ключевые слова:* сталь 45, электродуговая наплавка, наплавка под флюсом, микротвердость, износостойкость.

### Введение

Развитие машиностроения базируется в первую очередь на создании новых материалов и совершенствовании технологий обработки материалов. Нанесение покрытий поверхностей является важной операцией в современных промышленных областях, поскольку одной из основных проблем является изнашивание и коррозия деталей машин. Покрытие металлической поверхности правильным материалом поможет решить эти проблемы, увеличивая износостойкость и коррозионную стойкость металла, что увеличит срок службы машин и механизмов. Одна из важнейших технологий – нанесение покрытий с помощью наплавки. В результате получаем поверхность детали с новыми нужными нам свойствами [1-3]. В частности, можем рассматривать детали смесителей.

Целью данного исследования является исследование влияния микроструктуры и содержания химических элементов материалов наплавки на их свойства.

### Методы и материалы

Материалы, используемые в исследовании: на основу из стали 45 нанесены наплавочные слои материалов автоматической электродуговой наплавкой с лентой 08КП под флюсом. В процессе ленточной наплавки используются флюсы – стандартный ФЦ-16 и керамический ФК-45, которые дают процессу выполнения наплавки большие преимущества (хорошая производительность процесса, стабильный химический состав, распространения тепла в изделие и рассеивание лишнего тепла в процессе наплавки и др.). В таблице 1 приведен химический состав использованных материалов.

Применялись методы металлографического анализа для изучения микроструктуры образцов с помощью оптического микроскопа Микровизор® μVizo®-МЕТ ЛОМО. Для исследования микротвердости материалов применялся



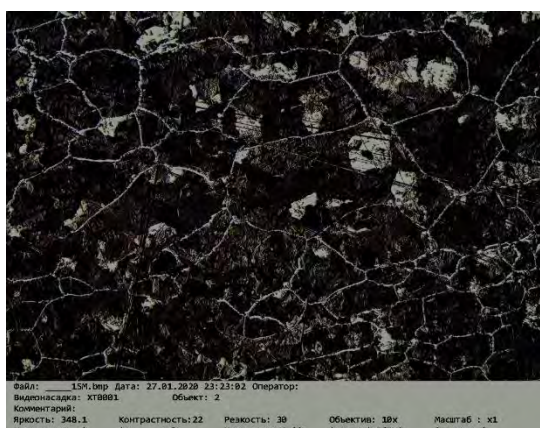
автоматический микротвердомер FM-300с программой Tichomet. Триботехнические испытания проводили на машине трения СМЦ-2.

Таблица 1 –Химический состав материалов

Название	Легирующие элементы, весовые %							
	C	Mn	Si	Cr	Cu	Ni	V	Mo
<b>Сталь 45</b>	0,42-0,5	0,5-0,8	0,17-0,37	0,25	0,25	<b>S</b> 0,04	<b>P</b> 0,035	<b>Fe 97</b>
<b>Наплавка с флюсом ФК-45</b>	0,1	2,89	1,45	2,72	0,19	0,09	-	-
<b>Наплавка с флюсом ФЦ-16</b>	0,1	0,84	0,47	0,11	0,21	0,06	-	-

### Результаты металлографических исследований

На рис.2, б показана микроструктура наплавки под флюсом ФЦ-16. Видна граница между основой из стали и наплавкой, зона наплавления размыта. На рис. 3 представлена микроструктура наплавки под флюсами ФЦ-16(а) и ФК-45(б). Белые стрелки показывают тип фазы материала, первая стрелка - феррит, и вторая стрелка - перлит для наплавки под флюсом ФЦ-16, а для наплавки под флюсом ФК-45 аустенит и мартенсит, соответственно. На рис.4 показана микрофотография наплавки под флюсами ФЦ-16 и ФК-45 со сталью 45 (слева - сталь, справа - наплавка).

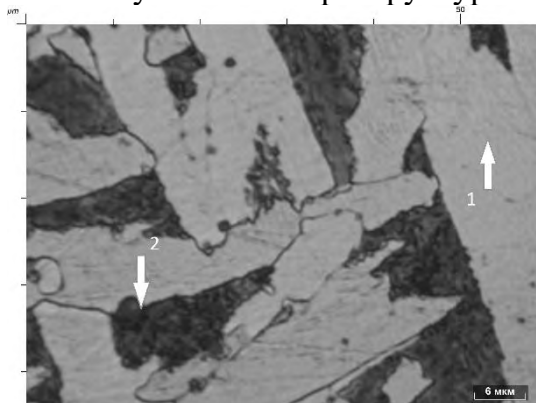


а)

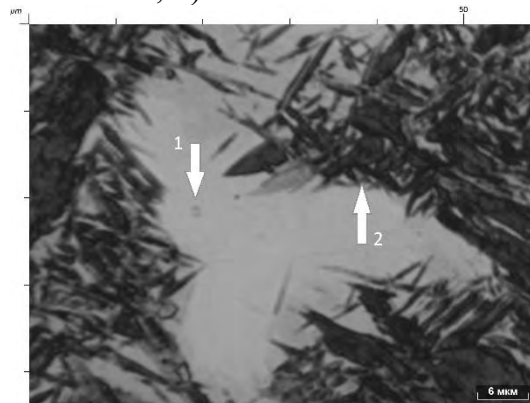


б)

Рисунок 2 –Микроструктура: а) основа-сталь 45, б) сталь с наплавкой



а)



б)

Рисунок 3– Микроструктура наплавки: а) наплавка под флюсом ФЦ-16, б) наплавка под флюсом ФК-45

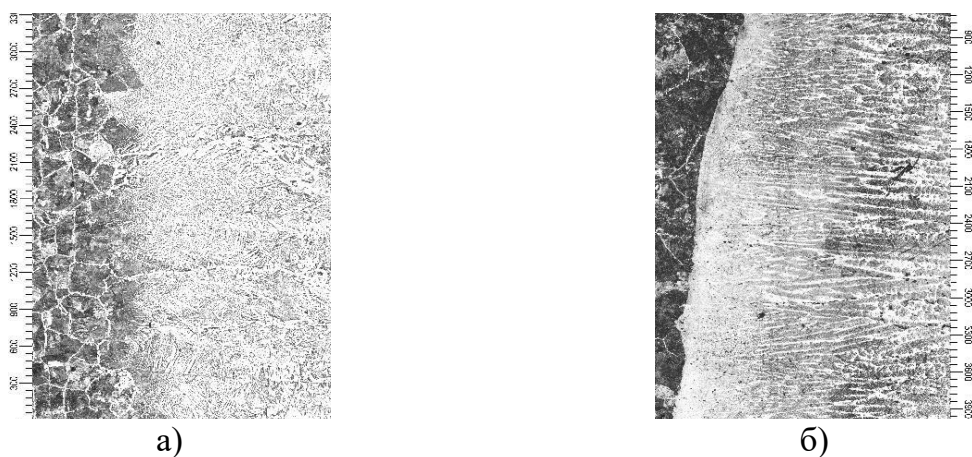


Рисунок 4– Микрофотография наплавки: а) под флюсом ФЦ-16 и основа-сталь 45, б) наплавка ФК-45 и основа-сталь 45

### Результаты измерения микротвердости

В таблице 2 представлены результаты измерения микротвердости, информация об образцах, нагрузке по Виккерсу, шаг между измерениями, примерное количество точек измерений. Измерение микротвердости проводилось в полуавтоматическом режиме.

Таблица 2–Микротвердость материалов

Образцы материалов	Наплавка ФЦ-16	Наплавка ФК-45
Нагрузка (Г)	50	50
Количество точек	24	29
Вид светлой фазы	Феррит	Аустенит
Вид тёмной фазы	Перлит	Мартенсит
Микротвердость стали, МПа	3100	3140
Микротвердость наплавки, МПа	2850	7620

### Результаты триботехнических испытаний

В результате триботехнических испытаний материал с ферритно-перлитной структурой показал его небольшую относительную износостойкость ( $\varepsilon = 3$ ). У наплавки с аустенитно-мартенситной мелкозернистой структурой показатели гораздо выше (относительная износостойкость,  $\varepsilon=7$ ). Относительную износостойкость  $\varepsilon$  определяли как безразмерный показатель, характеризующий отношение абсолютных величин износа по массе двух материалов, один из них сталь 45, это эталон, с относительной износостойкостью  $\varepsilon =1$ , а второй – испытуемый материал наплавки.

При помощи программы Тiхometпостроены графики изменения микротвердости по толщине наплавки, для стали с наплавкой ФЦ-16 (показано на рис.5, а) и стали с наплавкой ФК-45(на рис.5, б).

### Заключение

Таким образом, в результате исследований получено, что материал основы из стали 45 с феррито-перлитной микроструктурой, имеет микротвердость 3100 МПа, ее относительная износостойкость принимается за  $\varepsilon=1$ , т. е. это эталон при триботехнических испытаниях.

Наплавка под флюсом ФЦ-16 имеет феррито-перлитную структуру, среднее значение микротвёрдости равняется 2850МПа, а относительная износостойкость ее равна  $\varepsilon=3$ .

Для наплавки под керамическим флюсом ФК-45 наблюдалась аустенитно-мартенситная структура с микротвердостью 7620МПа и относительной износостойкостью  $\varepsilon=7$ . В исследованиях, проведенных авторами ранее, в наплавке, полученной под флюсом ФК-45, наблюдали повышенное содержание легирующих карбидообразующих элементов – хрома и марганца. Увеличение содержания хрома (от 0,25 до 3,15%), марганца (от 0,65 до 3,27%), по сравнению с исходным состоянием основы - стали 45 [4-8]. Эти факторы способствовали повышению твердости и износостойкости наплавов.

Таким образом, наплавка, полученная под флюсом ФК-45 по исследуемой технологии, рекомендуется для использования при изготовлении деталей машин, работающих в условиях интенсивного изнашивания и ударных нагрузок при повышенных температурах.

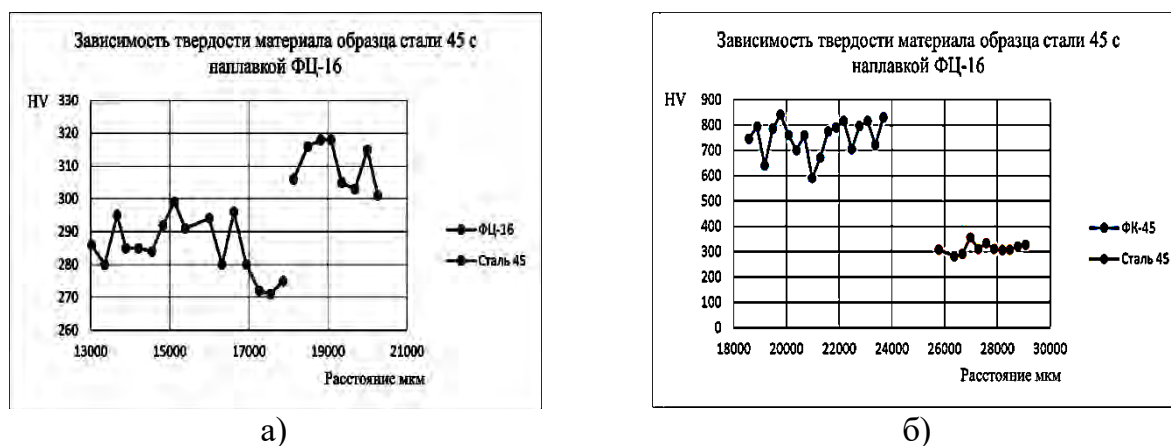


Рисунок. 5 – Графики зависимости микротвердости материалов: а) сталь 45(справа) с наплавкой ФЦ-16(слева), б) сталь 45(справа) с наплавкой ФК-45(слева)

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Защитные покрытия: учеб. пособие / М. Л. Лобанов, Н. И. Кардолина, Н. Г. Россина, А. С. Юровских. - Екатеринбург: Изд-во. ун-та, 2014. - 200 с
2. Лившиц, Л.С., Гринберг, Н.А., Куркумелли, Э.Г. Основы легирования наплавочных металлов. М., Машиностроение, 1969.
3. Гаркунов, Д.Н. Триботехника. - М.: Машиностроение, 1985. - 424 с.
4. Цветкова, Г.В., Скотникова, М.А., Иванова, Г.В., Нагхави, Я., Аль-Наджар, М. Зависимость триботехнических свойств материала наплавов от легирования. // Модели и методы развития технологий машиностроения в условиях цифровизации экономики России: сборник научных трудов под ред. А.А. Поповича. - СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2022. - С.106-110
5. Кулик, Е.А., Фернандо, А.Д., Иванова, Г.В., Цветкова, Г.В. Исследование триботехнических свойств поверхностного слоя биметаллов. В книге: Неделя науки СПбПУ. Материалы научной конференции с международным участием. В 2-х частях. 2020. С. 146-148.
6. Tsvetkova, G., Skotnikova, M. Engineering and research of wearability coating on the basis of high-strength steel. В сборнике: Proceedings of 9th International Scientific

Conference, BALTRIB 2017 - Dedicated to 100th Anniversary of Restitution of Lithuania. 9. 2017. С. 166-171.

7. Skotnikova, M.A., Popov, A.A., Ivanova, G.V., Tsvetkova, G.V., Padgurskas J. Localization of plastic deformation in hcp-, bcc- and fcc-alloys at indentation. В сборнике: Materials Today: Proceedings. 2019 International Scientific Conference on Materials Science: Composites, Alloys and Materials Chemistry, MS-CAMC 2019. Amsterdam, 2021. С. 611-618.

8. Цветкова, Г.В., Скотникова, М.А., Белов, Ю.М., Крылов, Н.А., Иванов, Е.К. Структурное и фазовое состояния наплавочных материалов, предназначенных для рабочих лопаток смесителей. Научно-технические ведомости СПбГПУ. Наука и образование 4' 2010, Санкт-Петербург, С. 52-63.

Пань Чэнхао<sup>1,2</sup>, Ли Чжицин<sup>1,2</sup>, М.А. Скотникова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Санкт-Петербург, Россия, [skotnikova@mail.ru](mailto:skotnikova@mail.ru)

<sup>2</sup>Сянсуский педагогический университет, Сюйчжоу, Шанхайская дорога 101, Китай

## ИСПЫТАНИЕ ПЛАСТИЧНЫХ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

### Аннотация

Проведен сравнительный анализ результатов трибологических испытаний базовой пластичной смазки МС 5123-2 и с добавлением частиц медного порошка размером 45 мкм и различной концентрацией, с целью управления её трибологическими свойствами. Получена модифицированная смазочная композиция с хорошими антифрикционными и износостойкими свойствами, что позволит увеличить срок службы подшипников качения, снизить затраты и повысить эффективность использования минеральных ресурсов.

*Ключевые слова:* микронный медный прошрок, базовое масло, антифрикционные и износостойкие свойства, смазочные присадки.

### Введение

Износ является основной причиной разрушения подшипников качения. Все механические движущиеся части сопровождаются трением и износом, что приводит к потере ресурса, поэтому особенно важно минимизировать трение и износ деталей и продлить срок их службы [1-4]. Медь была одним из первых металлов, открытых человеком, и медные порошки используются во многих промышленных приложениях, таких как: высокоэффективные катализаторы; специальные токопроводящие и износостойкие изделия; добавки к смазочным материалам [5-14].

### Методы

В данной работе трибологические свойства пластичных смазочных материалов (ПСМ) с различным содержанием медного порошка были оценены на машине трения ЧШМ-3,2. Образцами служили шарики из стали ШХ15, Ø12,7 мм. Испытанию подвергались 4 марки ПСМ: базовая смазка МС-5123-2 и модифицированная частицами меди размером 45 мкм, с концентрацией 0.25, 0.5, 1.0 % по методике и режимам, описанным в ГОСТ 9490-75, ГОСТ 32501-2013. Смазка закладывалась в чашу таким образом, чтобы шарики полностью были погружены в смазочный материал. Для каждой пробы пластичного смазочного материала проведены от 8 до 15 испытаний с увеличением нагрузки до момента сваривания шариков.

Характеристики, подлежащие определению для всех марок ПСМ: показатель износа (Di), интенсивность износа (I), критическая нагрузка (Ркр), нагрузка сваривания (Рсв), индекс задира (Из).

### Результаты и обсуждение

Первая серия исследований заключалась в 10 сек. (в широком интервале нагрузок) и 1 ч. (при нагрузке 20 кгс) испытаниях для определения среднего диаметра пятна износа шариков (dw) и показателя износа (Di), соответственно.

Как видно из рисунков 1 и 2, смазки, содержащие концентрацию медного

порошка 1,0%, обладают относительно хорошей износостойкостью.

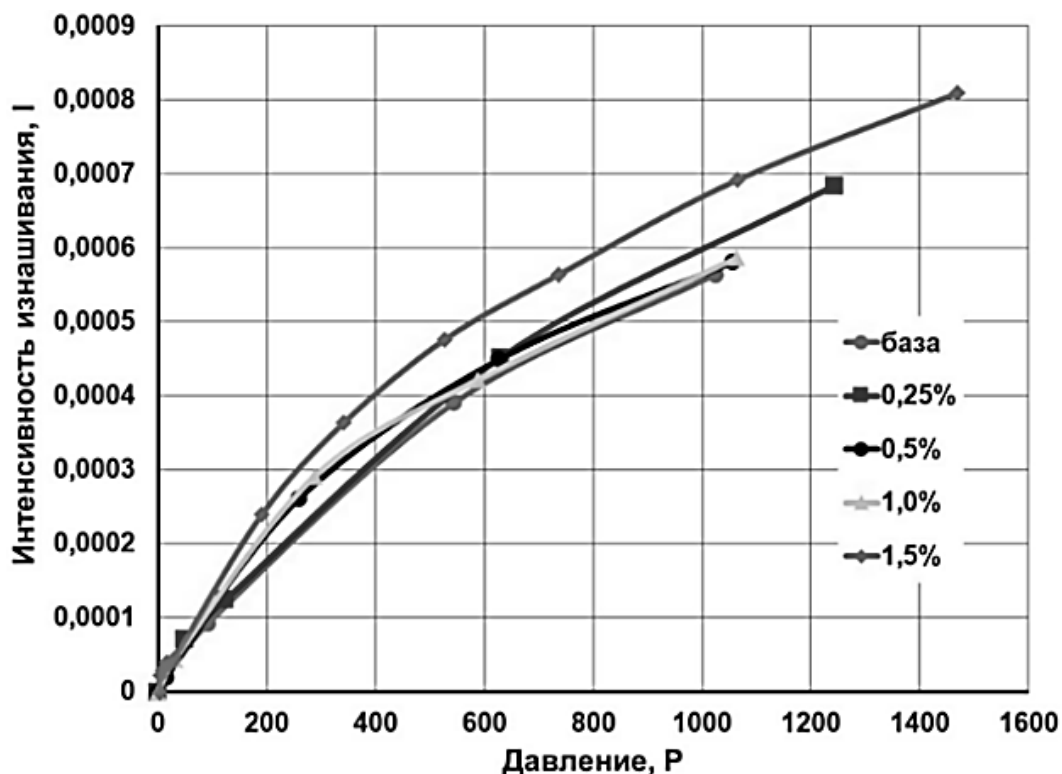


Рисунок 1 – Зависимость интенсивности изнашивания шариков в течении 10 сек. от давления для 4-х пластичных смазок с добавлением медной пудры размером 45 мкм и с концентрацией: 0,0; 0,25; 0,5; 1,0; 1,5 %

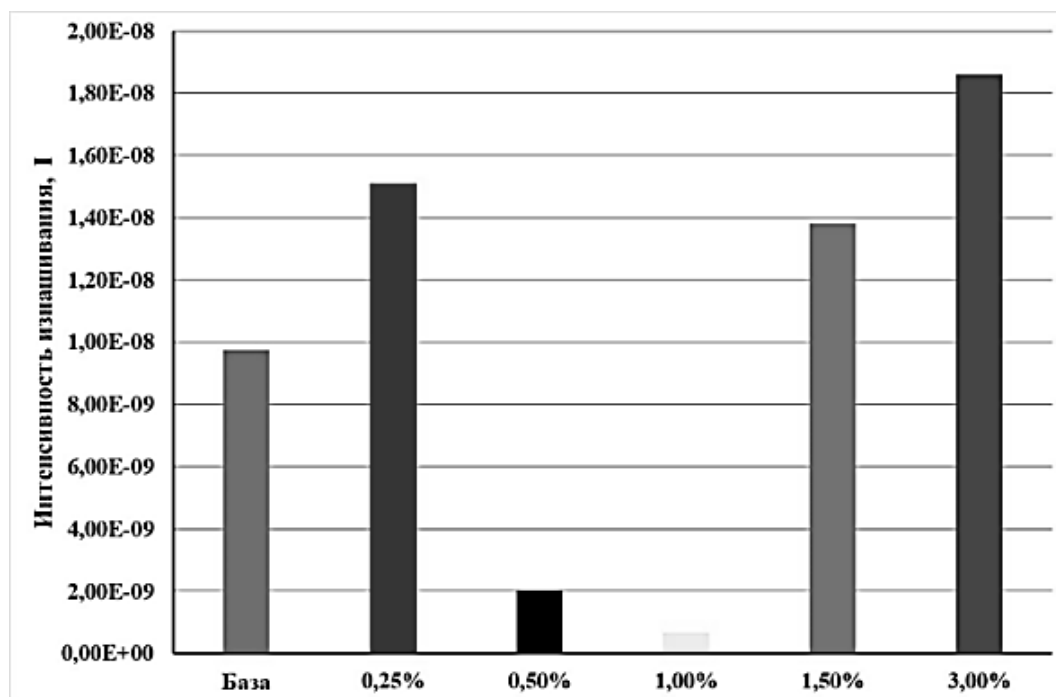


Рисунок 2 – Зависимость интенсивности изнашивания шариков после часовых испытаний при нагрузке 20 кгс для 4-х пластичных смазок с добавлением медной пудры чешуйчатой формы размером 45 мкм и с концентрацией: 0,0; 0,25; 0,5; 1,0; 1,5; 3,0 %

График значений индекса задира для смазок, содержащих медные частицы размером 45 мкм (рис. 3), показывает, что смазки, содержащие 1,0-1,5 % частиц меди, имеют относительно хорошие трибологические свойства.

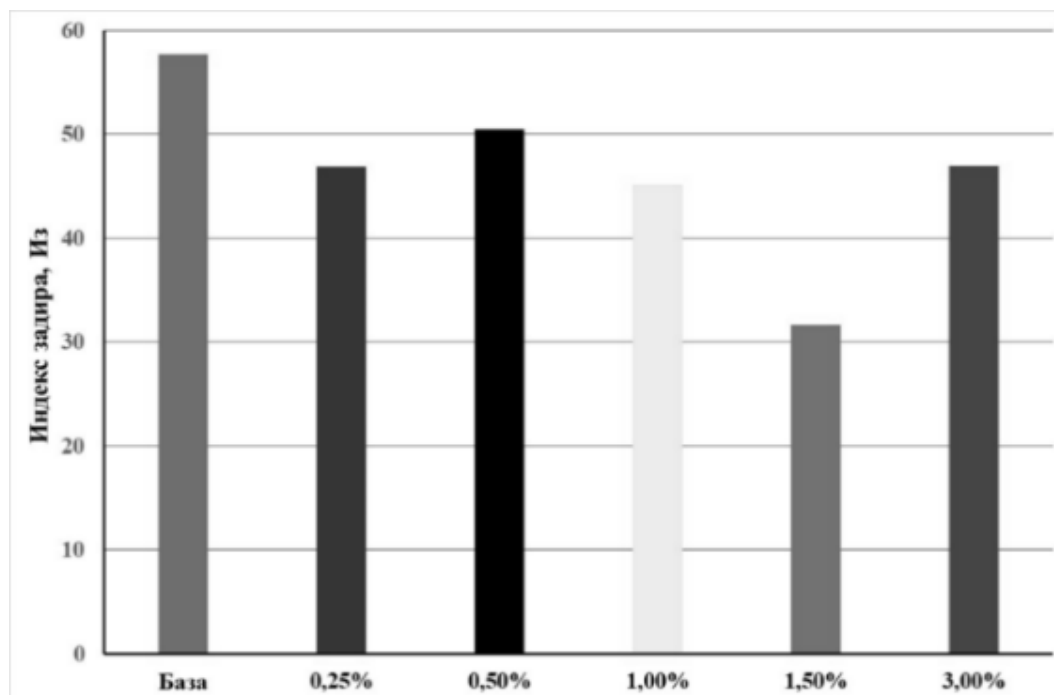


Рисунок 3 – Диаграмма значений индекса задира, (Из), для ПСМ с добавлением медных частиц размером 45 мкм и с концентрацией: 0,0; 0,25; 0,5; 1,0; 1,5; 3,0 %

Таблица 1 – Сводная таблица влияние концентрации частиц меди на трибологические свойства

№, п/п	Наименование ПСМ	Показатель износа (Ди), мм	Индекс задира (Из), кгс	Критическая нагрузка (Рк), кгс	Нагрузка сваривания (Рсв), кгс
1	Базовая смазка МС-5123-2	1,03	61,94	98,4	264,7
2	База + 0,25% частиц Cu	1,15	46,84	86	264,7
3	База + 0,5% частиц Cu	0,697	50,5	86	264,7
4	База+ 1,0% частиц Cu	0,525	45,1	86	264,7

Согласно сводной таблице 1 влияния концентрации частиц меди на трибологические свойства, видно, что увеличение концентрации медных частиц улучшает противоизносные свойства базовой смазки в исследованном диапазоне концентраций (от 0,5 до 1,0 %).

По результатам исследования микроструктуры смазки до и после модификации частицами меди (рис. 4) видно, что добавление частиц меди значительно уменьшило и устранило дефекты на поверхности трения.

### Заключение

При добавлении различного содержания частиц медного порошка размером 45 мкм в базовую смазку MS 5123-2 и получении оптимальных параметров с помощью трибологических испытаний, смазка с концентрацией медного порошка 1,0 % имела

наилучшие показатели по снижению трения и противоизносным свойствам.

Добавление медного порошка может устранить царапины, ямы и другие дефекты на поверхности трения до определенной степени, и играть функцию снижения трения и ремонта, таким образом, улучшенная смазка MS 5123-2 демонстрирует отличные ремонтные смазочные характеристики.

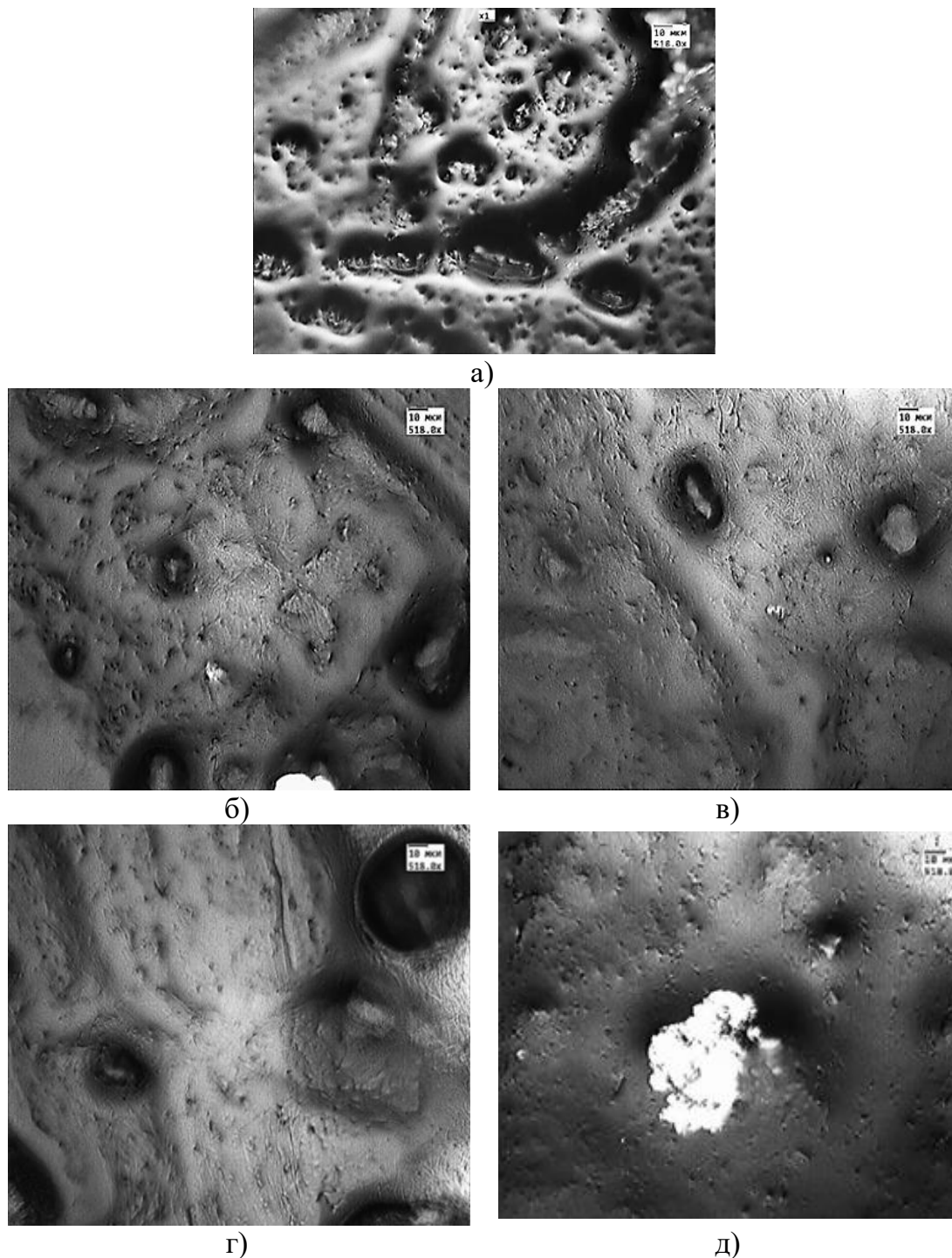


Рисунок 4 – Микроструктура поверхности трения x500: а) базовой смазки SM-5123-2; б) базовой смазки + 0,25% частиц Cu; в) базовой смазки + 0,5% частиц Cu; г) базовой смазки + 1,0% частиц Cu; д) базовой смазки + 1,5% частиц Cu



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Я.С. Бай, П. Состояние исследований и прогресс в области износа шарнирных подшипников. *Modern Manufacturing Engineering*, 2012. - С. 5.
2. П. Пэн, Ц.Ж. Чжу, Ц. Гэо. Прогресс в исследовании фрикционного износа. *Современные производственные технологии и оборудование*. - 2021. - Т. 57. - № 10. - С.112-114.
3. Л.Ц. Чжао, В.Д. Бэй. Исследование и перспективы проблем износа подшипников качения. *Механическая прочность*. - 2016. - Т. 38. - № 6. - С.1189-1193.
4. Rustamov I., Zhang G., Skotnikova M., Wang Y., Wang Z. Fretting Wear Behavior and Damage Mechanisms of Inconel X-750 Alloy in Dry Contact Condition. *Journal of Tribology*. - 2019. - 141(4). - 041603.
5. Л. Чжан. Исследование характеристик фрикционного износа и применение субмикронной меди в качестве присадок к смазочным материалам. *Чунцинский университет*. - 2017.
6. Р.Ю. Ли. Получение нанопорошка меди и его поведение в смазочном масле. *Гуандунский технологический университет*. - 2019.
7. Ш.С. Хань. Анализ и оптимизация трибологических свойств медных нанодобавок для смазочных материалов. *Сианьский технологический университет*. - 2016.
8. С. Шу, Я.Ч. Лю, В. Ли. Прогресс в исследовании токопроводящего фрикционного износа композитов с медной матрицей. *Специальное литье и цветные сплавы*. - 2022. - Т. 42. - № 4. - С.419-424.
9. Ч.В. Бай, Ю.Я. Хань, Д. Цяо. Фосфат, прослоенный LDH, в качестве наносмазочной добавки. *Трибология*. - 2018. - Т. 38. - № 4. - С. 373-382.
10. Skotnikova M.A., Krylov N.A., Medvedeva V.V. Influence of the Magnetic Component of Geomaterials on Properties of Friction Pairs. *Procedia Engineering*. - 2016. - 150. - pp. 612-617.
11. Skotnikova M.A., Krylov N.A., Ivanov E.K., Sokolov A.V., Homchenko E.V. Influence of geomaterials on improvement of tribotechnical properties of friction pairs. *5th World Tribology Congress, WTC 2013*. - 2013. - 1. - pp. 868-871.
12. Breki A.D., Medvedeva V.V., Krylov N.A., Aleksandrov S.E., Kolmakov A.G., Gvozdev A.E., Sergeev N.N., Provotorov D.A., Fadin Y.A. Antiwear properties of composite greases "LITOL-24-magnesium hydrosilicate particles". *Inorganic Materials: Applied Research*. - 2018. - Т. 9. - № 1. - pp. 21-25.
13. Skotnikova M.A., Breki A.D., Evsinc M.G., Kalinind V.Y., Wasilewski M.R. Influence of the Concentration and Particle Size of Rock Powders on the Anti-Wear Properties of Oils. *AIP Conference Proceedings*. - 2021. - 2340. - 060005.
14. Medvedeva V., Skotnikova M., Krylov N., Breki A. Research of the influence of finely dispersed friction modifiers on the anti-wear properties of grease lubricants. *Dedicated to 50th Anniversary Year of Tribology - Proceedings of 8th International Scientific Conference. BALTRIB 2015*. - 2016. - С. 23-25.

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Санкт-Петербург, Россия, [skotnikova@mail.ru](mailto:skotnikova@mail.ru)

<sup>2</sup>Сянсуский педагогический университет, Суйчжоу, Шанхайская дорога 101, Китай

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПАР ТРЕНИЯ «СТАЛЬ - БРОНЗА» В МОДИФИЦИРОВАННОЙ СМАЗОЧНОЙ СРЕДЕ

### Аннотация

В данной статье рассматривается влияние добавления природного минерального порошка серпентина в качестве модификатора в базовое масло МС-20 на характеристики трения и износа фрикционных подложек сталь-медь в условиях масляной смазки. Улучшенная смазка необходима для снижения износа и ремонта изношенных поверхностей в условиях ограниченных ресурсов. В результате проведенной работы были получены модифицированные смазочные материалы с хорошим эффектом снижения трения и износа, что позволит увеличить срок службы пар трения сталь-медь, снизить затраты и повысить эффективность использования минеральных ресурсов.

*Ключевые слова:* минерал серпентин, колодка – ролик, бронза – сталь, масло МС-20, модификатор.

### Введение

Износ от трения - универсальное природное явление, более 1/3 располагаемой энергии в мире теряется через трение, а износ является одной из трех основных форм повреждения и выхода из строя материалов и оборудования [1]. Серпентин - природный минерал, который, благодаря своей уникальной слоистой структуре и диссоциативным свойствам выделения кислорода, может улучшать трибологические свойства материалов путем формирования оксидной реакционной пленки высокой твердости на поверхностях трения [2-3]. Однако современные исследования в этой области в основном сосредоточены на материалах на основе железа, в то время как о трибологических исследованиях, используемых для улучшения фрикционных подложек, сталь-бронза, не сообщалось [4-5]. В данной работе авторы исследовали влияние минерального порошка серпентина в качестве добавки на трибологические свойства пары сталь-бронза в условиях масляной смазки с использованием для испытания машины трения СМЦ-2 и на основе момента трения, коэффициента трения, общей температуры контакта, морфологии поверхности трения и микроструктуры.

### Методы

Характеристики фрикционного износа исследовались на машине трения СМЦ-2 в соответствии с протоколом испытаний "колодка-ролик", показанным на рисунке 1.а). В качестве образцов фрикционной подложки использовались неподвижная бронзовая колодка (1) с рабочим диаметром 50 мм и шириной 10 мм и вращающийся стальной ролик (2) с диаметром 50 мм и шириной 12 мм, как показано на рис. 1.б). Нагрузка на образец составляла 800 Н (80 кгс). Скорость вращения ролика составляла

300 об/мин. Для статистики были испытаны шесть пар трения, детали которых оставались постоянными на протяжении всего этапа испытаний и исследований.

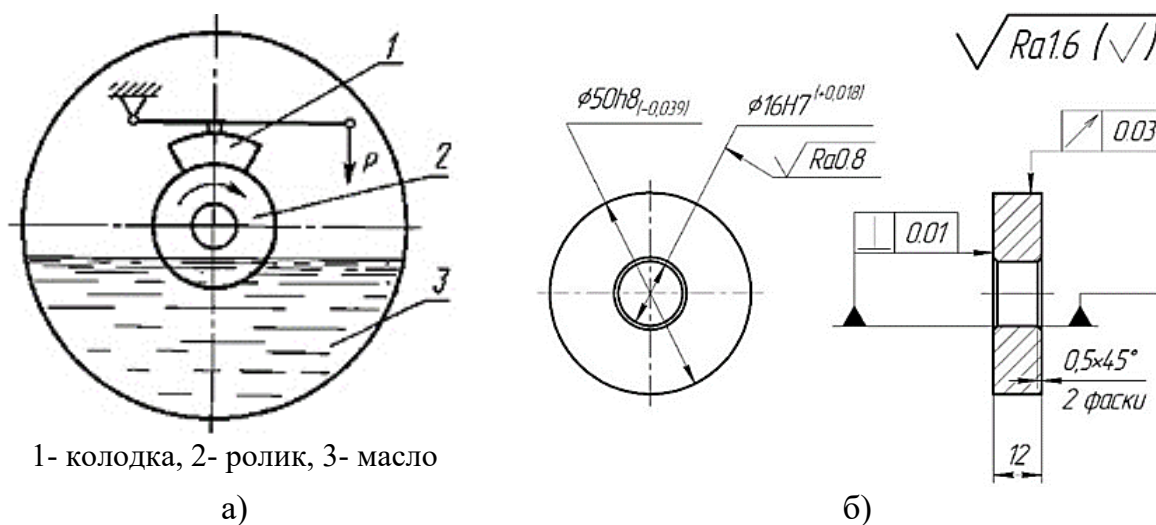


Рисунок 1 – Схема испытаний на износостойкость: а) образцы «колодка - ролик»; б) чертеж стандартного образца

Образцы взвешивались с точностью до 0,001 грамма с помощью электронных весов ViBRA серии AJ до и после испытания для расчета количества износа и, следовательно, объемной скорости износа. Температура зоны контакта стального вала измерялась непрерывно с помощью цифрового мультиметра UT61B UNI-T с вариацией 5 минут в течение 2 часов. Геометрия поверхности (шероховатость) образцов оценивалась до и после испытаний с помощью профилометра MarSurf PS1. Зоны износа всех элементов трения были исследованы металлографически с помощью микроскопа отраженного света  $\mu$ Vizo-MET (ОАО «ЛОМО») до и после испытания при увеличении от x100 до x1000 крат.

### Результаты и обсуждение

Как видно из рисунка 2, средний момент трения базового масла МС-20 составил около 26.02, а при добавлении порошка серпентина. Как видно из рисунка 2, 15,69 и составил около 10.33.

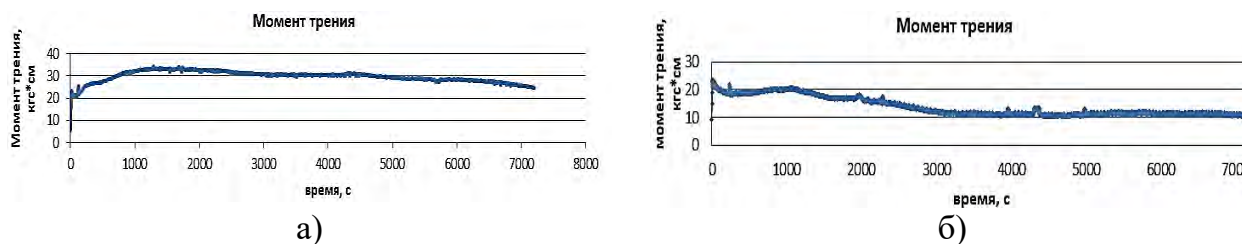


Рисунок 2 – Момент трения при испытании в: а) базовом масле МС-20; б) модифицированном масле МС-20

Как видно из рисунка 3, средний коэффициент трения базового масла МС-20 составил приблизительно 0,122, а средний коэффициент трения после добавления серпентинового порошка составил приблизительно 0,053, что на 0,069 ниже, чем у базового масла МС-20.

Измеряя температуру контактирующих поверхностей, можно сделать вывод, что температура в зоне контакта фрикционной подложки значительно ниже при

добавлении модификатора, чем при смазывании базовым маслом.

На рисунке 4 видно, что в базовом масле за 2 часа испытания колодка и ролик изнашивались на 0,055 г и 0,007 г, соответственно; в модифицированном базовом масле колодка и ролик изнашивались на 0,025 г и 0,035 г, соответственно. Износ колодки до и после модификации смазки показал общее снижение износа после модификации, однако в экспериментальных результатах по износу роликов были обнаружены нестабильность и дисперсия.

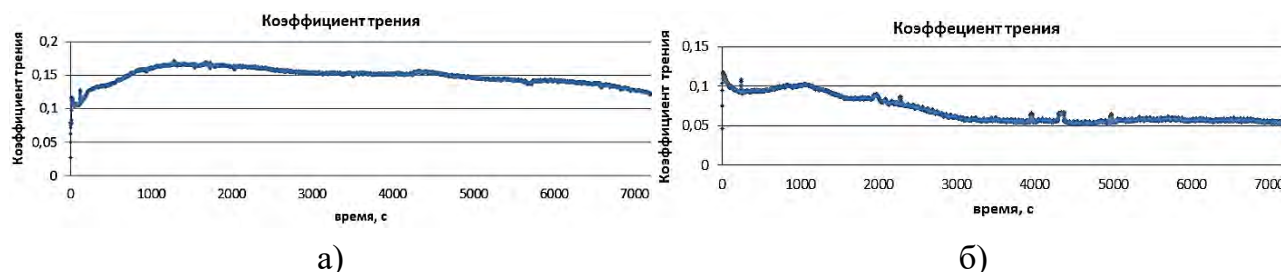
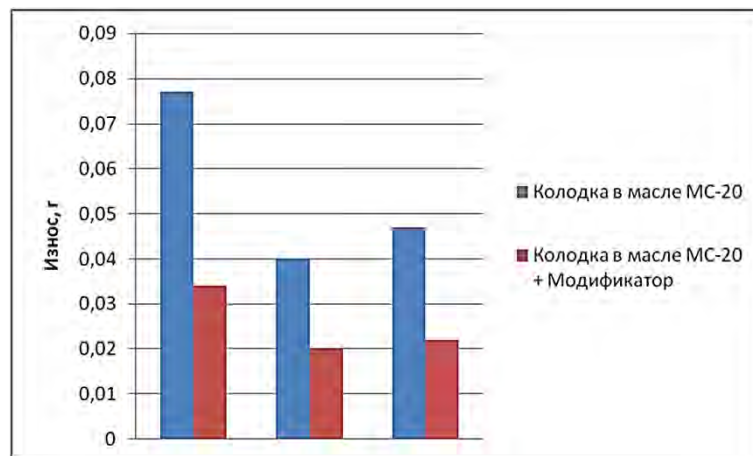
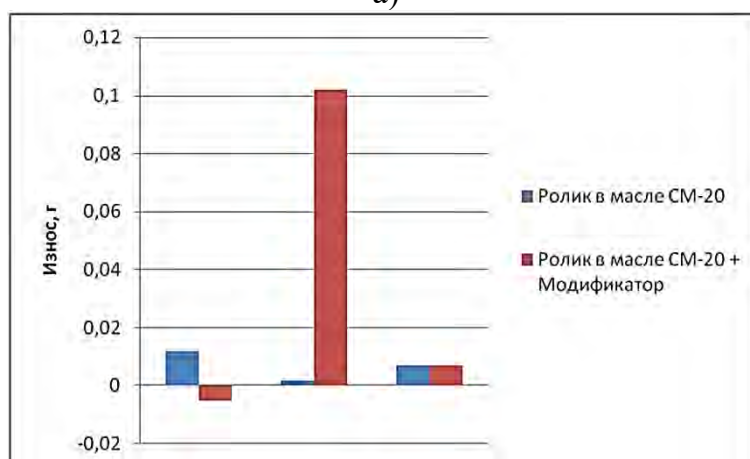


Рисунок 3 – Коэффициент трения при испытании в: а) базовом масле МС-20; б) модифицированном масле МС-20



а)



б)

Рисунок 4 – Результаты 3-х испытаний на износ в базовом и модифицированном масле МС-20: а) колодок; б) роликов

Профили шероховатости роликов были измерены до и после испытания. Средняя шероховатость поверхности 3-х роликов до испытания была на уровне 0,064

мкм; шероховатость поверхности 3-х роликов после испытания увеличилась на 0,024 мкм.

На рисунке 5 представлены результаты металлографического исследования поверхностей износа пар трения до (рис. 5, а, в) и после 2 часов испытаний (рис. 5, б, г) в базовом масле (рис. 5, б) и модифицированном масле МС-20 (рис. 5, г). Видно, что в масле МС-20 массоперенос меди с колодки на ролик происходил и в отсутствие модификатора. Добавление порошка серпентина в масло МС-20 приводило к образованию защитной пленки, содержащей медь. Металлические поверхности, смазанные базовым маслом, имеют большое количество глубоких царапин, а износ происходит в основном в виде адгезии и истирания. При добавлении серпентинового порошка поверхность трения становится относительно однородной, царапины мелкие, отсутствует прилипание, улучшается смазываемость поверхности ролика.

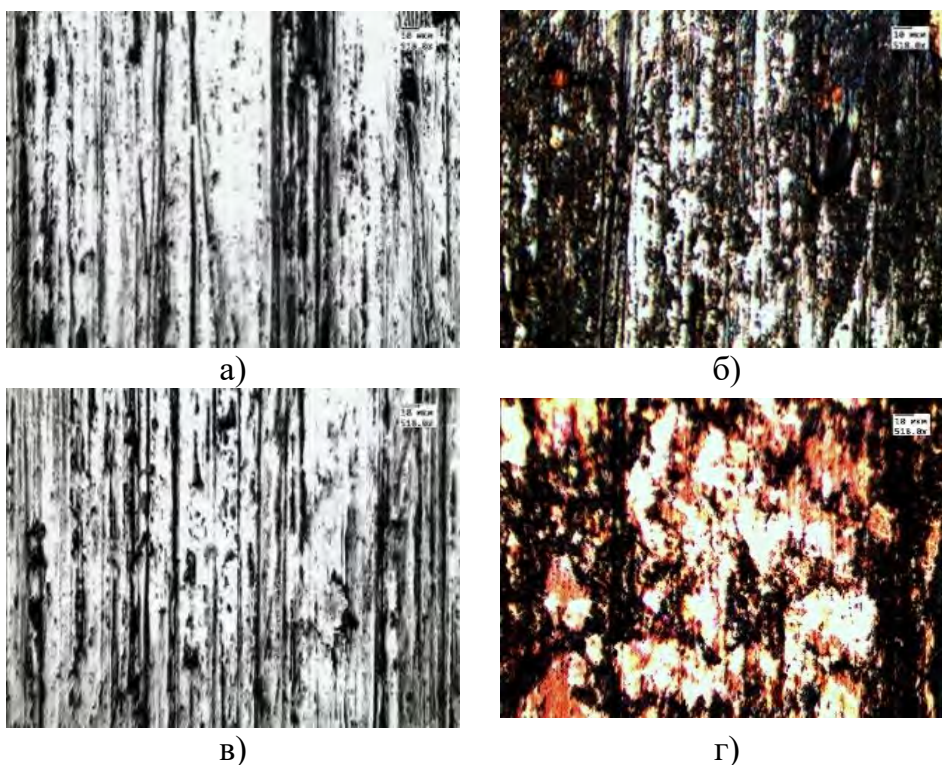


Рисунок 5 – Результаты металлографического исследования площадок износа, х500: а, в) до испытания; б, г) после 2 часов испытания; б) в базовом масле; г) в модифицированном масле

Исследование серпентина в качестве добавки для улучшения трибологических свойств фрикционных субструктур на основе железа показали [6-10], что серпентин имеет слоистую структуру с сильной адсорбционной способностью, которая легко адсорбируется на поверхности металла в процессе трения. Описанный выше трибологический механизм действия серпентиновой присадки также применим к поверхности фрикционных подложек пары трения сталь - бронза. Металлографические исследования показали, что присадка способна сгладить начальные царапины на поверхности трения, сформировать защитную пленку, содержащую медь, улучшить трибологические свойства материала и эффективно продлить срок службы изделия.

## Заключение

В качестве модификатора смазки в базовое масло МС-20 был добавлен порошок природного серпентина и разработан протокол испытаний колодка - ролик. Трибологические испытания пар трения сталь - бронза в условиях масляной смазки проводились на машине трения СМЦ-2, которые подтвердили значительное снижение трения и противоизносный эффект минерального порошка серпентина.

Природный порошок серпентина в процессе трения, химического взаимодействия, в определенных условиях испытания, может изменить поверхность трения, сформировать износостойкий самовосстанавливающийся промежуточный слой со значительным снижением момента и коэффициента трения и противоизносными характеристиками, так что модифицированное моторное масло МС-20 показывает отличные ремонтные смазочные характеристики.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. С.З. Вэнь, П. Хуан. Принципы трибологии. - Пекин: Издательство Университета Цинхуа, 2002.
2. Х.Л. Юй, Ю. Сюй, П.Ж. Ши. Микроструктура, механические свойства и трибологическое поведение трибопленки, полученной из минеральных порошков природного серпентина в качестве смазочной добавки. Износ. - 2013. - Т. 297. - С. 802-810.
3. Ц.В. У, С. Ван, Л.Х. Чжоу. Факторы формирования поверхностного слоя, образованного из серпентина в качестве смазочной добавки и композитного армирования. Трибологические письма. - 2017. - Т. 65. - С. 93-102.
4. Ю.Ш. Цзинь. Влияние внутреннего окисления от серпентина на создание восстановительного слоя на изношенных поверхностях черных металлов. Китайский инженер поверхности. - 2010. - Т. 23. - № 1. - С. 46-50.
5. С.В. Цюй, Л. Лу, Ч.Н. Цзя. Сравнительные трибологические свойства гексасиликата магния и порошка серпентина в качестве присадок к смазочным маслам при высокой температуре. Трибология Интернэшнл. - 2012. - Т. 49. - С. 53-57.
6. Ф.Я. Чжао. Трибологические свойства микронаночастиц серпентина и механизм образования трибопленки. - Пекин: Китайский университет геонаук, 2014.
7. Б.С. Чжан, Б.Ш. Сюй, И. Сюй. Эффект самовосстановления и механизм действия трибопар, состоящих из аналога вал-втулка, индуцированных змеевидными порошками. Материаловедение и инженерия порошковой металлургии. - 2013. - № 3. - С. 346-352.
8. Ч.В. Бай, Ю.Я. Хань, Д. Цяо. Фосфат, прослоенный LDH, в качестве наносмазочной добавки. Трибология. - 2018. - Т. 38. - № 4. - С. 373-382.
9. Skotnikova, M.A., Krylov, N.A., Medvedeva, V.V. Influence of the Magnetic Component of Geomaterials on Properties of Friction Pairs. ProcediaEngineering. – 2016. 150. - pp. 612-617.
10. Skotnikova, M.A., Krylov., N.A., Ivanov., E.K., Sokolov, A.V., Homchenko, E.V. Influence of geomaterials on improvement of tribotechnical properties of friction pairs. 5th World Tribology Congress, WTC 2013. - 2013. - 1. - pp. 868–871.

С.Ю. Мишаков, П.Н. Хопин  
Московский авиационный институт (МАИ), Москва, Россия, [avyfal1@gmail.com](mailto:avyfal1@gmail.com)

## **ЭКСПРЕСС-ОЦЕНКА ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПРИ ГРАНИЧНОМ ТРЕНИИ С ПРИСАДКАМИ ГРАФИТА И ГРАФЕНА**

### **Аннотация**

В работе рассмотрена конструкция прибора и методика проведения экспресс-оценки износостойкости поверхностей в условиях реверсивного колебательного движения. Проведена оценка эффективности применения в качестве присадок к маслу графита и графена с целью уменьшения износа поверхностей трения.

*Ключевые слова:* смазочные масла, реверсивное движение, граничное трение, графит, графен.

### **Введение**

В настоящее время проводятся обширные исследования эффективности применения графена [1], в том числе, как смазочного материала [2,3]. В этой связи актуальной задачей является исследование износостойкости поверхностей при граничном трении с использованием присадок графена и графита.

### **Методика экспресс-оценки сопротивления изнашиванию и изнашивающей способности**

Решение поставленной задачи осуществлялось с использованием прибора для экспресс-оценки сопротивления изнашиванию и изнашивающей способности, схема которого приведена на (рис. 1).

Испытываемый образец 10 устанавливается на столе 1. Величина нормальной нагрузки на сферический индентор 9 задавалась грузами 4. Вес нагружающего узла 6, установленного на шарнире 14, предварительно уравнивается противовесом 5. Возвратно-поступательное движение обеспечивается электродвигателем 7 через кривошипно-шатунный механизм 8 и штангу 3. Сферический индентор 9 движется по дуге. Узлы прибора монтируются на плите 2.

В качестве материалов пары трения было выбрано сочетание закалённого подшипникового материала ШХ15 (HRC 60) относительно сплава на никелевой основе широко используемого в авиакосмической технике следующего состава: Ni - 70%; Cr - 15%; Nb - 6,38%; Co - 5,17%; Mo - 1,62%; Ti - 0,954%; V - 0,367% и др. (определён на рентгенофлуоресцентном анализаторе - спектрометре «Элемент 5000-РФА» ООО «НПП «Монотест»). Твёрдость диска, измеренная на микротвёрдомере HVS-1000 при  $P = 1,96 \text{ Н}$  составила  $HV = 549$ .

Реализовывалось трение по схеме «шарик – плоскость» (рис. 2, а). Изнашивание испытываемой поверхности диска  $\varnothing 37$ , толщиной 10 мм, производилось сферическим индентором  $\varnothing 5$  мм. Индентор состоял из закалённого шарика  $\varnothing 5$  мм (ШХ15), запрессованного в отверстие стального корпуса  $\varnothing 10 \times 23$  мм (сталь 3), с последующим креплением цианокрилатным клеем. Внешний вид индентора показан на (рис. 2, б).

Нагрузка составила  $N = 25,48 \text{ Н}$  (2,6 кгс). Частота возвратно-поступательного движения  $n = 76,8$  двойных колебаний/мин. Максимальная скорость скольжения в средней точке составила  $V_{max} = 0,073 \text{ м/с}$ . Время испытания 20 мин.

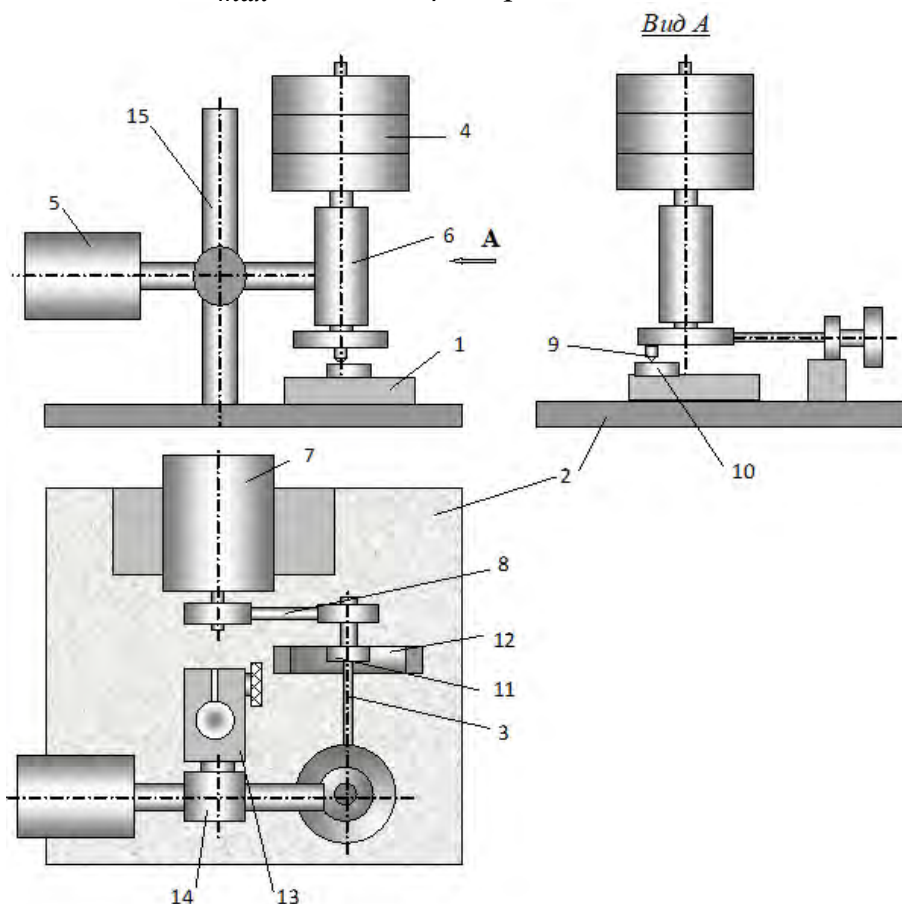
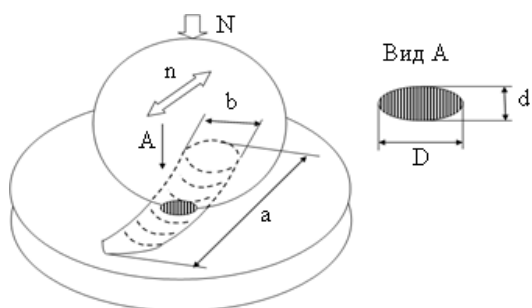


Рисунок 1 – Схема прибора для экспресс-оценки сопротивления изнашиванию и изнашивающей способности: 1 – стол, 2 – плита, 3 – штанга, 4 – грузы; 5 – противовес, 6 – нагружающий узел, 7 – электродвигатель с редуктором, 8 – кривошипно-шатунный механизм, 9 – индентор, 10 – испытываемый образец, 11 – подшипник, 12 – направляющая, 13 – кронштейн, 14 – шарнир, 15 – стойка



а)

б)

Рисунок 2 – Схема трения «шарик – плоскость»: а) «эллипс» пятна износа на инденторе; б) внешний вид инденторов



Оценка величины износа контртела и диска производилась по длине и ширине канавки, образующейся в результате изнашивания, с использованием инструментального микроскопа ММИ-2.

В качестве смазочной среды использовалось индустриальное масло И-20 без наполнения и с присадками графита (7,72% по весу) и графена, полученными механическим способом (7,5% по весу).

### Результаты испытаний

В результате экспериментов на диске образовывалась дорожка трения длиной «а» и шириной «б», представленная на (рис. 3, а). На инденторе пятно износа образовывалось в виде эллипса с диаметрами D и d, представленного на (рис.3, б). При расчёте объёма износа шарового сегмента, оценка производилась по среднему диаметру, исходя из диаметров эллипса D и d. При расчёте объёма износа дорожки трения на диске, оценка осуществлялась по сегменту изношенного цилиндра длиной «а» и шириной «б» (рис.2).

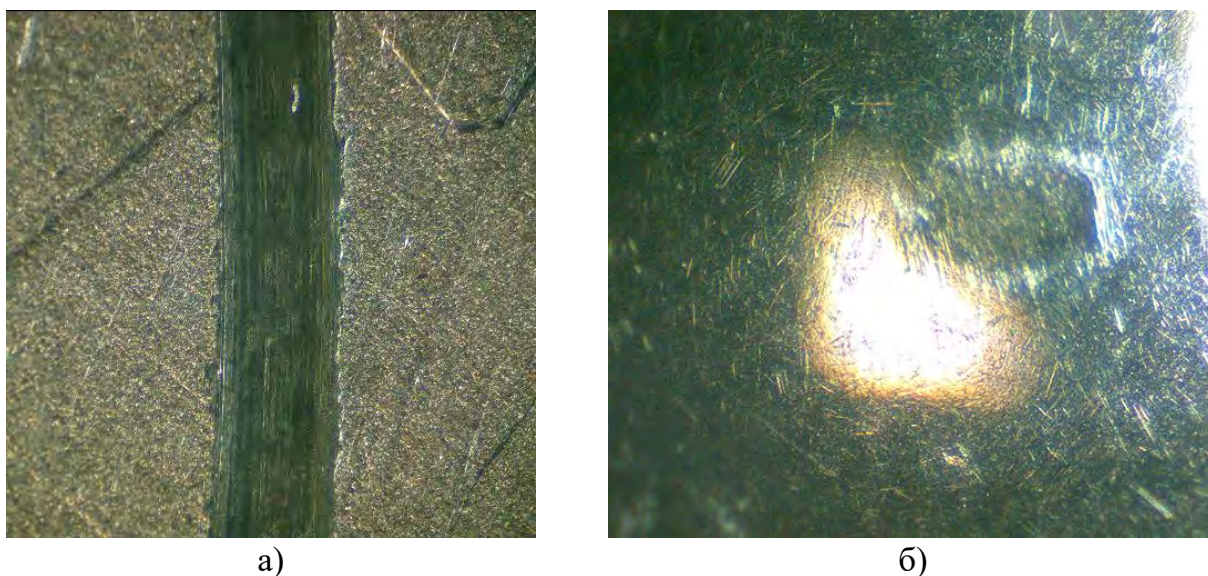


Рисунок 3 – Дорожки трения: а) на диске; б) на шариковом инденторе

Результаты испытаний представлены в табл. 1.

Таблица 1 – Результаты испытания пары «шарик-плоскость»

№ опыта	Вид смазки	Размеры «эллипса» износа шарикового индентора Ø5 мм (ШХ15)		Размеры дорожки износа диска из никелевого сплава, мм	
		D, мм	d, мм	a, мм	b, мм
3	Индустриальное масло И-20	0,460	0,260	3,200	0,385
5		0,480	0,250	3,080	0,445
Среднее значение:		0,470	0,255	3,140	0,415

7	Инд. масло И-20 + графит (7,72 % по весу)	0,355	0,188	3,175	0,410
12		0,300	0,180	3,000	0,385
Среднее значение:		0,328	0,184	3,088	0,398
8	Инд. масло И-20 + графен (7,5 % по весу)	0,303	0,205	3,000	0,400
10		0,278	0,150	2,980	0,370
11		0,240	0,165	2,970	0,375
Среднее значение:		0,274	0,173	2,980	0,382

Результаты расчёта изношенных объёмов шарового (для контртела) и цилиндрического (для диска) сегментов  $V_{\text{шара}}$  и  $V_{\text{диска}}$  представлены в табл. 2.

Таблица 2 – Результаты оценки износостойкости шарикового контртела и диска при граничном возвратно-поступательном трении в среде масла с присадками

Состав жидкой смазки	Объём износа сегмента шара $V_{\text{шара}}$ , мм <sup>3</sup>	В процентном выражении к смазке инд. маслом И-20, %	Объём изношенной канавки диска $V_{\text{диска}}$ , мм <sup>3</sup>	В процентном выражении к смазке инд. маслом И-20, %
Индустриальное масло И-20	0,000342	100	0,007496	100
Индустриальное масло И-20 + графит (7,72 % по весу)	$8,387 \cdot 10^{-5}$	24,5	0,006476	86,4
Индустриальное масло И-20 + графен (7,5 % по весу)	$3,356 \cdot 10^{-5}$	9,81	0,005539	73,9

С использованием данных таблицы 2 были построены диаграммы объёмов износа шара и диска в зависимости от состава жидкой смазки, представленные на рис. 4.

Анализ результатов экспериментальных исследований, представленных на рис. 4, показывает, что:

– наименьший износ как на теле, так и на контртеле, при возвратно-поступательном движении шарового контртела относительно диска, обнаруживает фрикционное сопряжение, функционирующее в условиях смазывания маслом с наполнителем в виде графена с весовым соотношением последнего в индустриальном масле 7,5%;

– при смазывании маслом И-20 с включением графена величина износа шарового контртела составляет 9,81% по отношению к износу, наблюдаемому при смазывании чистым маслом И-20, а износ дискового образца составляет соответственно 73,9%;

– при смазывании исследуемого контакта маслом И-20 с включением графита с весовым соотношением последнего в индустриальном масле 7,72% величина износа

шарового контртела составляет 24,5% по отношению к износу, наблюдаемому при смазывании чистым маслом И-20, а износ дискового образца составляет 86,4%.

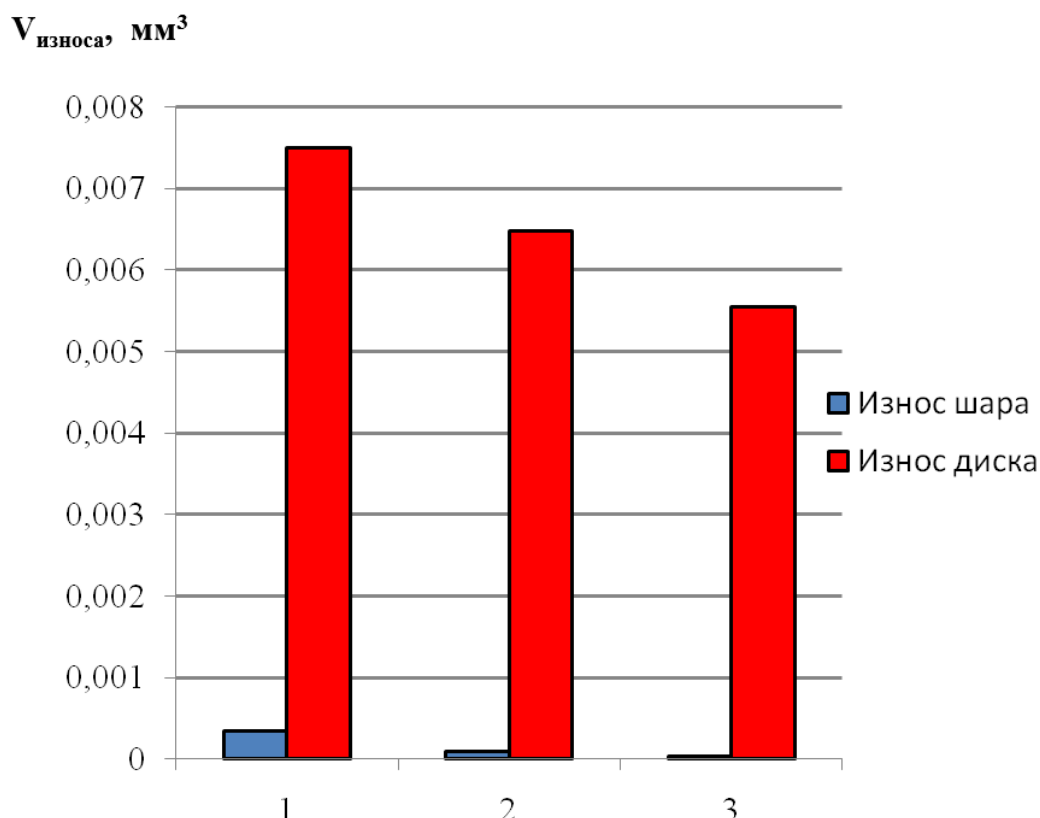


Рисунок 4 – Объёмы износа шарикового контртела (ШХ15) и дорожки трения на диске (никелевый сплав) в зависимости от состава жидкой смазки ( $N = 25,48$  Н,  $n = 76,8$  об/мин.,  $V_{max} = 0,073$  м/с,  $\tau = 20$  мин.): 1 – промышленное масло И-20; 2 – промышленное масло И-20 + графит (7,72 % по весу); 3 – промышленное масло И-20 + графен (7,5 % по весу)

## Выводы

Таким образом, в результате проведённых исследований:

1. Разработана методика экспресс-оценки износостойкости поверхностей трения скольжения при жидкостном смазывании в паре «шар – плоскость» с присадками различных типов.

2. Экспериментальными исследованиями показано, что смазывание пары «закалённый шар – диск из никелевого сплава», функционирующей в условиях возвратно-поступательного движения ( $N = 25,48$  Н,  $n = 76,8$  об/мин.,  $V_{max} = 0,073$  м/с,  $\tau = 20$  мин.) жидкой смазкой с включением графена (7,5 % по весу), вызывает наименьший износ тела и контртела по сравнению со смазыванием чистым маслом И-20 и маслом с добавкой графита (7,72 % по весу).

3. Величина износа шарового индентора в рассмотренных условиях для смазки с графеном составляет 9,81%, а износ дискового образца – 73,9% по отношению к износу, наблюдаемому при смазывании чистым маслом И-20.

4. Величина износа шарового индентора, в рассмотренных условиях для смазки с графитом, составляет 24,5%, а износ дискового образца составляет 86,4% по отношению к износу, наблюдаемому при смазывании чистым маслом И-20.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Грачев В. И. Первая российская конференция "Графен - молекула и 2D-кристалл" (Новосибирск, 8-12.09.2015). ж. Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии. 2015, т.7, № 2, с. 108-130
2. M.S. Won, O.V. Penkov, D.E. Kim. Durability and degradation mechanism of graphene coatings deposited on Cu substrates under dry contact sliding. Carbon 54, pp. 472-481, 2013.
3. O.V. Penkov, H.J. Kim, H.J. Kim, D.E. Kim. Tribology of Graphene: A Review. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing 15, pp. 1–9, 2014.

# Машины и обработка металлов давлением

УДК 621.983.044

И.В. Калатошишвили, К.С. Арсентьева, В.В. Блажевич, В.С. Мамутов  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Санкт-Петербург, Россия, ivank300@gmail.com

## КОМПЬЮТЕРНЫЙ РАСЧЕТ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ДАВЛЕНИЯ НА ДЕФОРМИРУЕМОЙ ЗАГОТОВКЕ ПРИ ЭЛЕКТРОГИДРОИМПУЛЬСНОЙ ФОРМОВКЕ

### Аннотация

В работе выполнено сопоставление результатов компьютерных расчетов с применением конечно-элементного комплекса LS-DYNA давления на поверхности движущейся тонколистовой заготовки при электрогидроимпульсном формоизменении с экспериментальными данными. Экспериментальная оценка давления осуществлялась обработкой данных, полученных сверхскоростной фотосъемкой истечения струи жидкости из отверстия в центре заготовки. Для расчета трехмерной гидродинамики плазменного канала и жидкости применялась техника *ALE*. Сравнение расчетных и экспериментальных результатов нормированного графика давления от времени показало особенности близости результатов и их отличие.

*Ключевые слова:* электрогидроимпульсное формоизменение тонколистовой заготовки, давление на поверхности подвижной заготовки, компьютерный расчет с применением конечно-элементного комплекса LS-DYNA, сверхскоростная фотосъемка истечения струи жидкости из отверстия в центре заготовки, сравнение результатов по временному графику давления.

### Введение

Электрогидроимпульсная штамповка (ЭГИШ) листовых материалов и труб эффективно применяется в условиях мелкосерийного производства для изготовления деталей машиностроения [1], аэрокосмической техники [2], автомобильной промышленности [3] и ряда других. Простота технологической оснастки, сжатые сроки подготовки производства, высокое предельное формоизменение и качество металла заготовки за счет импульсного нагружения и деформирования, определяют конкурентоспособность технологического процесса. Однако сложность и многоступенчатость физико-механического процесса преобразования электрической энергии конденсаторной батареи электрогидроимпульсной установки (ЭГИУ) в работу пластического деформирования заготовки, большое число значимо влияющих на процесс параметров (более трех десятков) часто не позволяют разработать эффективные процессы, обеспечивающие декларируемые качества детали и часто вообще реализацию процесса.

Экспериментальные исследования электрических и физико-механических процессов, определяющих ЭГИШ, В.Н. Чачина, Е.В. Кривицкого и ряда других ученых создали основу для последующего теоретического моделирования технологий [4, 5]. Однако возможность адекватного компьютерного моделирования процесса появилась только с развитием вычислительной техники и таких конечно-элементных (КЭ) комплексов, как LS-DYNA [6]. Одной из возможностей LS-DYNA является использование техники Arbitrary Lagrangian Eulerian (ALE), которая дает возможность моделировать взаимодействия между плазменным каналом и рабочей жидкостью, а также жидкостью и деформируемой заготовкой [7]. Овладев этой техникой можно на новом уровне решить и осмыслить важные для проектирования технологии вопросы, не решенные, несмотря на длительную историю развития ЭГИШ. Одним из таких вопросов является определение импульсного давления на подвижной деформируемой заготовке. В работе [8] выполнена сверхскоростная фоторегистрация (СФР) струи жидкости, вылетающей из небольшого отверстия в деформируемой заготовке при ЭГИШ, что позволило оценить давление, действующее на заготовку. Поэтому целью работы являлось сопоставление результатов компьютерных расчетов с применением КЭ комплекса LS-DYNA с экспериментальными данными по оценке давления на подвижной деформируемой заготовке.

### Методы

В работе [8] дано описание методики оценки давления на подвижной заготовке по скорости вылета струи жидкости и для конкретного случая представлены результаты измерения. Схема измерительного стенда представлена на рис. 1.

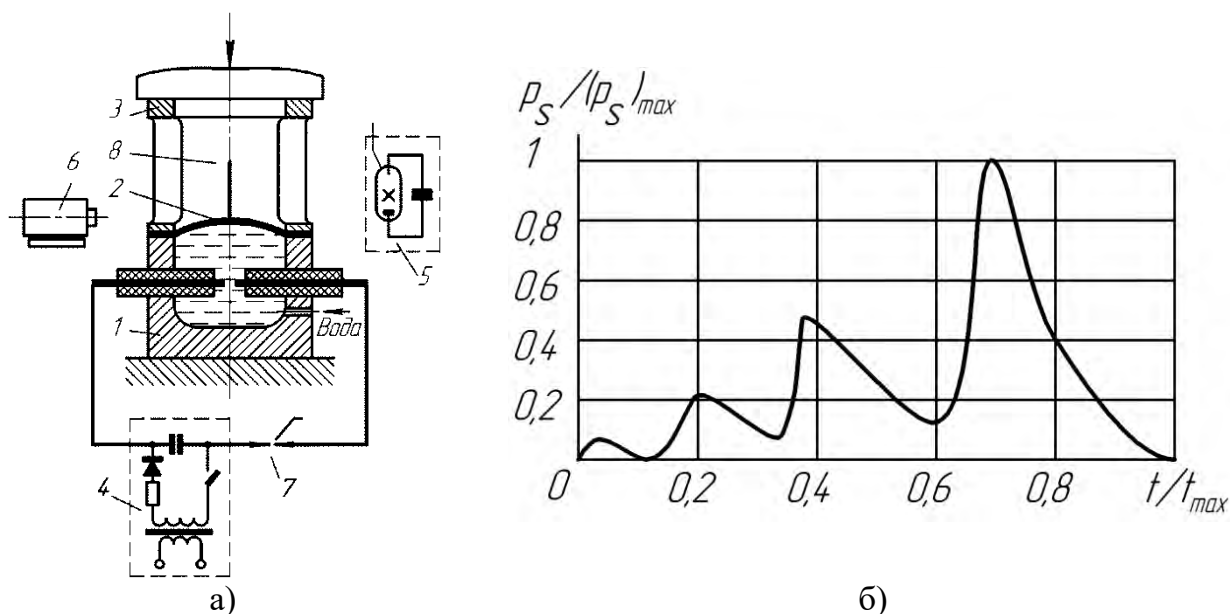


Рисунок 1 – Схема измерительного стенда: а) 1 – разрядная камера, 2 – деформируемая заготовка, 3 – прижим с диаметрально расположенными окнами, 4 – электрогидроимпульсная установка, 5 – блок импульсной подсветки, 6 – фоторегистратор, 7 – разрядник, 8 – струя жидкости; б) нормированное давление на подвижной заготовке

Листовая заготовка 2 с небольшой степенью начального формоизменения, чтобы ее купол был на одном уровне с нижней кромкой прижима 3, устанавливается на поверхность разрядной камеры 1, которая заполнена водопроводной водой. Запуск

сверхскоростного фоторегистратора 6, поджиг высоковольтного разрядника 7 ЭГИУ и импульсной лампы подсветки 5 синхронизированы. При электрическом разряде в жидкости импульсное давление действует на заготовку, которая начинает деформироваться. При этом из отверстия в заготовке диаметром, равным толщине материала, происходит истечение струи жидкости 8. Фоторегистратор снимает перемещение струи жидкости и перемещение заготовки. Давление, действующее на заготовку  $p$ , определялось по известной в теории гидравлики формуле [9]:

$$v = \varphi \sqrt{2(p - p_0) / \rho} \quad (9),$$

откуда можно получить давление, действующее на заготовку

$$p = p_0 + 0.5\rho v^2 / \varphi^2.$$

Здесь  $p_0$  – атмосферное давление,  $\rho$  – плотность жидкости,  $\varphi$  – коэффициент скорости, зависящий от формы отверстия.

Представленные ниже результаты расчетов и эксперимента выполнены для латунной заготовки (Л68) толщиной 0,3 мм и диаметром 110 мм. Эксперимент проводился на ЭГИУ с емкостью конденсаторной батареи 215 мкФ с напряжением зарядки 3 кВ. Фоторегистратор работал в режиме «лупа времени» со скоростью 7,5 тыс. об/мин. Экспериментальный график давления в нормированном виде представлен на рис. 1, б.

Компьютерные расчеты осуществлялись с применением КЭ комплекса LS-DYNA. Зависимость между напряжением текучести  $\sigma_s$  и интенсивностью тензора логарифмических деформаций  $\varepsilon_i$  для Л68 задавалась степенным соотношением

$$\sigma_s = K_d \cdot B \cdot \varepsilon_i^m,$$

где  $B = 740$  МПа,  $m = 0,44$  – усредненные значения аппроксимации из испытаний на статическое растяжение листовых образцов вдоль и поперек проката. Корректирующий коэффициент динамичности задавался значением  $K_d = 1,25$  [8].

При моделировании воды в качестве модели жидкости использовалась модель идеальной сжимаемой жидкости *MAT\_ELASTIC\_FLUID*, в которой зависимость между давлением и плотностью имеет вид

$$p = -K \cdot \ln(\rho_0 / \rho),$$

где  $\rho$  – плотность воды,  $\rho_0 = 1000 \text{ kg/m}^3$  – начальная плотность,  $K$  – модуль объемного сжатия. Аппроксимация адиабаты Тэта в пределах  $p \in [0.1 \dots 100]$  МПа дает значение  $K \cong 2,35$  ГПа.

### Результаты и обсуждение

В результате компьютерных расчетов получена зависимость давления на подвижной заготовке от времени. Аналогично, как в работе [8], при создании компьютерной модели применялась техника *ALE*. Пример расчета, представлен на рис. 2. Следует отметить, что длительность импульса давления в случае экспериментального графика составляла  $t_{\max} \cong 830$  мкс, а в случае расчетного варианта  $t_{\max} \cong 890$  мкс. С одной стороны видно, что графики давления, представленные на рис. 1, б и рис. 2 имеют похожую структуру с четырьмя выбросами давления. Видно, что скорость струи в использованной экспериментальной методике для данного конкретного случая в большей степени коррелирует с пиковыми значениями давления. С другой стороны площадь импульса давления, определяемая некоторой плавной огибающей, в большей степени влияет на деформацию заготовки.

## Заключение

Выполнено сопоставление результатов компьютерных расчетов с применением КЭ комплекса LS-DYNA с экспериментальными данными по оценке давления на подвижной деформируемой заготовке в условиях электрогидроимпульсной штамповки. Показаны особенности близости результатов и их отличие.

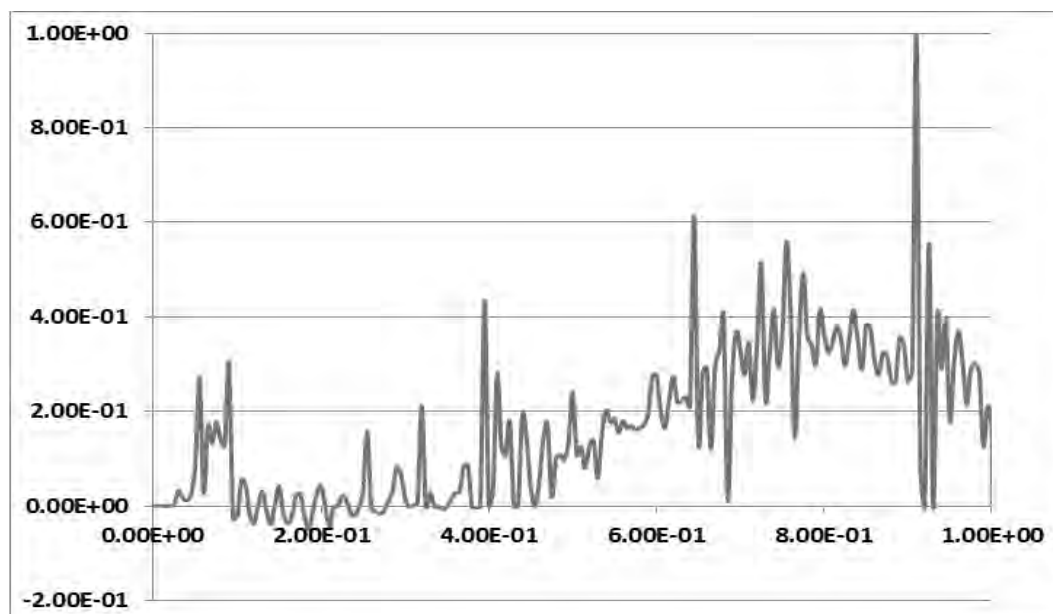


Рисунок 2 – Компьютерный расчет нормированного давления в центральной точке заготовки

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Здор Г.Н., Исаевич Л.А., Качанов И.В. Технологии высокоскоростного деформирования металлов. - Минск: Изд-во БНТУ, 2010. - 456 с.
2. Тараненко М.Е. Электрогидравлическая штамповка: теория, оборудование, техпроцессы. - Харьков: ХАИ, 2011. - 272 с.
3. Golovashchenko S., Mamutov V. Electrohydraulic Forming of Automotive Panels // Sixth Global Innovations Symposium: Trends in Materials and Manufacturing Technologies for Transportation Industries / Proc. of TMS. SanFrancisco, 2005. - P.65-70.
4. Чачин В.Н. Электрогидроимпульсная обработка машиностроительных материалов. - Минск: Изд-во Наука и техника, 1978. - 184 с.
5. Кривицкий Е.В. Динамика электровзрыва в жидкости. - Киев: Изд-во «Наукова думка», 1986. - 208 с.
6. Hallquist J.O. LS-DYNA theoretical manual. Livermore Software Technology Corporation: Livermore, CA, 2006, 498 p.
7. Alexander V. Mamutov, Sergey F. Golovashchenko, Viacheslav S. Mamutov, John J.F. Bonnen, Modeling of electrohydraulic forming of sheet metal parts. Journal of Materials Processing Technology, 219, pp. 84-100 (2015)
8. Вагин В.А., Здор Г.Н., Мамутов В.С. Методы исследования высокоскоростного деформирования металлов. - Минск: Наука и техника, 1990. - 208 с.
9. Богомоллов А.И., Михайлов К.А. Гидравлика. М.: Стройиздат, 1965. - 632 с.



Е.Л. Левашова, М.М. Радкевич, М.В. Яковицкая  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Санкт-Петербург, Россия, [l\\_ekaterina\\_1@mail.ru](mailto:l_ekaterina_1@mail.ru)

## ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА СЛОЖНОПРОФИЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ЛИСТОВОГО МЕТАЛЛА МЕТОДОМ СВОБОДНОЙ ГИБКИ

### Аннотация

В работе рассматриваются вопросы, которые связаны с улучшением качества изделий сложного профиля, получаемые методом свободной гибки на листогибочном прессе. В настоящее время считается, что гибка листового металла сложнопрофильных деталей должна выполняться на штампах для обеспечения точности размеров. Но если разрабатывать для каждой детали специальные штампы, то снизится скорость производства, увеличится себестоимость изделий, а также будет отсутствовать универсальность использования оснастки, что приведет к большим производственным потерям. На данный момент существуют САЕ-программы для автоматизации производства, которые на основе предела прочности материала, толщины материала и плотности материала подбирают оснастку из каталога и рассчитывает развертку для заготовительного участка. Но на точность получаемой детали влияет еще большое количество факторов, которые могут отрицательно сказаться при использовании автоматически созданного технологического процесса без отработки на участке перед запуском в серию.

*Ключевые слова:* листовая штамповка, воздушная гибка, свободная гибка, автоматизация, технологический процесс.

### Введение

Гибка металла – один из самых популярных способов обработки металлопроката. Благодаря ей можно получить самые разные формы изделий, востребованных в любом виде промышленности, строительстве, в вентиляционных системах, в системах водоснабжения, газовых трубопроводах, в быту.

При гибке заготовок необходимо придерживаться технологии, исключающей образование трещин на поверхности и возникновение складок. [1]

В настоящее время разработка технологического процесса гибки листового металла заключается в подборе оснастки, разработке последовательности операций при гибке, а также расчета развертки заготовки.

Гибочная операция методом свободной гибки имеет особенность, которая отличает её от других операций гибки, например, гибка в штампе. Если гибке подвергается металлический лист, имеющей малую или среднюю пластичность то направление волокон в листе будет влиять на конечный результат. Когда изгиб осуществляется поперек волокон риск разрушения при обработке будет стремиться к нулю. Если гнуть лист вдоль волокон, то возрастает риск образования трещин. Такой риск весьма серьезен: расслаивание считается дефектом, исправить который невозможно.

Для того, чтобы обеспечить точность размеров детали на производстве разрабатывают технологический процесс, экспериментально проверяется технология и при необходимости вносятся уточнения. За счет этого этапа происходит потеря

времени, и это влечет за собой значительное повышение трудоемкости при внедрении новой технологии, а также приводит к увеличению себестоимости изготовления детали.

В силу того, что увеличивается подготовительное время на разработку правильного технологического процесса растет влияние компетенции специалиста на итоговый результат. Или, зачастую, ведет к отказу от проработки технологического процесса сложных деталей с использованием универсальных инструментов в пользу специальных штампов, что значительно увеличивает себестоимость процесса и увеличивает сроки изготовления специальной оснастки.

### **Методы**

Данная работа посвящена рассмотрению влияния исходного материала, толщины листа, внутреннего и внешнего радиусов гибки, а также текстуры деформации проката, скоростигиба на точность получаемого изделия при операции гибки. Полученная информация является очень важной при разработке технологических процессов изготовления сложнопрофильных изделий с использованием автоматизированного комплекса MetamationFlux. В данном комплексе применяется трехмерное автономное программирование, которое дает возможность надежно управлять процессом разработки технологии процесса гибки. При этом полностью исключается предварительная тестовая оценка и экспериментальная проверка правильности разработки техпроцесса гибки. Применение автоматизированного комплекса позволят сократить время и уменьшить трудоемкость от проектирования процесса до его практической реализации в производство.

Использование программы MetamationFlux может обеспечить процесс автоматического подбора гибочного инструмента, исключая этап экспериментальной отработки и благодаря учету физико-механических свойств используемого металла и особенностей последовательности переходов при гибке обеспечивать высокое качество деталей.

### **Результаты и обсуждение**

На конечный результат свободной гибки оказывают влияние такие параметры процесса, как предельный радиусгиба, толщина листа, направление волокон металла (текстура), механические свойства, допустимое отклонение конфигурации готовой детали, которые следует учитывать при разработке технологического процесса.

В связи с отсутствием в настоящее время возможности автоматизированного учета всех параметров, влияющих на точность изготовления изделия гибкой этап подготовки технологического процесса достаточно трудоемок. Поскольку требуется дополнительно оборудование производственное, на котором отрабатывается экспериментально на технологичность изделие.

Следует отметить, что при моделировании технологического процесса вводятся исходные параметры описывающие физико-механические свойства, характеристики листа, которые затем автоматически используются при разработке процесса свободной гибки, что приводит к ускорению процесса подбора инструмента, обеспечивая при этом высокую точность деталей со сложным профилем.

Имеется два важнейших параметра, влияющих на размеры детали после гибки. К ним следует отнести в первую очередь обратное пружинение детали и уменьшение площади поперечного сечения листа в месте изгиба [2].

Величина упругих деформаций при гибке характеризуется углом пружинения, представляющим собой разность между величиной угла детали после гибки и величиной угла в штампе (Рис.1).

Пружинения при гибке зависит от многих факторов, основными из которых являются механические свойства материала — чем выше модуль упругости и чем тверже материал, тем больше угол пружинения и отношение радиуса гибки к толщине материала, тем больше угол пружинения.

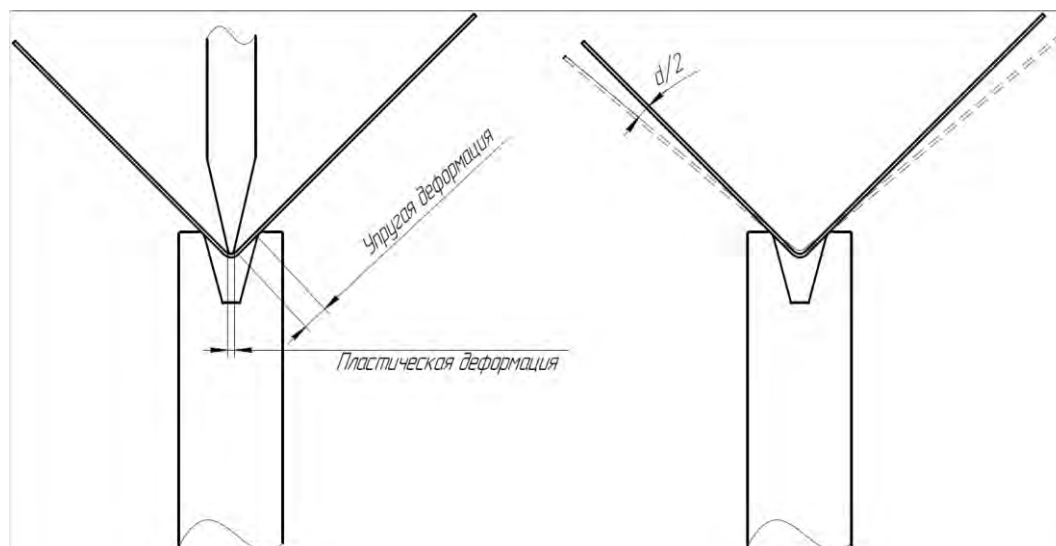


Рисунок 1 – Схема гибки с указанием видов деформации

В процессе гибки листового металла внешний радиус увеличивается, а внутренний — уменьшается [3], происходят два вида деформации. В точке соприкосновения рабочей части пуансона с деталью происходит пластическая деформация, что сопровождается упрочнением металла. В местах, где отсутствует соприкосновение рабочей части пуансона с деталью, происходит упругая деформация, которая заставляет деталь вернуться в исходное состояние. За счет этого происходит пружинение металла после того, как снимается нагрузка.

Лист металла по длине может отличаться как по толщине, так и по свойствам. Так как в большинстве случаев пружинение детали положительно, т. е. угол детали получается больше угла штампа, то при проектировании угол штампа должен быть взят меньше угла детали. Поэтому не редко корректировка технологического процесса гибки требуется даже внутри одной партии металла.

Упругие деформации, происходящие при гибке, искажают форму детали, изменяют ее размеры и вызывают необходимость дополнительных операций правки. Величина упругих деформаций при гибке характеризуется углом пружинения, представляющим собой разность между величиной угла детали после гибки и величиной угла в штампе. Для того чтобы компенсировать обратное пружинение, гибку делают с более острым углом.

Основные факторы, влияющие на пружинение металла:

1. Свойства материала. Угол пружинения тем больше, чем выше предел прочности на растяжение. Если сравнивать, например, гибку тонколистовой меди и стали то градус пружинения который нужно иметь в виду на компенсацию у меди будет  $0,5^\circ$ , а у стали  $1^\circ$ . Нержавеющая сталь же может превысить  $2^\circ$  на компенсацию.

2. Толщина листа. Пружинение выше, чем толще металл. Поэтому чтобы обеспечить угол  $90^\circ$  на стали 3 и толщине металла 1 мм используют угол в  $88^\circ$ , чтобы после возвращения пуансона в исходное положение, деталь за счет остаточной деформации приняла угол  $90^\circ$ .

3. Скорость перемещения инструмента относительно детали. При медленной скорости перемещения пуансона относительно детали, происходит снятие остаточных напряжений, которые влияют на остаточную деформацию.

4. Радиус гибки. Чем ближе радиус гибки к толщине металла, тем меньше остаточная деформация. Чем меньше раскрытие матрицы и радиус пуансона, тем больше площадь прилегания рабочих частей оснастки к заготовке и, тем меньше упругая деформация. С уменьшением воздействия упругой деформации уменьшается остаточная деформация.

5. Направление прокатки создает волокна в структуре. При совпадении линии проката с линиейгиба угол пружинения будет минимальным. [4] Но сложнопрофильные подвергаются гибке, как поперек, так и вдоль волокон. Следует при автоматическом подборе инструмента учитывать направление проката, чтобы обеспечить минимальное пружинение металла на исполнительных размерах.

6. Также на точность гибки влияет точность настройки оси Y траверсы станка, формирующей угол гибки (Рис.2) [5].

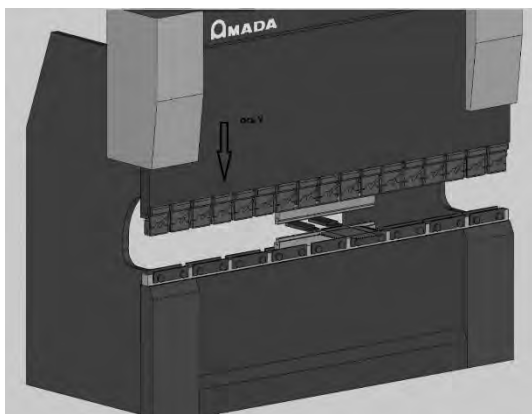


Рисунок 2 – Гибочная операция на станке с перемещением траверсы по оси Y

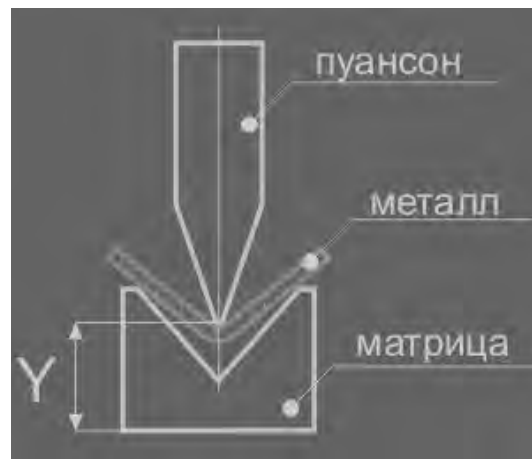


Рисунок 3 – Схема гибочной операции

Траверса с помощью пуансона вдавливают лист на выбранную глубину по оси Y V-образную полость матрицы. Заготовка точно соприкасается с полками матрицы и не соприкасается со стенками матрицы. Это означает, что угол гибки определяется положением пуансона по оси Y, а не геометрией гибочного инструмента, как в случае штамповки (Рис. 3)

Точность настройки оси Y на современных прессах – 0,01 мм.

Приведенная ниже таблица 1 показывает отклонение угла гибки от  $90^\circ$  при различных отклонениях оси Y.

На данный момент программы САПР, которые осуществляют подбор инструмента, учитывают геометрию детали, но не учитывают все вышеприведенные факторы, для компенсации остаточной деформации.

Таблица 1 – Отклонение угла гибки от 90° при различных отклонениях оси

$\alpha, ^\circ$ V, мм	1°	1,5°	2°	2,5°	3°	3,5°	4°	4,5°	5°
4	0,022	0,033	0,044	0,055	0,066	0,077	0,088	0,099	0,11
6	0,033	0,049	0,065	0,081	0,097	0,113	0,129	0,145	0,161
8	0,044	0,066	0,088	0,11	0,132	0,154	0,176	0,198	0,22
10	0,055	0,082	0,11	0,137	0,165	0,192	0,22	0,247	0,275
12	0,066	0,099	0,132	0,165	0,198	0,231	0,264	0,297	0,33
16	0,088	0,132	0,176	0,22	0,264	0,308	0,352	0,396	0,44
20	0,111	0,166	0,222	0,277	0,333	0,388	0,444	0,499	0,555
25	0,138	0,207	0,276	0,345	0,414	0,483	0,552	0,621	0,69
30	0,166	0,249	0,332	0,415	0,498	0,581	0,664	0,747	0,83
45	0,25	0,375	0,5	0,625	0,75	0,875	1	1,125	1,25
55	0,305	0,457	0,61	0,762	0,915	1,067	1,22	1,372	1,525
80	0,444	0,666	0,888	1,11	1,332	1,554	1,776	1,998	2,22
100	0,555	0,832	1,11	1,387	1,665	1,942	2,22	2,497	2,775

В данной статье рассматривается высокотехнологичная программа, применяемая на оборудовании для свободной гибки - MetamationFlux. В программе происходит автоматический подбор инструмента, рассчитывается развертка в зависимости от выбранной оснастки (Рис. 4).

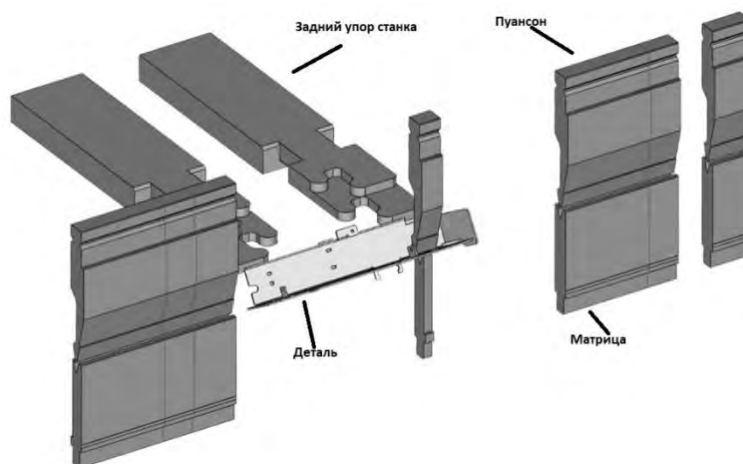


Рисунок4 – Эскиз технологического процесса гибки из программы MetamationFlux

Расчет развертки в программе происходит в зависимости от К-фактора (коэффициента смещения условного нейтрального слоя), который вычисляется экспериментально, либо его можно рассчитать по формуле (1).

Так как нейтральный слой всегда смещен к центру изгиба (в сторону сжатых волокон), то всегда  $0 < K \leq 0,5$ . Замечено, что К-фактор зависит от отношения внутреннего радиуса гибки R к толщине металла s (1):

$$K = \frac{R}{s} \quad (1)$$

К-фактор в программе можно принять самостоятельно, либо воспользоваться рекомендуемыми из программы MetamationFlux в зависимости от марки материала (Рис. 5)



Рисунок5– Значения К-фактора в программе Metamotion Flux при разработке технологического процесса

### Заключение

В работе рассмотрены факторы, влияющие на результат процесса свободной гибки листовой детали. Отмечены параметры, оказывающие заметное влияние на процесс изготовления листовой детали методом свободной гибки, а именно, направление прокатки исходного листа и свойства материала, в частности, предел прочности на растяжение, листовой заготовки.

Предложена методика проектирования технологического процесса изготовления изделий со сложным профилем из листового материала методом свободной гибки с учетом отмеченных параметров с помощью программы MetamotionFlux для обеспечения более высокого качества получаемых деталей.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жарков В.А. Перспективы экономии металла в листоштамповочном производстве. Кузнечно-штамповочное производств. - 1991. - №12.-С.7-11
2. Лысов М.И. Теория и расчет процессов изготовления деталей методами гибки. - М.: Машиностроение, 1966. - 236 с.
3. 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
4. Ковка и штамповка: справочник. В 4 т. Т. 1. Материалы и нагрев. Оборудование. Ковка. - 2Ве изд., перераб. и доп. / под общ. ред. Е.Н. Семенов ва. — М.: Машиностроение, 2010. - 717 с.: ил.
5. Шинкин В.Н. Сопротивление материалов для металлургов [текст]/ В.Н. Шинкин. - М.: Изд. Дом МИСиС. 2013. - 655 с.

М.М. Радкевич, Н.В. Дмитриев  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого  
Россия, Санкт-Петербург, valera.dmitriev2014@yandex.ru

## ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПОКОВОК ГОРЯЧЕЙ ОБЪЕМНОЙ ШТАМПОВКОЙ

### **Аннотация.**

Разработан технологический процесс получения высокоточных поковок двух переходной горячей объемной штамповкой в закрытом штампе, методом горячего выдавливания. Разработаны чертежи поковок, карты операционных переходов горячего выдавливания на кривошипном горячештамповочном прессе КГШП).

С использованием построенных 3D моделей оснастки проведено компьютерное моделирование.

*Ключевые слова:* Высадка, штамповка, горячее выдавливание, Deform 3D, компьютерное моделирование, коэффициент использования материала.

В настоящее время в области обработки металлов давлением наиболее распространенным вариантом получения поковок является облойная штамповка. Облойная штамповка проста в получении поковок, разработке необходимой оснастки, а также отличается высокой производительностью. Но при использовании метода штамповки с облоем есть множественные недостатки, такие как: низкий коэффициент использования металла, большие припуски на механическую обработку, что в последствие приводит к большим затратам на режущий инструмент, трудоемкость, низкую точность поковок.

Безоблойная штамповка (штамповка в закрытых штампах) применяется для получения точных поковок, имеющих форму тел вращения, а также для заготовок деталей сложной формы. К штамповке в закрытых штампах относится горячее выдавливание. Данный способ штамповки является экономичным и позволяет получать точные поковки с минимальным объемом последующей обработки резанием. Окончательный штамповочный ручей представляет собой замкнутую полость и поэтому объем исходной заготовки отличаться от объема готовой поковки лишь на величину угара металла. Уменьшение коэффициента расхода металла является основным преимуществом данного техпроцесса.

Поскольку стоимость металла постоянно растет, а, следовательно, и себестоимость изделия, применение методов горячей объемной штамповки, обеспечивающих высокую точность поковок с высоким коэффициентом использования материала является актуальной проблемой. Наиболее подходящим вариантом в данном случае является горячее выдавливание в закрытых штампах. Так как горячее выдавливание, в настоящее время, мало распространено на предприятиях заготовительного производства, необходимо было на начальном этапе разработки технологии получения поковки произвести компьютерное моделирование. За основу проработки технологии получения поковки горячим выдавливанием была взята деталь «Корпус реза шнекового» изображенная на рис.1.

Моделирование осуществляли с целью изучения заполнения ручьев штампа, наличие трещин на поковке, определения необходимого технологического усилия штамповочного оборудования (КГШП)

Моделирование проводили по двухручьевой штамповке. Поскольку отношение высоты заготовки ( $h_{зг}$ ) к диаметру ( $d_{зг}$ ) исходной заготовки равно

$h_{зг}/d_{зг} = 2,5$ , что чревато потерей устойчивости при осадке заготовки, вызвало необходимость применения предварительного ручья.

Первый ручей - предварительный позволяет уменьшить износ окончательного ручья. В нем поковке придается форма, близкая к окончательной на отдельных участках поковки, благодаря чему обеспечивается устойчивое положение (центровка) осажённой заготовки в окончательном ручье.

Второй ручей – окончательный закрытый штамповочный ручей предназначен для получения окончательной поковки необходимой формы и размеров. При штамповке в закрытых штампах во избежание недозаполнения полости ручья металлом, исходная заготовка должна иметь некоторый избыточный объем и, поэтому в окончательном ручье предусмотрен компенсатор.

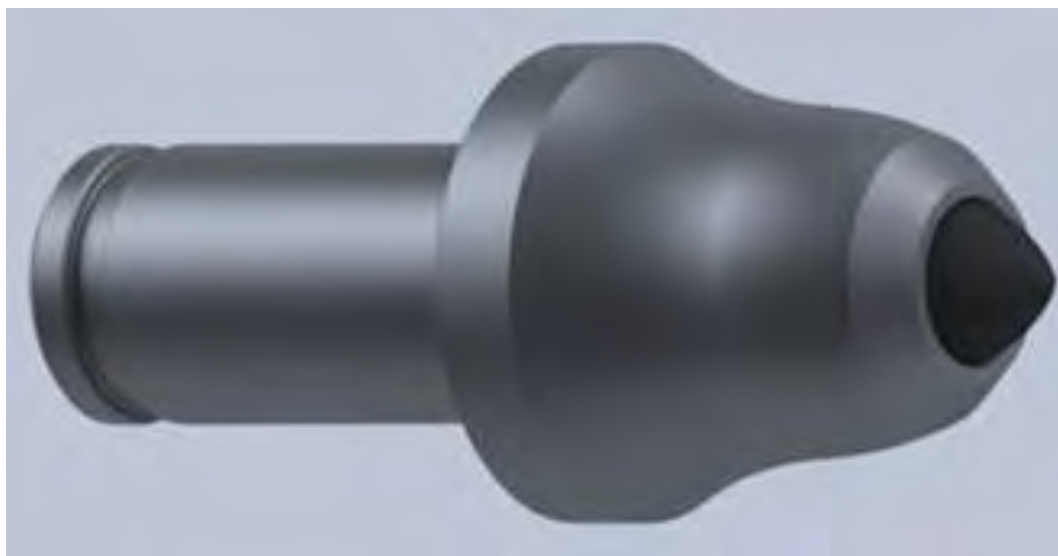


Рисунок 1 – Резец шнековый

Даная деталь в настоящее время изготавливается методом высадки головной части на гидравлическом прессе, что приводит к повышенному радиальному биению головки относительно хвостовика, а, следовательно, увеличивает объем механической обработки за счет больших припусков.

При изготовлении заготовки для этой детали методом горячего выдавливания, радиальное биение исключается в силу того, что формообразование заготовки происходит в закрытой полости штампа. Вследствие того, что пуансон заходит в матрицу, образуя закрытую полость ручья штампа перед формообразованием поковки. При этом не только исключается радиальное биение, но нет необходимости назначения больших припусков на механическую обработку и, как следствие, приводит к повышению коэффициента использования металла и точности размеров поковки.

Разработка технологии горячего выдавливания заключалась с выполнения поковочного чертежа (рис.2) и 3D модели штамповой оснастки.



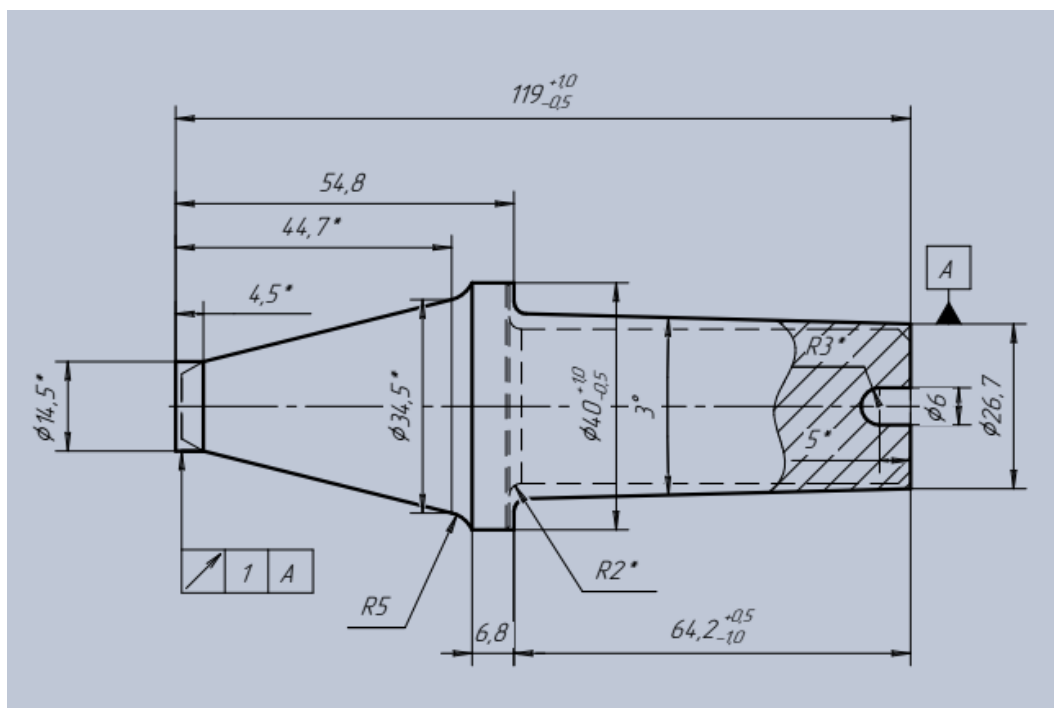


Рисунок 2 – Чертеж поковки

Моделирование процесса горячего выдавливания выполняем на натурной поковке (Рис.2) из стали 35 ХГСА с использованием пакета Q-FORM. За исходные параметры расчета были выбраны скорость штамповки 5,0м/с, которая соответствует скорости деформирования КГШП. В качестве исходной заготовки выбран сортовой прокат диаметром 30мм и высотой 103мм из стали марки DIN-41Cr4[1450-2200F (800-1200<sup>0</sup>С)], аналог 35ГХСА по химическому составу и механическим свойствам.

Для проведения КЭ расчетов были заданы следующие данные:

1. Задаем размеры исходной заготовки диаметром 30мм и высотой 103мм.
2. Назначаем температуру нагрева заготовки 1230<sup>0</sup>С.
3. Для моделирования используем ранее разработанные 3D модели матриц и пуансонов предварительного и окончательного ручьев штампа.

Ниже представлены результаты компьютерного моделирования:

Первый ручей. Заготовку осаживаем до высоты 71–73 мм и диаметра 39 – 40мм, используя пуансон и матрицу предварительного ручья. На рис. 3 – а), б) приведены результаты моделирования – форма поковки до осадки и после осадки.

Перемещаем заготовку из первого ручья штампа во второй.

Второй ручей. Устанавливаем заготовку после осадки в окончательный ручей головкой (конической частью), что обеспечивает ее центрирование в ручье штампа относительно пуансона. На рис. 4 показано положение заготовки в окончательном ручье.

На рис.5 показана поковка после формообразования в окончательном ручье.

Результаты компьютерного моделирования показали, что температура заготовки не выходит за температурный интервал, возникающие напряжения не превышают предельно допустимых, окончательный ручей полностью заполняется, а усилие составляет 0,17 МН.

Опытная штамповка.

Опытную штамповку поковок проводили в лаборатории Высшей школы машиностроения Санкт-Петербургского политехнического университета Петра

Великого на гидравлическом прессе модели П6334Б усилием 0,25 МН. На рис.6 показана поковка, полученная выдавливанием в закрытом штампе из свинцовой заготовки.

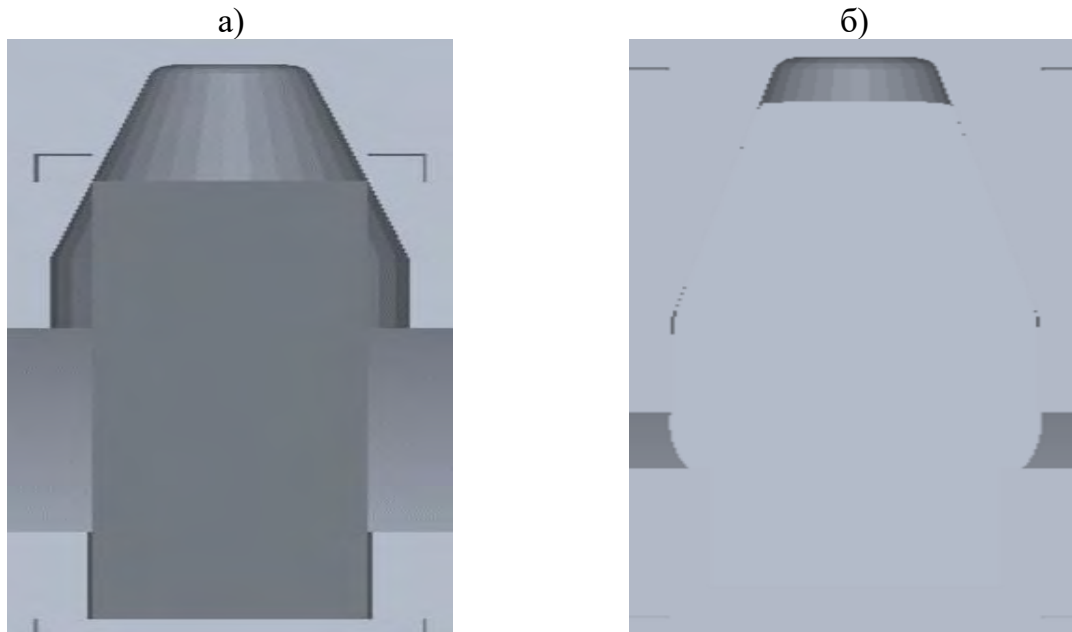


Рисунок 3 – Форма заготовки: а) до осадки; б) после осадки



Рисунок 4 – Положение заготовки в окончательном ручье

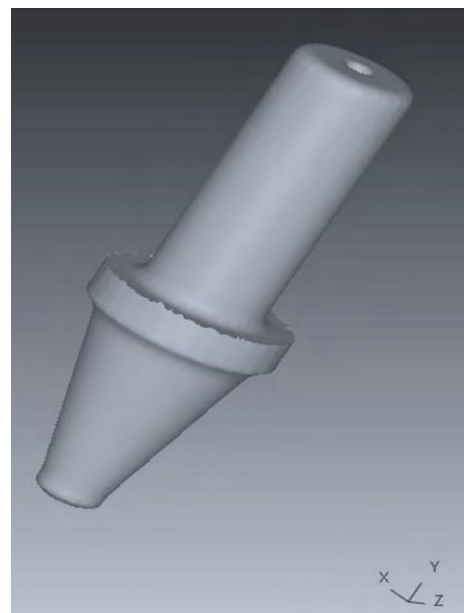


Рисунок 5 – Форма поковки после окончательной штамповки

### Заключение

Компьютерное моделирование технологического процесса объемной штамповки в закрытых штампах (горячим выдавливанием) и опытная штамповка поволоков корпуса из свинца в лабораторных условиях показали, что данная технология с успехом может быть использована в заводских условиях для изготовления подобной номенклатуры на КГШП.



Рисунок 6 – Свинцовая поковка, изготовленная методом горячего выдавливания

Использование технологического процесса штамповки поковок выдавливанием позволяет снизить металлоемкость и сократить трудоемкость последующей механической обработки заготовок за счет сокращения операционных отходов, повышения точности размеров и максимального приближения формы поковки к чистой детали.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ковка и штамповка: справочник: в 4 т. / редсовет: Е. И. Семенов [и др.]. 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Машиностроение, 2010. [Т].
2. Горячая объемная штамповка / [А.П. Атрошенко [и др.]]; под ред. Е.И. Семенова. - 719 с.: ил.
3. Q-Form 2D/3D - программный комплекс для моделирования и оптимизации процессов обработки металлов давлением. Программа основана на методе конечных элементов, разрабатывается фирмой «КванторФорм» (Россия). Разработка комплекса началась в 1991 году с выпуска программы FORM-2D [1].
4. Биба Н.В., Лишний А.И., Стебунов С.А. Расчёт инструмента и технологии прессования профилей с помощью программы Q-Form // Цветные металлы. - 2009. - № 10. - С. 83-87. - ISSN 0372-2929.
5. Серяков Е. И. Материаловедение. Технология конструкционных материалов. Производство заготовок: учеб. пособие / Е.И. Серяков, М.М. Радкевич, В.П. Третьяков; под ред. Е.И. Серякова. - СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. - 191 с.

К.В. Лепетан, П.А. Кузнецов, А.О. Просторова  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Санкт-Петербург, Россия, [lepetan\\_k@mail.ru](mailto:lepetan_k@mail.ru)

## ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛАСТОСТАТИЧЕСКОГО ПРЕССОВАНИЯ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ПРОФИЛИРОВАННЫХ ТРУБЧАТЫХ ЗАГОТОВОК ИЗ ПОРОШКОВ

### Аннотация

В работе предложена технология изготовления профилированных заготовок из порошков методом эластостатического прессования для последующего уплотнения и формообразования с целью получения высокоплотных деталей конструкционного назначения. Эластостатическое прессование позволяет снизить затраты на предварительные операции по профилированию заготовок за счет низкой стоимости оснастки и применения групповой технологии. В качестве способа последующего уплотнения спеченной заготовки рассмотрен комбинированный процесс дорнования и осадки в закрытой матрице.

*Ключевые слова:* эластостатическое прессование, порошки, пластическая деформация, пресс-форма.

### Введение

При изготовлении деталей методами обработки давлением обычно используется продукция металлургического производства – прокат, профиль и т. д. Значительные допуски, с которыми такая продукция изготавливается, влияют на величину припусков, с которыми штампуются поковки. Для реализации процессов малоотходной штамповки, в том числе безоблойной, используются прессованные профили, холоднокатанные трубы, что позволяет повысить коэффициент использования материала [1, 2]. Дальнейшее повышение коэффициента использования материала снижением трудоемкости обеспечивает использование точных профилированных заготовок, получаемых, например, из металлических порошков [3, 4]. Применение профилированных заготовок уменьшает, а в ряде случаев ликвидирует начальные операции осадки и предварительной штамповки и позволяет сразу проводить окончательную операцию формования.

Прессование точных заготовок из порошков на прессах автоматах не всегда экономически целесообразно, поэтому в ряде случаев более эффективно использовать способы прессования подвижными средами, в частности, эластостатическое прессование (ЭСП) [5, 6]. Использование эластичных сред позволяет получать изделия с коническими, криволинейными наружными и внутренними поверхностями, поэтому предварительную заготовку можно спрессовать по форме, максимально отвечающей условию бездефектного окончательного прессования высокоплотного изделия.

### Методы

Анализ возможностей ЭСП рассмотрим на примере прессования втулки с фланцем. В жесткой пресс-форме такие изделия прессуются на специальных автоматах с тремя независимо двигающимися пуансонами [3]. Прессование заготовки в

виде втулки с фланцем из порошка методом ЭСП можно осуществить на универсальном гидравлическом прессе [4]. При эластостатическом прессовании уплотнение порошка происходит путем уменьшения объема камеры засыпки как в осевом, так и в радиальном направлениях, следовательно, коэффициент уплотнения должен рассчитываться как отношение объемов. Так как плотность прессовки по объему при квазиизостатическом прессовании практически равномерна, то можно коэффициент уплотнения рассчитывать в каждой выделенной части прессовки отдельно. Расчетная схема проектирования камеры засыпки для ЭСП втулки с фланцем представлена на рисунке 1.

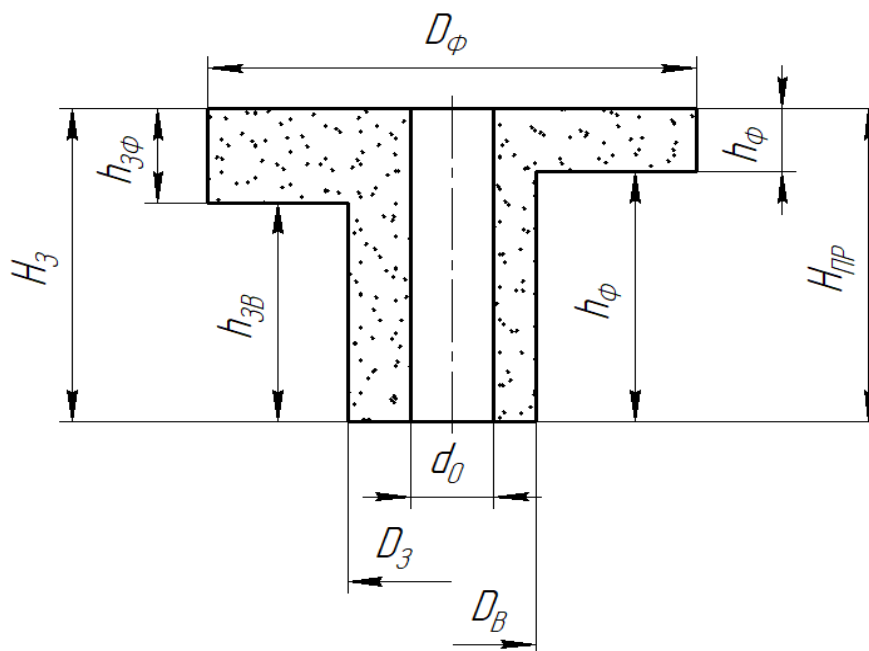


Рисунок 1 – Расчетная схема проектирования камеры засыпки для ЭСП втулки с фланцем: а – эскиз сечения камеры засыпки, б – эскиз сечения прессовки.

Объем прессовки целесообразно представить в виде суммы объемов фланца и втулочной части :  $V_{\Pi} = V_{\Phi} + V_B$

$$V_{\Pi} = \frac{\pi}{4} (D_{\Phi}^2 - d_0^2) \cdot h_{\Phi} + \frac{\pi}{4} (D_B^2 - d_0^2) \cdot h_B, \quad (1)$$

где:  $D_{\Phi}$  – диаметр фланца;  $h_{\Phi}$  – высота фланца;  $d_0$  – диаметр отверстия;  $D_B$  – диаметр втулки;  $h_B$  – высота втулки;

Объем камеры засыпки, в соответствии с рисунком 1а:  $V_3 = V_{3\text{ фланца}} + V_{3\text{ втулки}}$

$$V_3 = \frac{\pi}{4} (D_{3\Phi}^2 - d_0^2) \cdot h_{3\Phi} + \frac{\pi}{4} (D_{3B}^2 - d_0^2) \cdot h_{3B} \quad (2)$$

где:  $D_{3\Phi}$  – диаметр засыпки фланца;  $h_{3\Phi}$  – высота засыпки фланца;  $D_{3B}$  – диаметр засыпки втулки;  $h_{3B}$  – высота засыпки втулки.

Уплотнение фланца при выбранной схеме ЭСП происходит преимущественно в осевом направлении, а уплотнение втулочной части – в радиальном направлении, что обеспечивает практически однородную плотность по всему объёму. Коэффициент

необходимого уплотнения определяется из уравнения уплотнения для прессуемого порошка  $\theta_{пр} = \theta_{нас} + ap^b$ ,  $\theta_{пр}$  – относительная плотность прессовки,  $\theta_{нас}$  – относительная плотность порошка во время засыпки;  $a$ ,  $b$  – коэффициенты;  $p$  – давление прессования. Тогда коэффициент уплотнения  $K_y = \frac{\theta_{пр}}{\theta_{нас}}$ . Следовательно, высота засыпки фланца  $h_{зф} = h_{ф} K_y$ . Диаметр камеры засыпки для втулочной части:

$$D_3 = \sqrt{K_y \cdot \frac{h_B(D_B^2 - d_0^2)}{H_{пр} - h_{зф}} + d_0^2} \quad (3)$$

Приведенный расчет наряду с чертежом детали и техническим заданием являются основой для проектирования пресс-формы. На рисунке 2 показана принципиальная схема ЭСП втулки с фланцем.

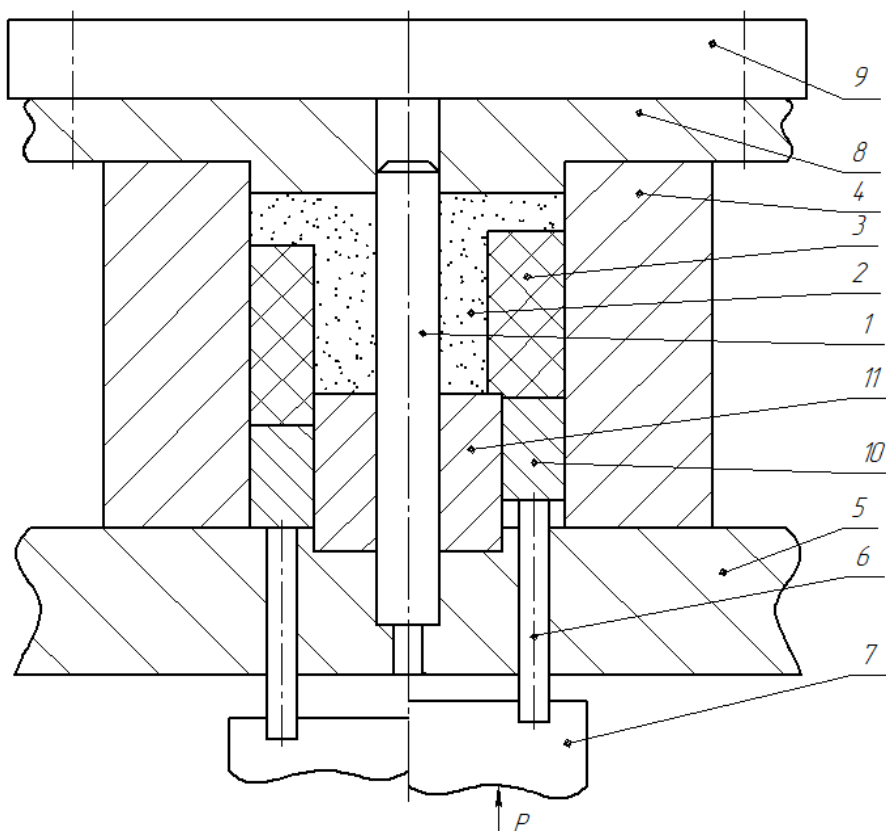


Рисунок 2 – Принципиальная схема ЭСП втулки с фланцем: 1 – оправка, 2 – прессовка, 3 – эластичная матрица, 4 – обойма, 5 – плита, 6 – толкатель, 7 – плунжер гидравлического пресса, 8 – верхняя плита, 9 – траверса, 10 – пуансон, 11 – опора.

Прессование осуществляется следующим образом. На нижней плите 5 устанавливают обойму 4, вставляют в нее опору 11 с оправкой 1, пуансоном 10 и эластичную матрицу 3. В собранную пресс-форму засыпают в камеру засыпки порошок с массой, равной массе готовой прессовки. Камеру засыпки замыкают верхней плитой 8 при опускании траверсы 9. Усилие от плунжера 7 гидравлического пресса передается толкателями 6 на пуансон 10 и далее на эластичную матрицу 3. Давление, созданное в эластичной среде, передается на порошок и уплотняет как

фланцевую, так и втулочную часть прессовки 2. После окончания прессования траверса с верхней плитой поднимаются, полученная прессовка извлекается из обоймы и спекается по стандартному режиму.

Прессовки, полученные методом ЭСП, в ряде случаев после спекания и калибрования могут представлять собой готовые изделия самого широкого назначения. Относительная плотность прессовок достигает 0,80 – 0,85. Большой интерес они представляют в качестве профилированных точных заготовок для дальнейшей пластической обработки, например, повторного прессования, выдавливания горячего динамического прессования, раскатки и т. д.

### **Результаты и обсуждение**

С целью получения высокоплотного изделия профилированную заготовку, полученную ЭСП, после спекания можно подвергнуть дальнейшей пластической деформации. Тонкостенную втулочную часть изделия лучше деформировать в радиальном направлении, например, использовать дорнование в закрытой матрице, а фланец уплотнять осадкой в закрытой матрице. Для уменьшения трудоемкости указанные операции можно совместить. На рисунке 3 показана принципиальная схема устройства для совмещенного дорнования и осадки в закрытой матрице детали «втулка с фланцем».

Устройство работает следующим образом. Профилированную спеченную заготовку 1 помещают в разъемную матрицу 3. При движении составного пуансона, закрепленного на траверсе 5, внутренний пуансон 2 (дорн) перемещается по оправке 8 и своей конической частью деформирует втулочную часть заготовки 1 в радиальном направлении. На последующем этапе внешний пуансон 4 входит в обойму 6 и уплотняет фланец заготовки путем его осадки. По окончании процесса оснастку разбирают и извлекают готовое изделие. Относительная плотность изделий, получаемых по описанной технологии, составляет 0,95 – 0,97.

Профилированные заготовки из порошков можно получать различными способами. Чаще других используется процесс прессования в жесткой пресс-форме на прессах-автоматах, однако его применение эффективно только в серийном производстве.

Задача повышения плотности, а значит и прочности спеченных конструкционных изделий в настоящее время продолжает быть весьма актуальной. Снижение пористости до 2 – 3% позволяет использовать полученные изделия в качестве не только средненагруженных, но и тяжело нагруженных деталей [5]. При этом большинство процессов пластической обработки спеченных материалов в холодном состоянии обеспечивают требования к качеству машиностроительных деталей [6], например, точность размеров таких деталей соответствует 6 – 7 качеству, а шероховатость поверхности – от Ra 0,32 до Ra 0,08.

Многообразие операций обработки материалов давлением существенно расширяет номенклатуру конструкционных изделий, применяемых в различных областях техники. В сочетании с известными преимуществами порошковой металлургии – высоким коэффициентом использования материала, получением уникальных комбинаций материалов и др., процессы пластической обработки спеченных материалов занимают все более широкое и достойное место среди других прогрессивных технологий.

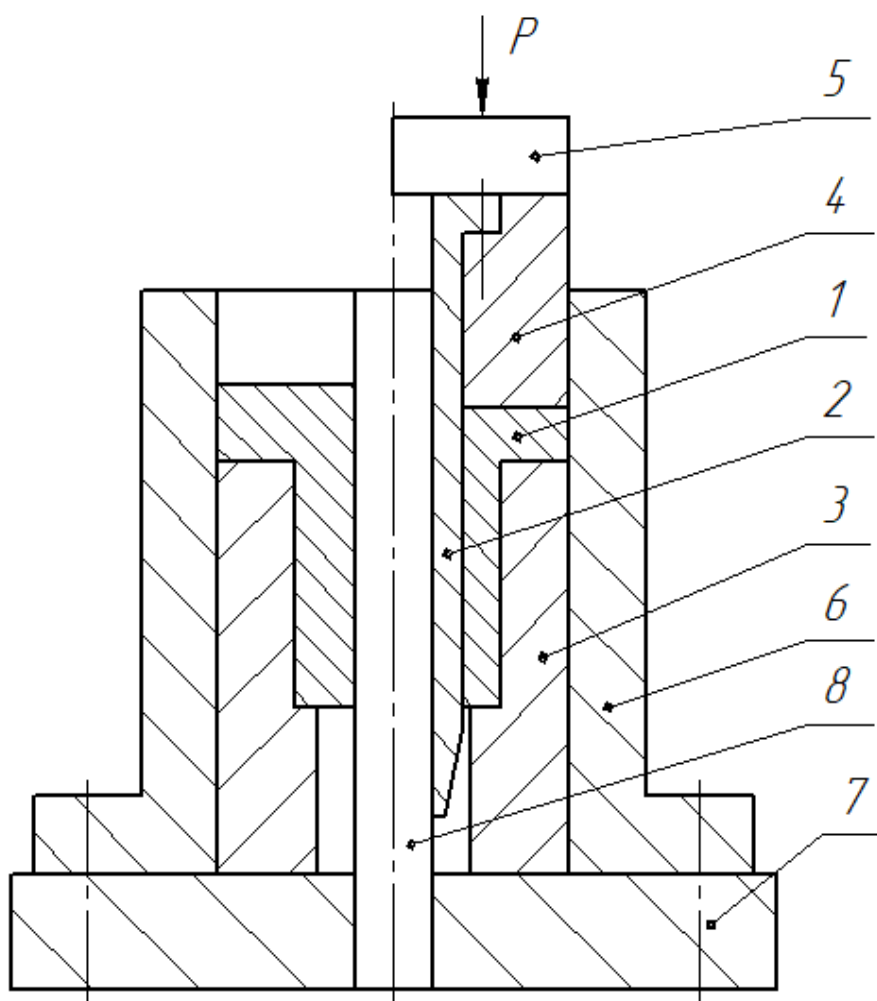


Рисунок 3 – Принципиальная схема устройства для комбинированного процесса дорнования и осадки в закрытой матрице детали «втулка с фланцем»: 1 – спеченная профилированная заготовка, 2 – дорн, 3 – разъемная жесткая матрица, 4 – пуансон, 5 – траверса, 6 – обойма, 7 – плита, 8 – оправка.

### Заключение

Рассмотренная технология получения профилированной порошковой заготовки в эластичной пресс-форме, спекание и последующая пластическая обработка является одной из перспективных технологий изготовления высокоплотных спеченных изделий сложной формы.

Процесс эластостатического прессования можно применять на универсальных гидравлических прессах, поэтому он эффективен даже в мелкосерийном производстве.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Машиностроение. Энциклопедия. Т. III-2: Технологии заготовительных производств. / И.Л. Акаро, Р.А. Андриевский, А.Ф. Аржанов и др.; под общ. ред. В.Ф. Мануйлова. - М.: Машиностроение, 1996. - 736 с.
2. Семенов, Е.И. Ковка и штамповка : справочник. Т. 3: Холодная объемная штамповка. Штамповка металлических порошков / под ред. А.М. Дмитриева. - М.: Машиностроение, 2010. - 348 с.



3. Федорченко, И.М. Порошковая металлургия. Материалы, технология, свойства, области применения: Справочник / И.М. Федорченко, И.Н. Францевич, И.Д. Радомысльский и др. - Киев: Наук. Думка, 1985. - 624 с.

4. Мертенс, К.К. Прессование изделий из порошков подвижными средами / К.К. Мертенс, П.А. Кузнецов // Металлообработка. - 2011. - № 3 (63). - С. 25-30.

5. Кузнецов, П.А. Технология эластостатического прессования и торцевой раскатки высокоплотных спеченных изделий / П.А. Кузнецов, В.П. Третьяков, А.О. Просторова, М.В. Яковицкая // Современное машиностроение: Наука и образование. Матер. 10-й Международ. науч.-практ. конф. - СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС. - 2021. - С. 586-598.

6. Любомудров, С. А. Технологическое обеспечение качества машиностроительного производства / С.А. Любомудров, Д.Ю. Колодяжный, С.Г. Орлов. - СПбПУ, СПб, 2020. - 191 с.

А.А. Курятников, К.С. Арсентьева, В.С. Мамутов  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Санкт-Петербург, Россия, kuriatnikov91@mail.ru

## ЭФФЕКТИВНОСТЬ УСТАНОВКИ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ МАГНИТНО-ЭЛАСТОИМПУЛЬСНОЙ ШТАМПОВКИ

### Аннотация

В работе рассмотрены принципы повышения эффективности установки и технологического устройства для магнитно-эластоимпульсной штамповки применительно к процессу импульсной формовки-вырубке особо тонколистовой заготовки. Рассмотрен подход к определению эффективности технологического устройства для МЭИШ в условиях конкретного технологического процесса путем компьютерного моделирования с применением конечно-элементного комплекса LS-DYNA.

*Ключевые слова:* магнитно-эластоимпульсная штамповка, принципы повышения эффективности установки и технологического устройства, формовка-вырубка особо тонколистовой заготовки, компьютерного моделирования с применением конечно-элементного комплекса LS-DYNA.

### Введение

Штамповка точных деталей приборов из особо тонкого листа и фольгитолщиной менее 0,05...0,1 мм представляет собой сложную техническую задачу. Поэтому часто отказываются от методов традиционной штамповки и применяют более дорогостоящие методы, такие как вакуумное напыление, покрытие требуемого контура защитным составом с последующим травлением и другие. Механические характеристики изделий при этом хуже, чем при штамповке. Одним из способов устранения недостатков штамповки является применение импульсного нагружения, например, комбинирование магнитно-импульсного нагружения на подвижный промежуточный металлический элемент и воздействия этим элементом на эластичную среду, давление которой действует на заготовку [1].

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (бывший Ленинградский политехнический институт), начиная с 1970 года, осуществляет исследование, интенсификацию и разработку технологических схем, использование в промышленном производстве технологических процессов магнитно-эластоимпульсной штамповки (МЭИШ) [2-4]. Технология МЭИШ для сложных по форме точных деталей без заусенцев из тонколистовых и особо тонколистовых металлических и неметаллических материалов, фольги и труб эффективна в условиях мелкосерийного и опытного производства. Данная технология обеспечивает снижение в несколько раз трудоемкости изготовления штамповочной оснастки и сроков подготовки производства по сравнению с использованием жестких инструментальных штампов.

Приведенный ниже рисунок 1 иллюстрирует сущность способа МЭИШ. При электрическом разряде конденсаторной батареи магнитно-импульсной установки (МИУ) на плоский спиральный индуктор 1 в зазоре между спиралью индуктора и подвижным элементом 2 в виде дополнительного механического концентратора

давления, выполненного из материала с высокой электропроводностью, возникает сильное импульсное магнитное поле. При перемещении подвижного элемента под действием электромагнитного усилия в замкнутом контейнере 5 с эластичной средой 4 возникает импульсное давление, действующее на объект деформирования 3 (заготовка с инструментом). В результате осуществляется требуемая технологическая операция формовки или вырубки – пробивки из тонколистового материала, или комбинированная операция. Технологическое устройство для МЭИШ (1 - 5) устанавливается между плитами 6, 7 механического (гидравлического, пневматического) прижима.

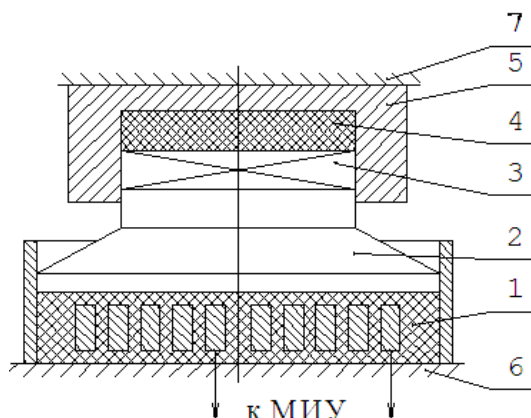


Рисунок 1 – Технологическая схема магнитно-эластоимпульсной штамповки: 1 – плоский спиральный индуктор, 2 – подвижный элемент, 3 – заготовка с инструментом, 4 – эластичная среда, 5 – контейнер, 6, 7 – механический прижим

Одной из наиболее важных проблем, возникающих при проектировании технологических устройств для МЭИШ, является повышение эффективности преобразования энергии, запасенной в конденсаторной батарее МИУ в потенциальную энергию сжатия эластичной среды. Поэтому компьютерное моделирование процесса преобразования энергии или импульсного давления в технологическом устройстве представляет собой одну из главных задач при проектировании технологий МЭИШ. Технологическое устройство для МЭИШ (рисунок<sup>1</sup>) представляет собой сложную электромеханическую систему с распределенными параметрами. В работе [5] выполнено компьютерное моделирование данного процесса при помощи оригинальной разработанной программы. Однако возможность более точного компьютерного моделирования МЭИШ с учетом всех особенностей комплексной задачи появилась только с развитием современной вычислительной техники и таких универсальных научных конечно-элементных комплексов (КЭ), как LS-DYNA [6]. Поэтому целью данного исследования являлось определение подходов к определению эффективности технологического устройства для МЭИШ в условиях конкретного технологического процесса формовки-вырубки особо тонколистовой заготовки путем компьютерного моделирования с применением КЭ комплекса LS-DYNA.

## Методы

Для достижения поставленной цели использовали подход, предложенный в работе [5]. Полагали, что на торец механического концентратора с большим диаметром  $R_1$  действует давление импульсного магнитного поля плоского спирального индуктора, определяемое выражением:

$$p_m(t, r) = p_{m1}(t) \cdot p_{m2}(r).$$

Временная функция  $p_{m1}(t)$  определяется известным соотношением, характерным для давления магнитного поля [7]:

$$p_{m1}(t) = p_0 [\sin(2\pi t/T_0)]^2 \exp(-\delta t/T_0).$$

Здесь  $p_0$  – начальное магнитное давление,  $T_0$  – период,  $\delta$  – логарифмический декремент, которые определяются параметрами разрядного контура МИУ и плоского спирального индуктора. Функция  $p_{m2}(r)$  задавалась таблично (табл. 1) из типовой экспериментальной эпюры распределения магнитного давления для плоского спирального индуктора при частоте разрядного тока 8 кГц.

Таблица 1 – Относительные значения магнитного давления

$r/R_l$	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
$p_{m2}$	0.00	0.10	0.24	0.47	0.71	0.91	1.00	0.97	0.86	0.60	0.32

На другом торце подвижного элемента при компьютерном расчете определялось среднее напряжение  $\sigma_y$ . Перемещение подвижного элемента осуществлялось вдоль оси  $Y$ . Эффективность преобразования импульсного магнитного давления в импульсную технологическую нагрузку можно определить отношением максимальных по времени усилий на торцах подвижного элемента величиной  $\eta_p$ .

Наибольшее влияние на величину  $\eta_p$  в переходных процессах оказывает отношение длительности импульса нагрузки  $T_0$  к характеристическому времени всей системы (безразмерная длительность импульса магнитного давления):

$$\xi_T = T_0 / [2\pi(H_0 + H_e)\sqrt{\rho/E_c}],$$

где  $H_0$  – высота подвижного элемента,  $H_e$  – толщина эластичной среды,  $E_c$  – эквивалентный модуль упругости всей системы, определенный соотношениями, представленными в работе [5].

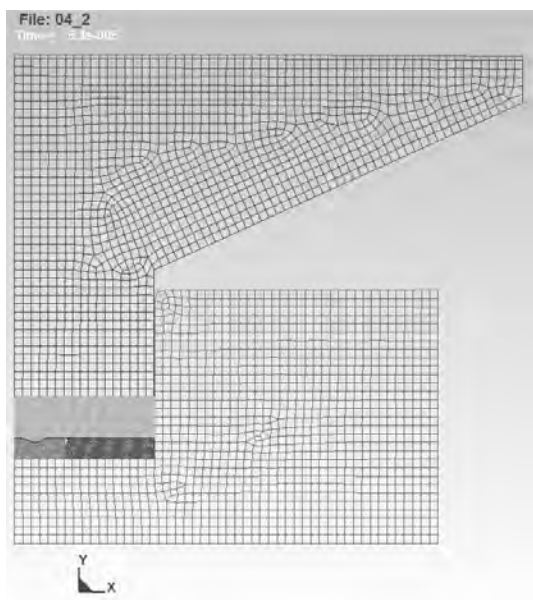
### Результаты и обсуждение

Пример расчета процесса импульсной формовки-вырубki особо тонколистовой заготовки методом МЭИШ представлен на рис. 2. При проведении численного эксперимента рассматривался подвижный элемент из магния, подвижная среда из полиуретана СКУ 7Л толщиной  $H_e = 5$  мм; магнитное давление с параметрами  $p_0 = 100$  МПа;  $\delta = 2,5$ . Период магнитного давления варьировался в пределах  $T_0 \in [10; 1280]$  мкс.

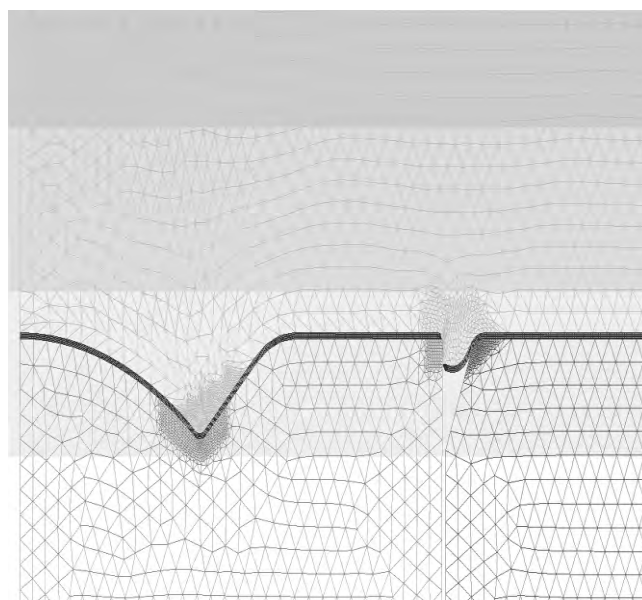
В результате обработки компьютерного эксперимента установлено, что максимальное значение функции  $\eta_p$  для исследуемого технологического процесса достигается в интервале  $\xi_T \in [3.0; 5.0]$ .

### Заключение

Разработаны принципы повышения эффективности установки и технологического устройства для магнитно-эластоимпульсной штамповки применительно к процессу импульсной формовки-вырубki особо тонколистовой заготовки. Определена область параметров технологического устройства, обеспечивающая максимальную эффективность процесса штамповки.



а)



б)

Рисунок 2 –технологическое устройство МЭИШ: а) в момент заполнения рельефа матрицы; б) в момент разделения отхода

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Pat. USN3279228. Forming device and method / Brower D.F. General Dynamics Corp. Oct. 16, 1966.
2. Вагин В.А., Мамутов В.С., Орешенков А.И., Фейгин А.П. Экспериментальное исследование магнитно-импульсной штамповки деталей через промежуточную эластичную среду // Вопросы судостроения. Серия «Технология судостроения», вып. 7. - Л.: ЦНИИ РУМБ, 1975. - С.113-119.
3. Магнитно-импульсная штамповка с применением промежуточных эластичных сред / К.Н. Богоявленский, В.Б. Гиндин, В.С. Мамутов и др. - Л.: ЛДНТП, 1982. - 36 с.
4. Магнитно-эластоимпульсная вырубка-пробивка тонколистовых материалов / К.Н. Богоявленский, В.Б. Гиндин, В.С. Мамутов и др. // Кузнечно-штамповочное производство, 1984, № 2. С. 12-14.
5. Разработка эффективных технологических устройств для магнитно-эластоимпульсной вырубки-пробивки тонколистовых материалов / Здор Г.Н., Мамутов А.В., Мамутов В.С., Смотряков Д.В. // Металлообработка. - 2001. - №2. - С. 28-32.
6. Hallquist J.O. LS-DYNA theoretical manual. Livermore Software Technology Corporation: Livermore, CA, 2006, 498 p.
7. Белый И.В., Фертник С.М., Хищенко Л.Т. Справочник по магнитно-импульсной обработке металлов. Харьков: Вища школа, 1977. - 320 с.

Д.Р. Кравцов, П.А. Кузнецов, С.Н. Кункин  
 Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого  
 Россия, Санкт-Петербург, kravtsov.dr@edu.spbstu.ru

## РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ГОРЯЧЕГО ВЫДАВЛИВАНИЯ ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ ЗАГОТОВОК ПРИ ЛОКАЛЬНОМ НАГРЕВЕ НА ОСНОВЕ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

### Аннотация

В работе проведено компьютерное моделирование процесса горячего выдавливания осесимметричных заготовок при локальном нагреве. Результаты моделирования показали, что по сравнению с часто применяемой на производстве технологией горячей высадки процесс горячего выдавливания обеспечивает получение более точных заготовок с меньшими припусками. На основе компьютерного моделирования предложен прогрессивный процесс локального нагрева и последовательного выдавливания осесимметричных заготовок на гидравлическом прессе.

*Ключевые слова:* горячее выдавливание, локальный нагрев, компьютерное моделирование.

### Введение

Наиболее часто используемыми операциями штамповки заготовок являются операции осадки и высадки. На рисунке 1 показаны операции изготовления детали «Вал ступенчатый». Основной операцией получения ступени большего диаметра является высадка [1, 2, 3, 4].

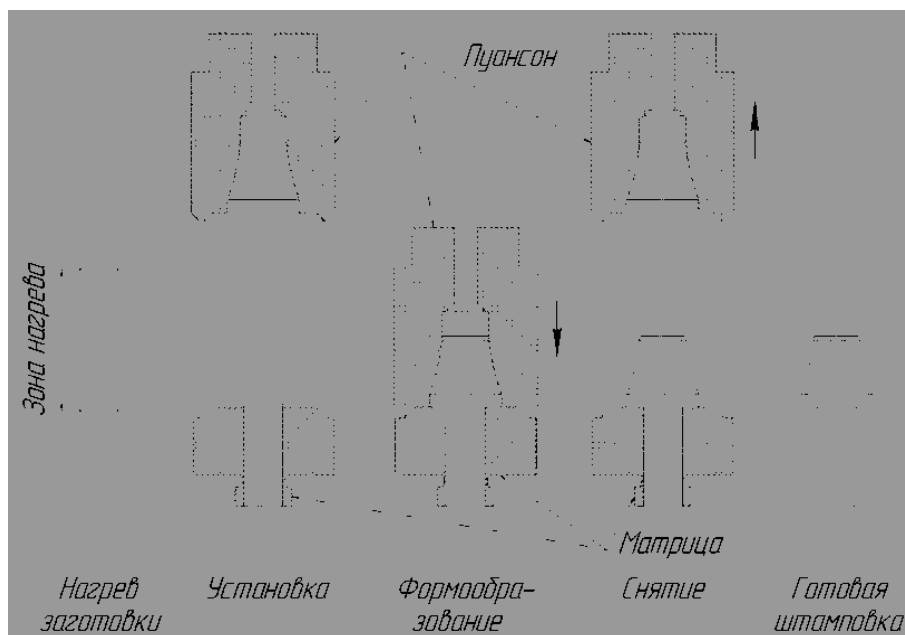


Рисунок 1 – Типовой процесс штамповки ступенчатого вала

К особенностям типового процесса следует отнести:

- низкую производительность: 400–600 шт. за 9 часов чистого времени работы оборудования;
- низкую точность штамповки: высокое радиальное смещение головной части изделия относительно хвостовой – 3–5 мм;
- чрезмерные припуски как механическую обработку: 2–5 мм, в зависимости от конфигурации;

Таким образом, целью работы является разработка на основе компьютерного моделирования процесса, обеспечивающего получение более точных заготовок с меньшими припусками и более высокой производительностью.

## Методы

Основным способом изготовления детали «Вал ступенчатый» был выбран процесс последовательного горячего выдавливания. На рисунке 2 представлена схема реализации предлагаемой технологии.

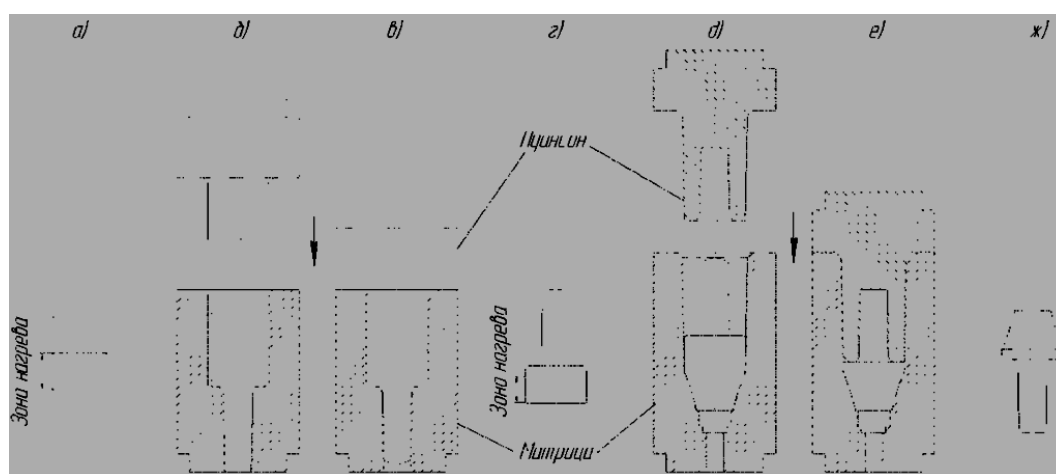


Рисунок 2 – Процесс выдавливания детали «Вал ступенчатый»: а – нагрев заготовки; б – установка заготовки; в – выдавливание «хвостовика»; г – переворот и нагрев заготовки; д – установка заготовки; е – выдавливание «головной» части; ж – готовая штамповка

Для моделирования использовался расчетный комплекс DEFORM. В программе решения осесимметричных задач были установлены начальные условия процессов локального нагрева и последовательного выдавливания.

## Результаты

Распределение температур, а также эффективные деформации в ходе процесса показаны на рисунке 3. График усилия, возникающего на ползуне прессы представлен на рисунке 4.

## Обсуждение

Моделирование показало, что метод горячего выдавливания обеспечивает деформирование металла в «хвостовой» части вала, улучшая его механические свойства благодаря деформации по всему объему заготовки. Небольшие штамповочные уклоны и форма ручья, характерные для инструмента, позволяют избежать использования припуска в «головной» части, увеличив коэффициент использования металла [5, 6].

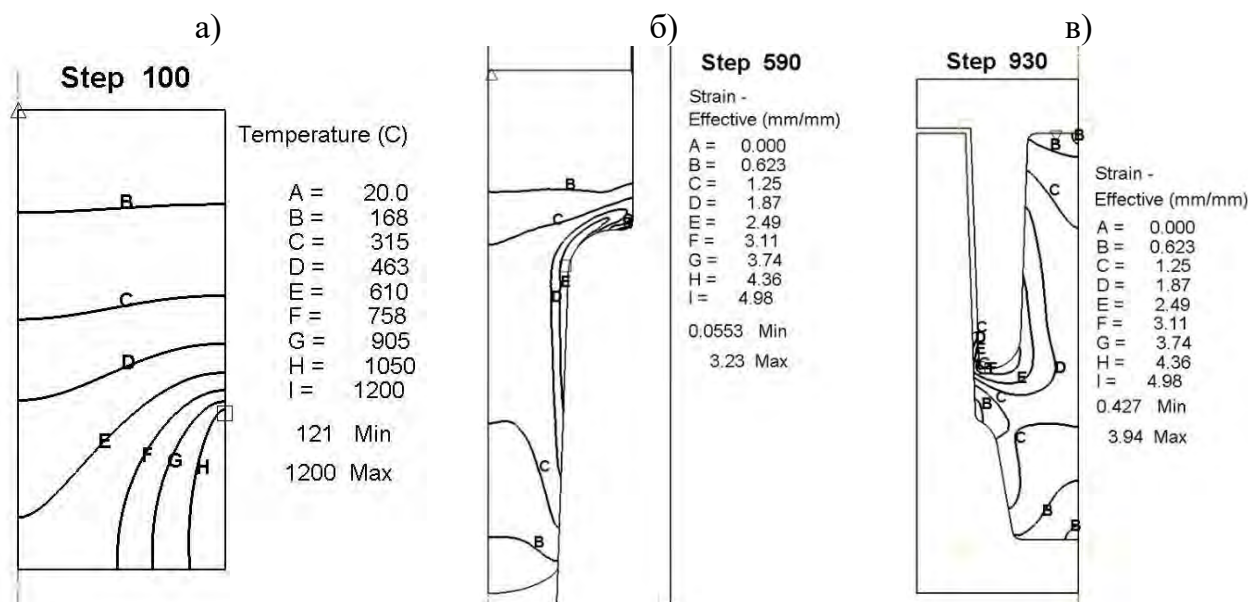


Рисунок 3 – Результаты моделирования: а – распределение температур по заготовке в начале нагрева; б – эффективные деформации при выдавливании «хвостовика»; в – эффективные деформации при окончательном выдавливании

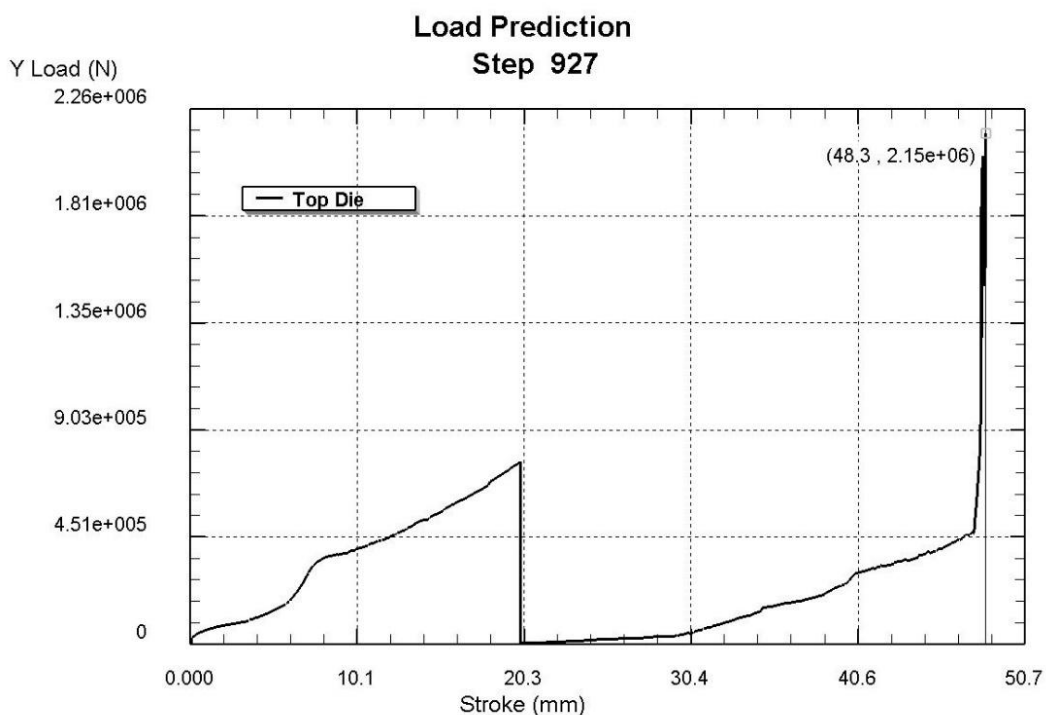


Рисунок 4 – График усилия на ползуне прессы

### Заключение

Метод горячего выдавливания для детали «Вал ступенчатый» является более оптимальным по сравнению с высадкой. Уменьшение припусков на механическую обработку позволяет более рационально использовать металл, что дает экономический эффект при производстве данной детали. Дальнейшей перспективой развития данной технологии является использование комбинированного процесса выдавливания «хвостовой» и «головной» частей вала, что позволит сократить число операций и снизить трудоемкость процесса.



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ковка и штамповка: справочник. В 4 т. Т. 2. Горячая объемная штамповка. - 2-е изд., перераб. и доп. / Под общ. ред. Е. И. Семенова. - М.: Машиностроение, 2010. - 720 с.: ил.
2. А.М. Золотов. Основы проектирования технологии прецизионной многооперационной горячей пластической обработки с использованием компьютерного моделирования. - СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2002. - 130 с.
3. Повышение эффективности технологической подготовки производства комплектующих для изготовления оборудования минерально-сырьевого комплекса / И.Н.Хрусталева, С.А.Любомудров, Т.А.Ларионова, Я.Ю.Бровкина// Записки Горного института. - 2021. - Т.249.- №3. - с.417-426.- DOI 10.31897/PMI.2021.3.11.
4. Технология конструкционных материалов. Производство заготовок. Медко В.С., Радкевич М.М., Третьяков В.П. Учебное пособие / Санкт-Петербург, 2019.
5. Радкевич М.М., Фомин Д.Ю. Определение рационального температурного режима штамповки. // Современное машиностроение. Наука и образование. - 2016. - № 5. - С. 1170-1177.
6. Любомудров, С.А. Технологическое обеспечение качества машиностроительного производства / С. А. Любомудров, Д. Ю. Колодяжный, С. Г. Орлов; Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого", 2020. - 191 с. - ISBN 978-5-7422-6970-0. - DOI 10.18720/SPBPU/2/id20-94

Н.М. Потапов<sup>1</sup>, Д.И. Дюбескин<sup>2</sup>, Л.Б. Аксенов<sup>2</sup>  
<sup>1</sup>АО «НИИЭФА» РКО ОЗ ЭФО, [nicitanic@yandex.ru](mailto:nicitanic@yandex.ru)

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Санкт-Петербург, Россия

## ДИНАМИЧЕСКАЯ ПОТЕРЯ УСТОЙЧИВОСТИ ТОНКОСТЕННЫХ ТРУБНЫХ ЗАГОТОВОК ПРИ ТОРЦЕВОЙ РАСКАТКЕ

### Аннотация

В работе представлены результаты исследования процесса торцевой раскатки деталей из тонкостенных трубных заготовок коническим валком. Особенностью процесса является возможная потеря устойчивости формы заготовки, не позволяющая получать детали требуемой геометрии. На основе данных компьютерного моделирования систематизированы причины потери устойчивости трубных заготовок при раскатке, определены кинематические характеристики машины и геометрические параметры заготовки, влияющие на этот процесс.

*Ключевые слова:* торцевая раскатка, трубная заготовка, формоизменение, потеря устойчивости, компьютерное моделирование

### Введение

Отличительной особенностью операций раскатки от операций штамповки является локальный характер приложения деформирующего усилия к торцу обрабатываемой заготовки, что позволяет существенно снизить удельное и общее суммарное усилие деформирования. Процессы торцевой раскатки, позволяют формировать наружные, внутренние и торцовые поверхности полых и сплошных металлических заготовок. Низкая стоимость оснастки, незначительное время подготовки производства, использование оборудования относительно небольшой мощности дают возможность применять процессы торцевой раскатки в мелкосерийном производстве [1, 2].

Цель исследования – на основе компьютерного моделирования процесса торцевой раскатки определить причины и условия возникновения динамической потери устойчивости трубных заготовок в виде волнового изменения поверхности ее деформируемой части.

### Метод исследования

В схеме торцевой раскатки (рис. 1) конический раскатной валок, смещенный относительно оси матрицы на величину  $\delta$ , с углом наклона  $\alpha$ , имеет скорость поступательного движения вдоль оси заготовки  $V$ . Часто эта скорость задается в виде перемещения валка за один оборот заготовки. В зависимости от типа раскатываемого фланца (наружный или внутренний) для направления течения металла используется смещение вершины конического валка относительно оси вращения трубной заготовки на некоторую величину  $\delta$  от оси заготовки. В зависимости от типа привода раскатной машины раскатной валок может иметь собственный привод (приводной валок) и вращаться вокруг своей оси с угловой скоростью  $\omega_2$ , или получать вращательное движение от заготовки, имеющей угловую скорость вращения  $\omega_1$ , за счет сил трения на контакте (пассивный валок). Заготовка представляет собой отрезок тонкостенной

трубы с размерами:  $D$  - внешний диаметр заготовки,  $S$  - толщина стенки,  $H$  - высота выставленной части заготовки над торцевой поверхностью матрицы.

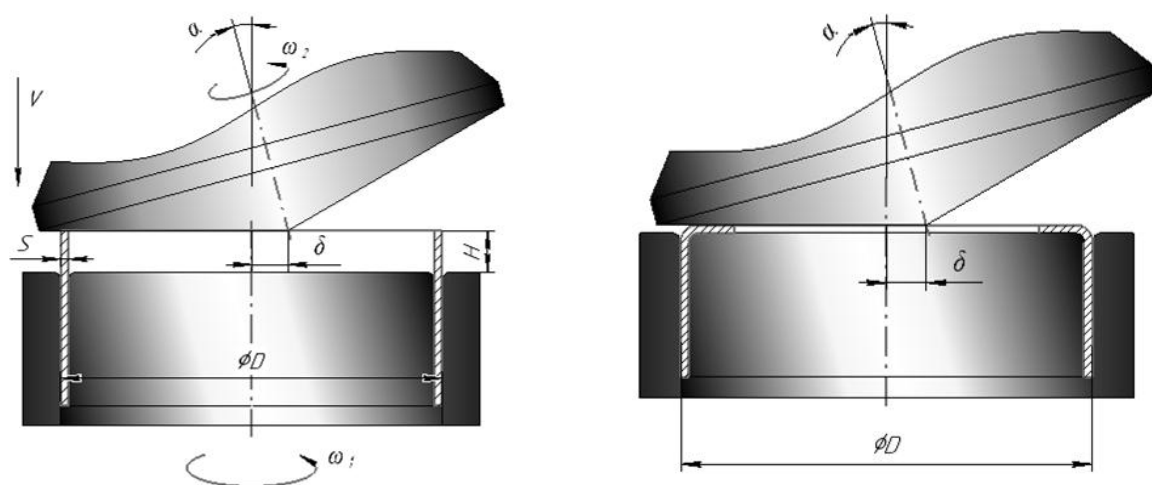


Рисунок 1 – Схема торцевой раскатки трубной заготовки при формировании внутреннего фланца

Проведенные многочисленные исследования процесса торцевой раскатки и его моделирования показали [3], что при этом процессе может происходить шесть возможных видов деформирования трубной заготовки. Три из них можно отнести к устойчивым, монотонно развивающимся процессам. Из этих трех два процесса отбортовки внутрь и наружу (рис. 2 а, б) хорошо прогнозируемы. Третий процесс (рис. 2, в), при котором происходит осадка трубы в зоне деформации, характеризуется течением металла в двух направлениях внутрь и наружу трубной заготовки. Этот процесс устойчивый, монотонный, но трудно предсказать в каком направлении будет происходить наиболее интенсивное течение металла.

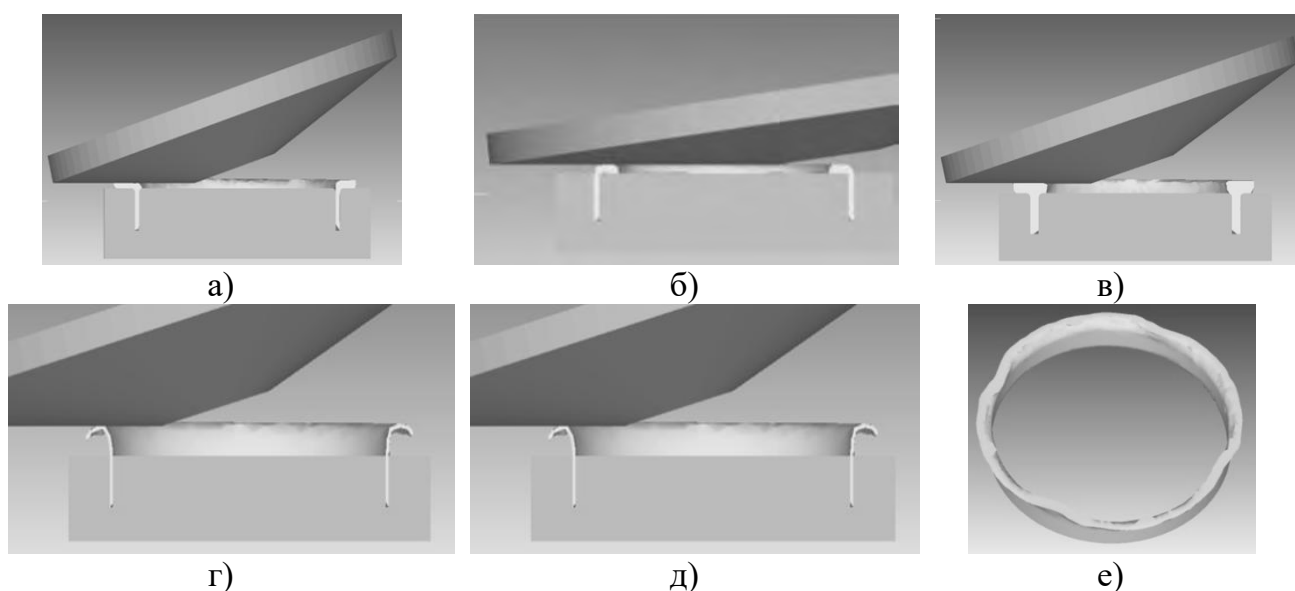


Рисунок 2 – Виды формоизменения трубной заготовки при торцевой раскатке: а – образование наружного фланца; б – образование внутреннего фланца; в – осадка стенки заготовки с течением металла внутрь и наружу; г – потеря устойчивости заготовки с выворотом наружу; д – потеря устойчивости заготовки с выворотом внутрь; е - периодическая потеря устойчивости

Еще три вида формоизменения заготовки (рис. 2 *з, д, е*) характеризуются неустойчивым развитием течения металла, обусловленному потерей устойчивости заготовки. Место изгиба заготовки локализуется между матрицей и валком, и в зависимости от направления сил трения происходит загиб заготовки вместо отбортовки (рис. 2, *з* и *д*). При этом очаг пластической деформации удаляется от торца матрицы, способствуя вывороту металла.

Вид формоизменения, представленный на рис. 2, *е*, является результатом взаимного наложения процессов, показанных на рис. 2, *з* и *д*, когда результирующая сила трения на контактной поверхности периодически меняет свое направление, в результате чего возникает волновое формоизменение заготовки.

Частично данная проблема потери устойчивости заготовки может быть решена при применении в машине для торцевой раскатки дополнительного привода вращения конического раскатного вала, обеспечивающего снижение влияния сил трения на контактной поверхности. Однако все условия возникновения волнового формоизменения трубных заготовок и способы его устранения изучены недостаточно глубоко.

Исходя из анализа опубликованных результатов исследования процессов торцевой раскатки на основе компьютерного моделирования [4-6], и с учетом кинематических особенностей процесса и локального деформирования заготовки, в работе выбрано моделирование с использованием вычислительного комплекса «Аbaqus». Основные параметры процесса, принятые при моделировании процесса, приведены в Табл. 1. Инструмент (раскатной валок, матрица и оправка) рассматривались как твердые недеформируемые тела. Материал заготовки (сталь ASI-1045) считался упруго пластическим с нелинейным упрочнением.

Таблица 1 - Параметры моделирования процесса торцевой раскатки

Параметр	Размерность	Значение
Диаметр заготовки $D$	мм	120
Толщина стенки заготовки $S$	мм	2
Длина выставленной части заготовки $H$	мм	20
Скорость поступательного движения вала $V$	мм/с	1
Смещение ролика $\delta$	мм	30 (0.25D)
Угол наклона раскатного вала $\alpha$	град	15
Частота вращения заготовки $\omega_1$	рад/с	6.28
Частота вращения раскатного вала $\omega_2$	рад/с	3.8
Коэффициент трения между валком и заготовкой $\mu$	-	0,15
Материал заготовки	сталь	ASI-1045
Сетка конечных элементов	геометрия	Кубическая
Число элементов по толщине стенки заготовки	шт.	3
Общее число элементов	шт.	17 424
Коэффициент Пуассона материала заготовки	-	0,3
Модуль Юнга материала заготовки	т/мм <sup>2</sup>	210
Плотность материала заготовки	т/мм <sup>3</sup>	7.85E-09
Температура инструмента и заготовки	<sup>0</sup> С	20

Вид сборки конечно-элементной модели процесса раскатки, состоящий из верхнего вала, заготовки и матрицы, представлен на Рис. 3 а.

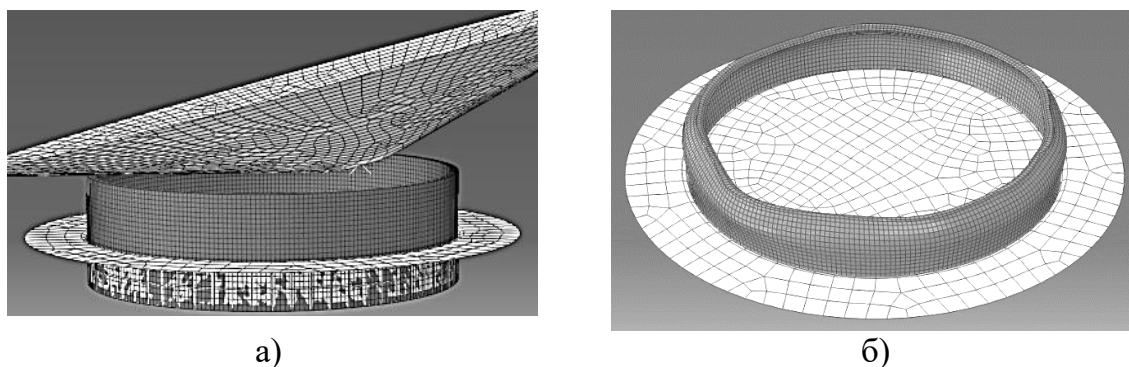


Рисунок 3 – Конечно-элементного моделирование процесса торцевой раскатки в расчетном комплексе «Аbaqus»: а.- исходная позиция инструмента и заготовки; б.- волнообразное изменение формы заготовки

В результате моделирования была получена картина динамической потери устойчивости заготовки, отражающая волнообразное изменение ее формы (Рис. 3 б). Динамика потери устойчивости заготовки определяется взаимодействием раскатного валка и заготовки, которое осуществляется только по поверхности их контакта. На этой поверхности действуют вертикальные нормальные напряжения и касательные напряжения, обусловленные трением между раскатным валком и заготовкой. Именно они определяют формоизменение заготовки. При достаточной высоте деформируемой части трубной заготовки, устойчивость заготовки, в первую очередь, зависит от величины нормальных напряжений, т.е. усилия, действующего со стороны раскатного валка на заготовку.

Касательные напряжения обусловлены трением между валком и заготовкой, и появляются из-за несовпадения скоростей раскатного валка и заготовки в отдельных точках контактной поверхности. В совокупности с действием нормальных напряжений они могут приводить к потере устойчивости заготовки.

На направление сил трения на контактной поверхности оказывает влияние направление скорости проскальзывания раскатного валка относительно заготовки.

Изменять направление сил трения (касательных напряжений) на контактной поверхности можно также величиной смещения вершины раскатного валка относительно оси заготовки  $\delta$ . При этом знак  $\delta$  будет определять направление течения металла внутрь или наружу заготовки для формирования внутреннего или наружного фланца. Соответственно при определенных условиях, потеря устойчивости заготовки (ее выворот) будет происходить в этом же направлении. Величина касательных напряжений пропорциональна величине нормальных напряжений при условии, что они меньше значения постоянной пластичности [7]. Таким образом, увеличение подачи (скорости поступательного движения) раскатного валка увеличивает эти напряжения. При развитии загиба заготовки внутрь уменьшается величина радиальной составляющей силы трения, так как будто уменьшается величина смещения валка  $\delta$ . За счет жесткости заготовки и уменьшения радиальной составляющей сил трения происходит смещение деформируемой части заготовки от ее центра. Далее процесс повторяется, и деформирование заготовки принимает периодический волновой характер. Это явление происходит в начальный момент раскатки при разгоне пассивного валка, обладающего значительной инерцией или высоким сопротивлением вращению. Потеря устойчивости заготовки наблюдается, когда разница тангенциальных скоростей точек на контактной поверхности валка и заготовки составляет более 20%.

Способами предотвращения потери устойчивости трубной заготовки в процессе торцевой раскатки являются снижение вертикального усилия деформирования в начальный момент раскатки путем уменьшения величин подачи раскатного вала, сил трения на контактной поверхности, инерционности пассивного вала, и применение приводного раскатного вала с возможностью изменения скорости его вращения.

### **Выводы**

1. Динамическая потеря устойчивости тонкостенных трубных заготовок при торцевой раскатке связана с действием значительной вертикальной нагрузки, определяемой скоростью перемещения раскатного вала и радиальной составляющей сил трения на контактной поверхности.

2. Возникновения волнового формоизменения трубных заготовок обусловлено изменением направления радиальной составляющей сил трения (касательных напряжений) на поверхности контакта раскатного вала с заготовкой.

3. Способами предотвращения потери устойчивости трубной заготовки в процессе торцевой раскатки являются уменьшение величины подачи раскатного вала, снижение трения на контактной поверхности, инерционности пассивного вала и применение приводного раскатного вала.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Аксенов Л.Б., Кункин С.Н., Елкин Н.М. Торцевая раскатка фланцевых деталей трубных соединений. «Металлообработка», научно-производственный журнал, №3 (63), 2011 г., стр. 31-36.

2. Кункин С.Н., Аксёнов Л.Б., Потапов Н.М. Системный анализ процесса холодной торцевой раскатки тонкостенных трубных заготовок. Современное машиностроение. Наука и образование. 2020. №9, С. 425-439.

3. Л.П.Семёнова, А.А.Семёнов, А.Н.Пасько. Формообразование наружных утолщений на стенках трубчатых заготовок. Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением, 2010, №9. С. 33-37.

4. Krishnamurthy, B., Bylya, O., Muir, L., Conway, A., & Blackwell. On the specifics of modeling of rotary forging processes. Computer Methods in Materials Science, (2017). Vol. 17(1), pp.22-29.

5. Xinghui Han, Lin Hua. Investigation on contact parameters in cold rotary forging using a 3D FE method. Int J Adv Manuf Technol (2012) 62, pp.1087–1106.

6. Rashid Asfandiyarov, Georgy I. Raab, Denis Aksenov. Analysis of the Stress-Strained State of Billets Processed by Rotary Forging with Special Shape of the Tool. Journal of Metastable and Nanocrystalline Materials, 2019, Vol. 31, pp.16-21.

7. А.Н. Леванов. Методика испытаний на контактное трение в процессах обработки металлов давлением. Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением, 2013, № 2. С.43-47.

К.С. Арсентьева, А.Е. Сидоров, Е.В. Сидорова  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Санкт-Петербург, Россия, xenia.ars@gmail.com

## ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ГЮЛЬДЕНА-ПАППУША ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЗАГОТОВОК ДЛЯ ДЕТАЛЕЙ КОРОБЧАТОЙ ФОРМЫ

### Аннотация

В работе рассмотрено применение метода Гюльдена-Паппуша для определения размеров и формы исходной заготовки для коробчатой детали с фланцем. Показана применимость данной методики для определения заготовки детали, не относящейся к деталям типа тел вращения.

*Ключевые слова:* листовая штамповка, исходная заготовка, технологические расчеты.

### Введение

Технология листовой штамповки позволяет изготавливать множество плоских и пространственных тонколистовых деталей различных форм и размеров. Экономичность листоштамповочного производства обуславливается высоким коэффициентом использования исходного материала, а также выбором необходимой и достаточной по форме и размеру исходной заготовки, с помощью которой удастся получить деталь требуемых габаритов без значительных отходов металла.

Для определения размеров и формы исходной заготовки для коробчатых деталей известны различные аналитические методы [1]. Наибольшую точность для расчета исходной заготовки показала методика пооперационных расчетов полуфабрикатов [2], а также метод Гюльдена-Паппуша, изначально разработанный для технологических расчетов изготовления деталей типа тел вращения.

*Цель данной работы* – показать применимость метода Гюльдена-Паппуша для определения формы и размеров исходной заготовки для коробчатой детали с фланцем.

### Методы

Для достижения поставленной цели использовались проверенные аналитические способы решения и современные САПР программы.

Метод Гюльдена-Паппуша в общем виде представляет собой следующий алгоритм. Для исходной детали вычерчивается сечение срединной поверхности, т. е. профиля образующей тела вращения. Сечение разбивается на простые прямолинейные и криволинейные участки. По полученному сечению определяются длины прямолинейных участков, радиусы закруглений, углы охвата дуги окружности радиусов закруглений, расстояния от центра тяжести прямолинейных и криволинейных отрезков. Затем по равенству произведения длины, образующей на путь ее центра тяжести, находится площадь поверхностей тела вращения и диаметр исходной заготовки:

$$D_3 = \sqrt{8\sum l_i c_i} \quad (1)$$

где  $D_3$  – диаметр исходной заготовки, мм;

$l_i$  – длина образующей (длина прямого участка или дуги окружности на радиусе закругления), мм;

$c_i$  – расстояние от оси до центра тяжести отрезка, мм.

### Результаты и обсуждение

Расширение применимости метода Гюльдена-Паппуша для деталей, не относящихся к телам вращения, приведено ниже. В качестве примера взята коробчатая деталь, показанная на рис. 1. Деталь не относится к телу вращения, поэтому использование метода Гюльдена-Паппуша на одном из сечений не позволит найти размеры исходной заготовки.

Представим, что заготовка расположена в полярных координатах  $(r; \varphi)$ . Далее деталь необходимо разбить на характерные сечения с определенным шагом. В данном случае шаг разбивки сечений составил 15 градусов. Поскольку деталь имеет две оси симметрии, то разбивать на сечения достаточно четверть детали (рис. 2).

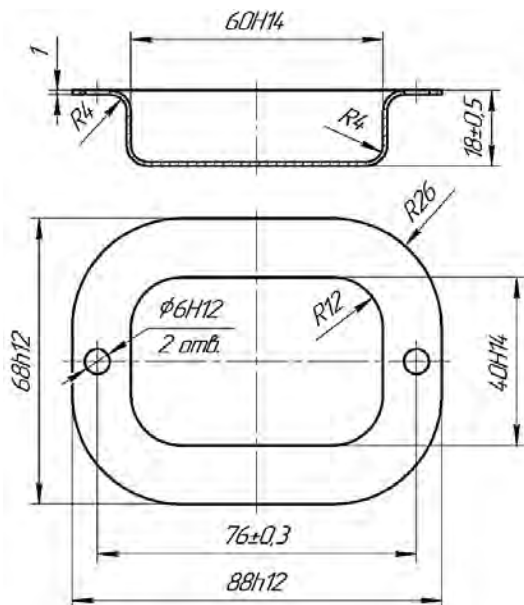


Рисунок 1 – Эскиз коробчатой детали с фланцем

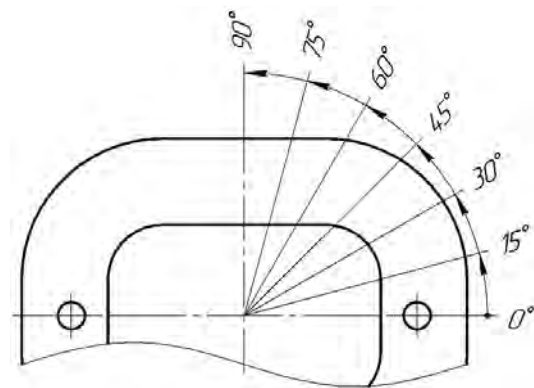


Рисунок 2 – Разбивка детали на характерные сечения

Преобразовав формулу (1), найдем расстояния от центра заготовки до ее кромки:

$$r = \sqrt{2\sum l_i c_i} \quad (2)$$

На рис. 3 показан пример разбиения характерного сечения на прямолинейные и криволинейные участки при  $\varphi = 0^\circ$ , где крестиком обозначены центры тяжести участков. Схожим образом, на 5 участков разбивались все характерные сечения. Координаты параметра  $r$  для заготовки представлены в таблице 1.



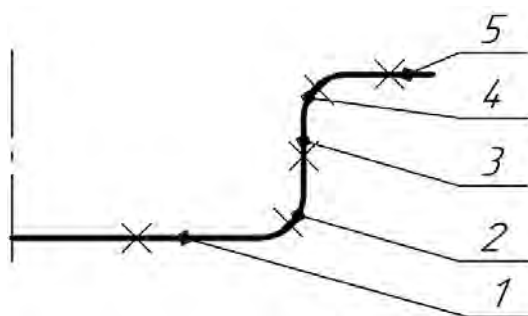


Рисунок 3 – Пример разбиения характерного сечения на участки

Таблица 1 – Определение координат точек заготовки

$i$	$\varphi, ^\circ$	$l_i, \text{мм}$	$c_i, \text{мм}$	$r, \text{мм}$	$i$	$\varphi, ^\circ$	$l_i, \text{мм}$	$c_i, \text{мм}$	$r, \text{мм}$
1	0	26,0	13,0	56,0	1	60	18,5	9,2	54,9
2		7,1	28,9		2		7,6	21,7	
3		8,0	30,5		3		8,0	23,6	
4		7,1	32,1		4		7,7	25,6	
5		14,0	39,5		5		15,8	37,0	
1	15	26,9	13,5	57,3	1	75	16,6	8,3	51,1
2		6,0	29,9		2		7,2	19,5	
3		8,0	31,6		3		8,0	21,2	
4		7,2	33,5		4		7,2	22,9	
5		14,1	43,2		5		14,5	33,1	
1	30	27,3	13,7	57,6	1	90	16,0	8,0	46,7
2		7,2	30,2		2		7,1	18,9	
3		8,0	31,9		3		8,0	20,5	
4		7,1	33,6		4		7,1	22,1	
5		14,1	41,0		5		14,0	29,5	
1	45	22,6	11,3	54,9					
2		8,5	26,4						
3		8,0	28,8						
4		7,5	30,7						
5		14,7	38,6						

Полученные координаты точек периметра заготовки были нанесены на эскиз детали в плане (рис. 4). Геометрия заготовки, построенная по координатам  $r$  была аппроксимирована и приведена к прямоугольнику размером 90x112 мм с радиусами закругления углов 36 мм. На рисунке 5 представлена полученная заготовка.

Точность размеров полученной заготовки оценивалась при помощи равенства площадей исходной детали и заготовки. Для этого трехмерные модели детали и заготовки строились в программе КОМПАС-3D, а затем, с помощью функции определения МЦХ определялись площади (рис. 6). Площадь поверхности детали бралась с учетом припуска на обрезку и с заполненными отверстиями на фланце, поскольку обрезка и пробивка осуществляются уже после формоизменяющих операций.

При том, что полученная площадь детали составила 9180 мм<sup>2</sup>, а площадь заготовки 8968 мм<sup>2</sup>, получаем, что погрешность применяемого метода составляет 2,4%.

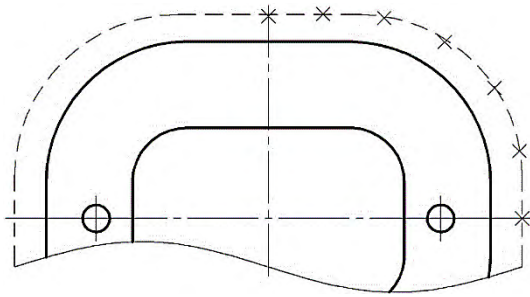


Рисунок 4 – Координаты заготовки и их аппроксимация

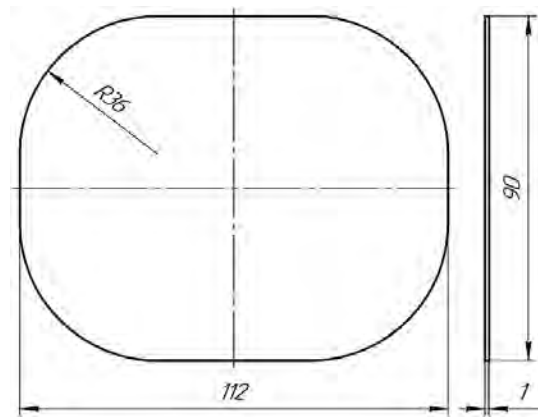
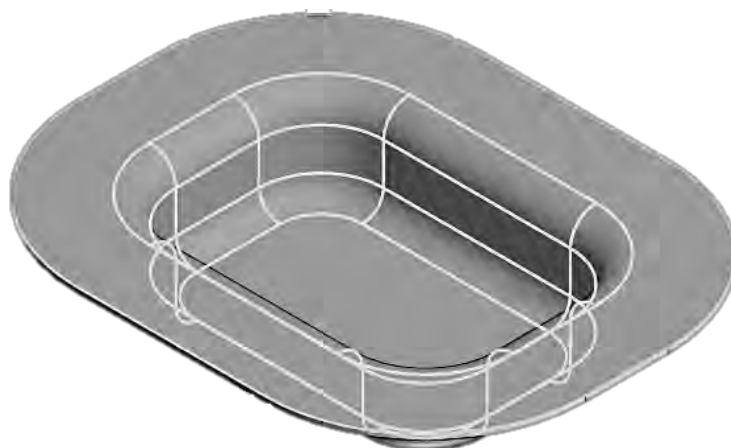


Рисунок 5 – Итоговая заготовка



Информация	
S15	= 104 мм <sup>2</sup>
S16	= 126 мм <sup>2</sup>
S17	= 101 мм <sup>2</sup>
S18	= 128 мм <sup>2</sup>
S19	= 151 мм <sup>2</sup>
S20	= 104 мм <sup>2</sup>
S21	= 170 мм <sup>2</sup>
S22	= 283 мм <sup>2</sup>
S23	= 288 мм <sup>2</sup>
S24	= 226 мм <sup>2</sup>
S25	= 104 мм <sup>2</sup>
S26	= 1609 мм <sup>2</sup>
Сумма	= 9180 мм <sup>2</sup>

Рисунок 6 – Определение площади поверхности детали с помощью КОМПАС-3D

### Заключение

В данной работе рассматривалась методика, которая позволяет расширить применение метода Гюльдена-Паппуша с деталей типа тела вращения на детали иной формы, в частности коробчатой. Методика отличается относительной простотой и не требует применения сложных и узкоспециализированных расчетных программ. В сравнении с исходным методом расчета требуется провести не один расчет по профилю образующей, а несколько однородных расчетов для каждого выделенного характерного сечения детали. Универсальность и простота метода позволяет применять его для деталей более сложных форм, в том числе не имеющих осей симметрии. Результаты работы могут быть применены в образовательной деятельности для технологических расчетов процессов вытяжки.

### 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. Точность способов определения размеров заготовки для листовых деталей типа тел вращения / К.С. Арсентьева, Б.Г. Носков, С.А. Нодзель, А.Е. Сидоров, М.А. Савельев, Е.С. Ефимов // Модели и методы развития технологий машиностроений в условиях цифровизации экономики России: сборник научных трудов / под ред. д-ра техн. наук, проф. А.А. Поповича. - СПб: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2022. - С. 170–174.

И.И. Газизов, Л.Б. Аксенов  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Санкт-Петербург, Россия, [senior.ilyar@yandex.ru](mailto:senior.ilyar@yandex.ru)

## ТОПОЛОГИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ГЕОМЕТРИИ ПОКОВКИ РЫЧАГА РОБОТА

### **Аннотация**

Для улучшения экономических показателей процесса изготовления детали типа «рычаг» в горячештамповочном производстве использован метод топологической оптимизации. При серийном производстве типовой детали возникает необходимость усовершенствование способа производства для обеспечения конкурентоспособности в области экономических показателей. В результате проделанной работы разработана геометрия поковки, процесс изготовления которой позволяет уменьшить себестоимость конечного продукта за счет снижения массы изделия без потери его механических свойств. [8]

*Ключевые слова:* топологическая оптимизация, горячая штамповка, геометрия, конечно-элементная сетка, свойства.

### **Введение**

Снижение массы и увеличение прочности деталей и конструкций машиностроительного производства – являются важнейшими конструкторскими задачами и, стоящие сегодня перед конструкторами всего мира [1 - 8]. Решение этих задач напрямую связано с задачей поиска оптимальных геометрических параметров проектируемого изделия. В настоящее время для решения этих задач стали использоваться методы топологической оптимизации [9 - 11].

Оптимизации топологии основана на нагруженности различных участков изделия и представляет собой поиск оптимальной формы конструкции без привязки к каким-либо характерным размерам или параметрам исходной геометрии.

Топологическая оптимизация позволяет улучшать характеристики жесткости и снижать массу конструкции с помощью МКЭ расчетов.

Применение методик оптимального проектирования позволяет найти наилучшие параметры конструкции, удовлетворяющие технологическим и прочностным ограничениям, обеспечивая, таким образом, минимум целевой функции (наилучшее решение в отношении технологичности детали). Применение методов топологической оптимизации в горячештамповочной промышленности является относительно новым компонентом процедуры проектирования. Наибольший толчок в своем развитии они получили при появлении возможности использования в производстве аддитивных технологий, а именно разного рода 3D печати вместо классических производственных методов. Аддитивные технологии позволили значительно расширить область конструктивных исполнений одного и того же изделия и, как результат, многовариантность его производства.

Цель работы: на основе применения метода топологической оптимизации найти геометрию поковки рычага робота, обеспечивающую снижение массы поковки без потери ее прочности.

## Методы исследования

Совершенствование процесса изготовления детали «рычаг» руки промышленного робота (Рис. 1) возможно за счет комплексной доработки геометрии исходной детали. Для достижения поставленной цели использовали современные САД и САЕ комплексы, прочностные расчеты выполнялись в программном комплексе ANSYS. [12]

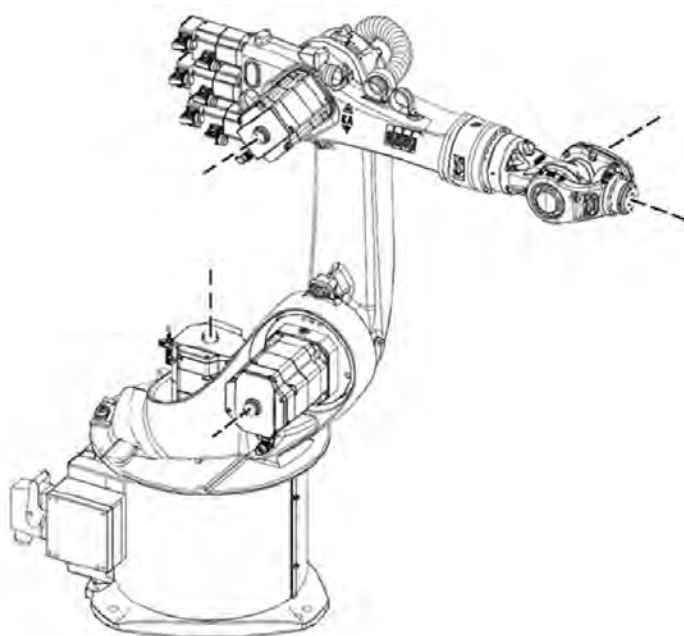


Рисунок 1 – Схема промышленного робота

В работе проводилась оптимизация геометрии детали с последующим сравнением показателей прочности. Было выполнено три прочностных расчета: 1-й прочностной расчет детали с исходной геометрией; 2-й прочностной расчет детали, с геометрией, оптимизированной при помощи топологической оптимизации; 3-й прочностной расчет детали, оптимизированной и подготовленной для горячештамповочного производства. Сравнение прочности деталей с различной геометрией осуществлялось по отношению значения предела упругости материала детали к величине максимальных эквивалентных напряжений по Мизесу. [13]

Основные характеристики детали (кроме геометрии) и параметры нагрузок во всех трех случаях одинаковы: сталь 20ХГРН (ГОСТ 4543-71); сила, приложенная к меньшему из фланцев руки, равна 1500 Н, момент силы, приложенный к крайнему и меньшему из фланцев вдоль оси фланцев, составляет 1,2 Н\*м. [14,15]

На рисунке 2 представлено распределение эквивалентных напряжений. Из рисунка следует что, максимальное напряжение (61.458 МПа) значительно меньше, чем предел текучести данного сплава (640 МПа). Запас прочности по данной детали:  $640 \text{ МПа} / 61.458 \text{ МПа} = 10$  Данный запас прочности необоснованно завышен, так для данной детали необходимым является коэффициента запаса прочности 1.5-2. Массовые характеристики для данной детали: масса - 4.99 кг; объем -  $6.4 \times 10^{-5} \text{ м}^3$ .

На рисунке 3. показана грубая топологическая оптимизация, выполненная в программном комплексе ANSYS. В данном случае объектом оптимизации являлся весь объем исходной заготовки за исключением торцевых фланцев, так как они задействованы в непосредственном соединении с другими узлами и деталями предполагаемого механизма.

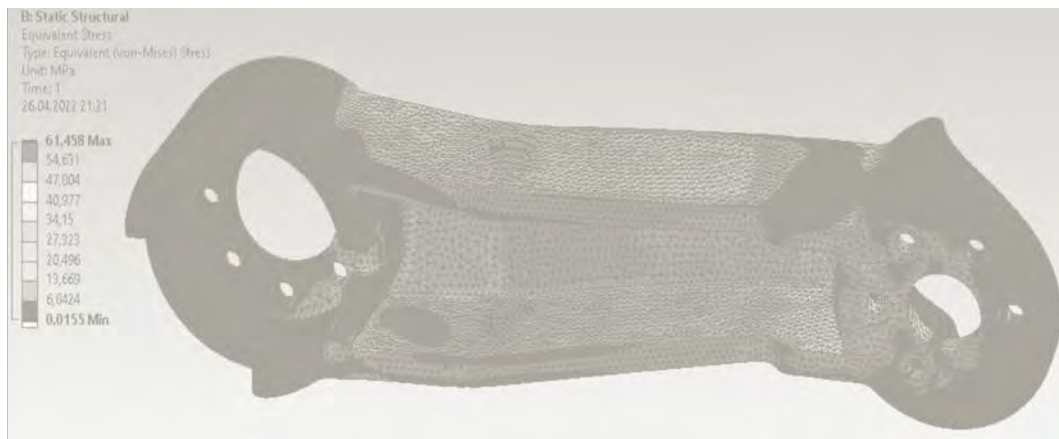


Рисунок 2 – Расчет максимальных эквивалентных напряжений, выполненный в САЕ комплексе ANSYSsimulation для детали с исходной геометрией

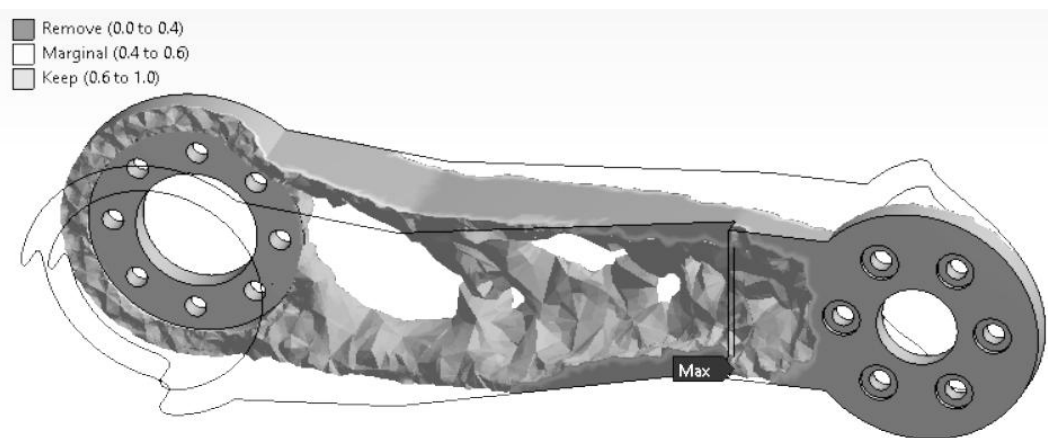


Рисунок 3 – Грубая топологическая оптимизация геометрии детали, выполненная в САЕ комплексе ANSYS.

На рисунке 3 показана гладкая сетка топологической оптимизации, выполненная в программном комплексе ANSYS. В данном случае геометрия торцевых фланцев была восстановлена до исходной геометрии, а геометрия соединяющего их рычага приняла более гладкую форму. [16-18].

На рисунке 4 представлена более грубая геометрия для моделирования прочностного расчета. Также на данном рисунке показана диаграмма распределения напряжений. Из рисунка следует что, максимальное напряжение (72.876 МПа) меньше, чем предел текучести данного сплава (640 МПа). Запас прочности по данной детали составляет 8.8, что также значительно больше рекомендуемого значения. Массовые характеристики для данной детали: масса = 2,93 кг; объем = 3.76E+5 мм<sup>3</sup>.

На рисунке 5 представлена более грубая геометрия для моделирования прочностного расчета. Также на данном рисунке показана диаграмма распределения напряжений. Из рисунка следует что, максимальное напряжение (72.876 МПа) меньше, чем предел текучести данного сплава (640 МПа). Запас прочности по данной детали составляет 8.8, что также значительно больше рекомендуемого значения. Массовые характеристики для данной детали: масса = 2,93 кг; объем = 3.76E+5 мм<sup>3</sup>.

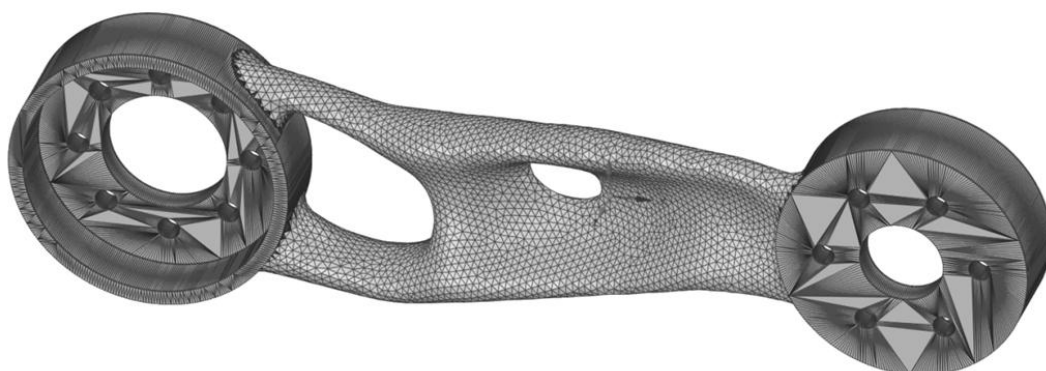


Рисунок 4 – Смоделированная гладкая сетка топологической оптимизации детали, выполненная в САЕ комплексе ANSYS.



Рисунок 5 – Расчет эквивалентных напряжений, выполненный в САЕ комплексе ANSYS для топологически оптимизированной детали (грубая геометрия)

На рисунке 6 представлена геометрия, подготовленная для штамповки (за исключением отверстий). Данная деталь получается на выходе после штамповки и обработки на ЧПУ станках (снятие штамповочных уклонов и высверливание отверстий на фланцах). Также на данном рисунке показана диаграмма распределения напряжений. Из рисунка следует что, максимальное эквивалентное напряжение (150 МПа) меньше, чем предел текучести данного сплава (640 МПа). Запас прочности по данной детали составляет 4.2, что также значительно больше рекомендуемого запаса прочности. Массовые характеристики для данной детали: масса - 2,69 кг; объем =  $3.45E+5$  мм<sup>3</sup>.

Последний вариант расчета – подготовленная геометрия под возможности горячей штамповки, следовательно, необходимость использования более долгих видов производства (аддитивные технологии) для экономии ресурсов при производстве на конечной детали отпадает.

### Заключение

- Применение топологической оптимизации для разработки геометрии поковки руки робота позволило снизить массу детали на 47%.
- Запас прочности детали снизился в 2.4 раза, но при этом превышает минимально-допустимый запас прочности (1.5–2) в 2 раза.
- Способ изготовления детали не изменился, следовательно, скорость производства детали осталась той же.



Рисунок 6 – Расчет эквивалентных напряжений, выполненный в САЕ комплексе ANSYS для штампуемой детали

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сауренко Т.Н., Чварков С.В. Экономическая политика в системе национальной безопасности Российской Федерации // Национальные приоритеты России. 2016. № 3 (21). С. 22-32.
3. Анисимов В.Г. Модель поддержки принятия решений при формировании товарной стратегии и производственной программы предприятия / В.Г. Анисимов [и др.] // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экономика. 2016. № 2. С. 62-73.
3. Косова В.А., Гасюк Д.П. К вопросу анализа условий разработки технологических процессов машиностроительных предприятий // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2021. № 2. С. 655-658.
4. Гасюк Д.П. Нормативно-правовые основы создания, цели, задачи и функции группы стандартизации и каталогизации вооружения, военной и специальной техники // В сборнике: Актуальные проблемы защиты и безопасности. труды XXII Всероссийской научно-практической конференции РАРАН. 2019. С. 370-374.
5. Тебекин А.В. Методический подход к моделированию процессов формирования планов инновационного развития предприятий / А.В. Тебекин, Т.Н. Сауренко [и др.] // Журнал исследований по управлению. 2019. Т. 5. № 1. С. 65-72.
6. Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г., Черныш А.Я. Эффективность инвестиций. Методологические и методические основы.- Москва: Военная Ордена Ленина, Краснознамённая, Ордена Суворова Академия Генерального штаба Вооруженных сил Российской Федерации, 2006.- 123 с.
7. Тебекин А.В. Способ формирования комплексных показателей качества инновационных проектов и программ / А.В. Тебекин, Т.Н. Сауренко [и др.] // Журнал исследований по управлению. 2018. Т. 4. № 11. С. 30-38.
8. Гасюк Д.П., Филатов И.Н. Основные принципы унификации образцов вооружения и военной техники // Труды международного симпозиума "Надежность и качество". 2008. Т. 2. С. 317-318.
9. Справочник. В 4-х т. / Ред. совет: Е.И. Семёнов(пред.) и др. - М.: Машиностроение, 1985 - Т.1, Материалы и нагрев. Оборудование. Ковка / Под ред. Е.И. Семенова. 1985. 568с., ил.
10. Справочник. В 4-х т./Ред. совет: Е.И. Семёнов(пред.) и др. - М.: Машиностроение, 1986 - Т.2, Горячая штамповка / Под ред. Е.И. Семенова, 1986. 592 с., ил.

11. Теория, технология и оборудование обработки металлов давлением: Методические указания по выполнению выпускной работы бакалавра /Сост. В. В. Рис, А. О. Просторова. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2003.50с.
12. Васильев, К.И., Смирнов А.М., Сосенушкин Е.Н., Схиртладзе А.Г. Автоматизация, робототехника и гибкие производственные системы кузнечно - штамповочного производства: Учебник. - Старый Оскол; ООО «ТНТ», 2007.
13. И.А. Норицын, В.И. Власов. Автоматизация и механизация технологических процессовковки и штамповки. М.: Машиностроение, 1967.
14. Центральный металлический портал РФ / Электронный ресурс / Режим доступа [http://metallichekiy-portal.ru/marki\\_metallov/stk/20XGHR](http://metallichekiy-portal.ru/marki_metallov/stk/20XGHR)
15. Компания ПРЕСТМАШ / Электронный ресурс / Режим доступа <https://sopressmash.ru/about/> , Дата обращения 25.04.2022.
16. Воскресенский, Б.В., Паламарчук А.С. Справочник экономиста - машиностроителя. Изд. 2-е, перераб. и доп. М., «Машиностроение», 1977. - 304 с.
17. Оптимизация топологии / Электронный ресурс / Режим доступа [https://ru.qaz.wiki/wiki/Topology\\_optimization](https://ru.qaz.wiki/wiki/Topology_optimization), Дата обращения 25.04.2022.
18. Обзор ПОдля топологии / Электронный ресурс / Режим доступа <https://3dtoday.ru/blogs/top3dshop/obzor-softa-dlya-topologicheskoy-optimizatsii-i-bionicheskogo-dizayna/> , Дата обращения 26.04.2022.



## **СПОСОБЫ ЗАДАНИЯ ЗАВИСИМОСТИ ДАВЛЕНИЯ ОТ ВРЕМЕНИ ПРИ РАСЧЕТАХ ИМПУЛЬСНЫХ МЕТОДОВ ЛИСТОВОЙ ШТАМПОВКИ**

### **Аннотация**

В работе рассмотрены формы импульсов давления, характерные для специальных методов листовой штамповки. Предложены способы задания нагружения при компьютерных расчетах импульсных методов листовой штамповки.

*Ключевые слова:* листовая штамповка, импульс давления, технологические расчеты, компьютерное моделирование.

### **Введение**

Специальные методы листовой штамповки, такие как электрогидроимпульсная, магнитноимпульсная, гидроударная штамповка и другие относятся к наукоемким технологиям, которые зависят от значительного числа различных факторов, влияющих на процесс формоизменения [1, 2, 3]. Отладка технологии получения детали подобными методами требует значительных затрат времени и ресурсов и использования специального оборудования, поэтому широкое распространение получил комплексный метод исследования таких процессов: натурные эксперименты в совокупности с компьютерным моделированием [3-6].

Использование высокоскоростных методов штамповки позволяют интенсифицировать процесс деформирования заготовки [7, 8], а также более экономически эффективны в сравнение со штамповкой в жестких инструментальных штампах. Поэтому подбор упрощенных зависимостей для использования в расчетах специальных технологий, которые обеспечат сокращение затрачиваемых компьютерных ресурсов и времени и достаточную точность вычислений, является актуальной задачей.

Цель данной работы – продемонстрировать зависимости давления от времени, с помощью которых можно задавать импульсную нагрузку в компьютерных расчетах специальных методов листовой штамповки.

### **Методы**

Для достижения поставленной цели был проведен обзор отечественной [9, 10] и зарубежной [11, 12] литературы о способах компьютерного моделирования специальных методов листовой штамповки, а также о результатах применения различных зависимостей для задания формы нагрузки в компьютерных расчетах [13, 14]. Полученные данные сведены и приведены в данной статье.

### **Результаты и обсуждение**

Специальные методы листовой штамповки характеризуются высокими скоростями деформирования, относительно коротким временем воздействия на заготовку и выделением значительного количества энергии в ограниченных объемах, например, в разрядных камерах. Источниками деформирования могут быть ударные

волны, вызванные детонацией взрывчатых веществ или газовых смесей (взрывная штамповка), ударом бойков по жидкости и эластичной среде (гидроударная штамповка), воздействием электромагнитного поля (магнитноимпульсная и магнитноэластоимпульсная штамповка), пробоем межэлектродного промежутка в жидкости (электрогидроимпульсная штамповка).

Форма импульсного нагружения может быть охарактеризована тремя параметрами: амплитудным значением нагрузки ( $p_{max}$ ), длительностью действия давления ( $T, \theta$ ) и временем достижения максимальной амплитуды ( $t_n$ ).

В таблице 1 приведены упрощенные зависимости, с помощью которых можно задавать нагрузку в компьютерных расчетах для различных методов листовой штамповки:

Таблица 1 – Задание нагружения в зависимости от технологии

Процесс	Зависимость давления от времени	Примечание
Гидроударная штамповка	$p(t) = \begin{cases} p_{max} \cdot \sin(\pi \cdot t/T), & t \leq T \\ 0, & t > T \end{cases}$	$T = 2t_n$ Рис. 1
Магнитноэластоимпульсная штамповка		
Электрогидроимпульсная штамповка	$p = p_{max} N_p (t/\theta)^a \exp(-bt/\theta),$ $N_p = \exp(b-1);$ $a = bt^*;$ $b = 1/(1-t^* + t^* \ln t^*);$ $t^* = t_n/\theta$	$t^* = 0.1 \div 0.5$ Рис. 2
Взрывная или газозрывная штамповка		$t^* < 0.1$ Рис. 2
Магнитноимпульсная штамповка	$p = p_{max} \sin^2(\pi \cdot t/T_B) \cdot \exp(-\delta \cdot t/T_B)$	$t_n = 0.25T$ Рис. 3

Обозначения:  $p$  и  $t$  – переменные давления и времени соответственно;  $p_{max}$  – амплитудное значение давления;  $T$  – общая длительность давления;  $t_n$  – время нарастания импульса;  $N_p, a, b$  – нормирующие величины;  $\theta$  – характеристическое время длительности импульса;  $T_B$  – длительность одной волны;  $\delta$  – коэффициент затухания волн.

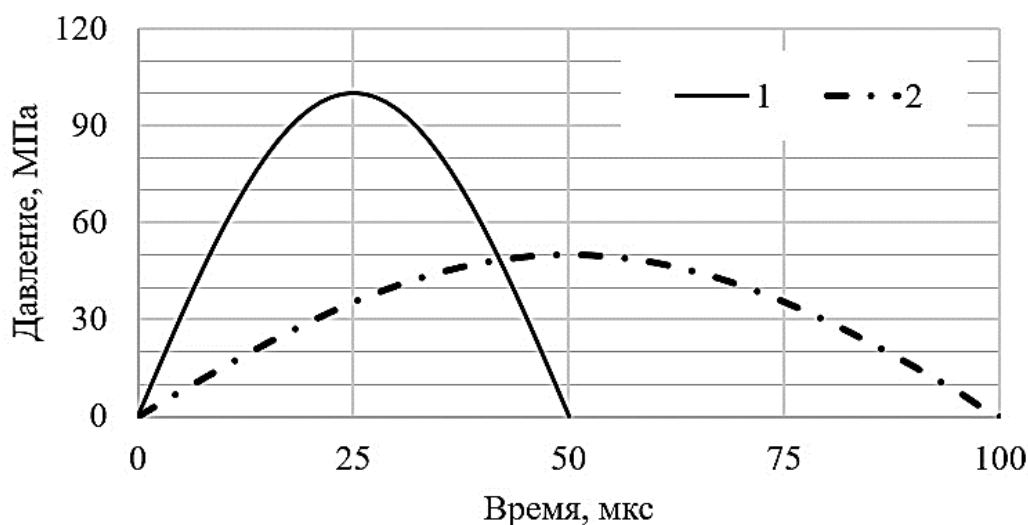


Рисунок 1 – Формы импульса давления: 1 – для МЭИШ при  $p_{max} = 100$  МПа,  $T = 50$  мкс; 2 – для гидроударной штамповки при  $p_{max} = 50$  МПа,  $T = 100$  мкс

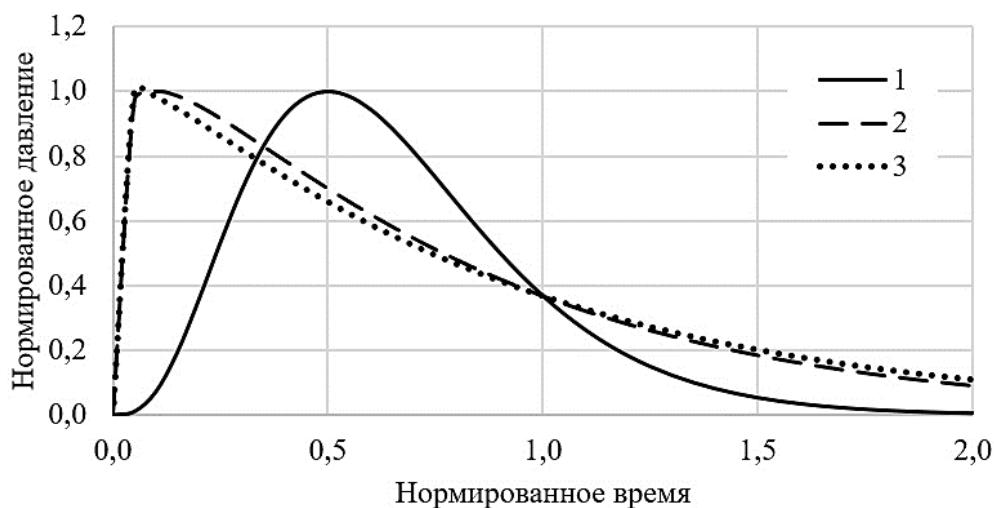


Рисунок 2 – Формы импульса давления при варьировании параметра  $t^*$ : 1 –  $t^* = 0.5$ ; 2 –  $t^* = 0.1$ ; 3 –  $t^* = 0.05$

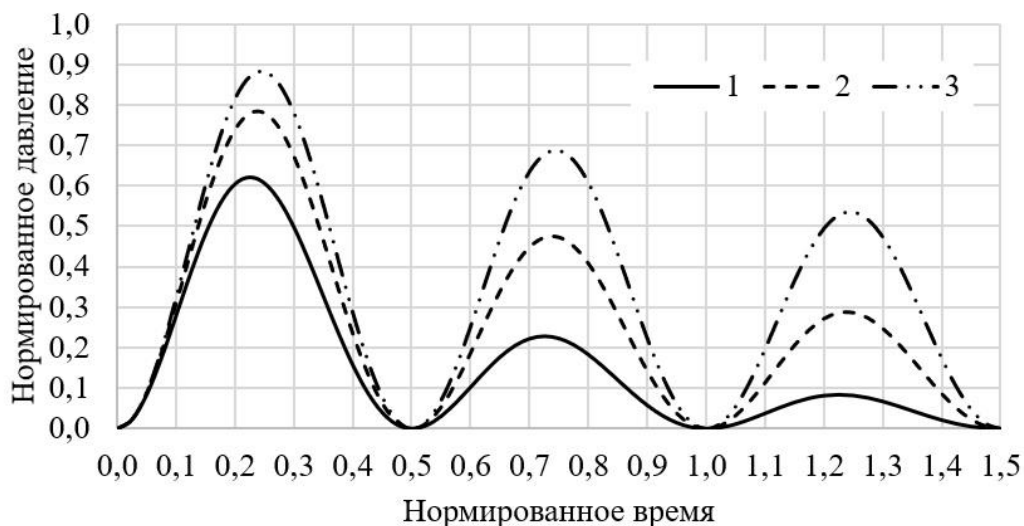


Рисунок 3 – Волновые графики импульса давления (затухающая синусоида):  
1 –  $\delta = 1$ ; 2 –  $\delta = 0.5$ ; 3 –  $\delta = 0.25$

### Заключение

В данной работе были рассмотрены различные способы задания формы давления для компьютерных расчетов специальных методов листовой штамповки, обеспечивающие достаточную точность вычислений для инженерных расчетов технологических расчетов. Используя предложенные зависимости импульса давления от времени, можно задавать в компьютерных расчетах нагрузку практически любого импульсного процесса обработки металлов. Данные результаты могут быть использованы в практике технологических расчетов с применением компьютерного моделирования.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мамутов, В.С. Механика нагружения и деформирования тонколистовой заготовки при электрогидроимпульсной вытяжке-формовке // В.С. Мамутов,

Г.Н. Здор // Современное машиностроение: наука и образование: материалы международной научно-практической конференции. - СПб, 2016. - С. 1150-1159.

2. Глушечков, В.А. Специализированные методы штамповки. Ч. 2. Динамические методы деформирования: учеб. пособие / В.А. Глушечков. - Самара: изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2012. - 108 с.

3. Мамутов, В.С. Экспериментально-расчетная диаграмма предельных деформаций для проектирования электрогидроимпульсной штамповки / В.С. Мамутов, А.В. Мамутов, К.С. Арсентьева, В.В. Блажевич // Современное машиностроение: наука и образование: материалы международной научно-практической конференции. - СПб, 2021. - С. 611-622.

4. A.V. Mamutov, S.F. Golovashchenko, V.S. Mamutov, J.J.F. Bonnen. Modeling of electrohydraulic forming of sheet metal parts. Journal of Materials Processing Technology, 2015. pp. 84-100.

5. Мамутов, В.С. Процесс и компьютерное моделирование импульсной формовки-вырубки полиуретаном мембран из фольги / В.С. Мамутов, К.С. Арсентьева, А.А. Курятников // Наука, теория и практика авиационно-промышленного кластера современной России. - Ульяновск: УЛГТУ, 2021. с. 73-79.

6. V.S. Mamutov, A.V. Mamutov, X.S. Arsenteva, V.V. Blazhevich. Method of obtaining forming limit diagram for electro-hydraulic stamping. In: Advances in Mechanical Engineering. Springer International Publishing, 2022. pp. 167-175.

7. Арсентьева, К.С. Формуемость тонколистовых низкоуглеродистых металлов при импульсных и статических нагрузках / К.С. Арсентьева, В.С. Мамутов // НеделянаукиСПбГПУ: материалы научного форума с международным участием. Институт металлургии, машиностроения и транспорта. Часть 1. 2014. - с. 125-128.

8. Арсентьева, К.С. Электрогидроимпульсная вытяжка-формовка с интенсификацией течения фланца заготовки / К.С. Арсентьева, В.С. Мамутов // Металлообработка, 2020. - № 3. - с. 26-34.

9. Мамутов, В.С. Импульсные технологии обработки давлением в машиностроении и приборостроении: уч. пособие / В.С. Мамутов, А.В. Мамутов. - СПб, 2017. - 64 с.

10. Здор, Г.Н. Технологии высоковольтного деформирования материалов / Г.Н. Здор. - Минск: БНТУ, 2010. - 456 с.

11. Aashish, Rohatgi, et al. Experimental characterization of sheet metal deformation during electro-hydraulic forming. Journal of Materials Processing Technology, 2011. V. 211, I. 11. pp. 1824-1833.

12. Morovvati, M.R., et al. A theoretical, numerical, and experimental investigation of plastic wrinkling of circular two-layer sheet metal in deep drawing. Journal of Materials Processing Technology. 2010. V. 210. pp. 1738-1747.

13. Арсентьева, К.С. Давление при электрогидроимпульсной вытяжке-формовке тонколистовой заготовки / К.С. Арсентьева, С.Е. Насс, В.С. Мамутов // НеделянаукиСПбГПУ: материалы научного форума с международным участием. Институт металлургии, машиностроения и транспорта. Часть 1. 2015. - с. 162-165.

14. 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: материалы международной научно-практической конференции. - СПб, 2018. - с. 569-579.

И.А. Шишов, В.В. Мишин  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Санкт-Петербург, Россия, shishov\_ia@spbstu.ru

## **АНАЛИЗ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В БЕРИЛЛИЕВЫХ ПОЛУСФЕРАХ ПОСЛЕ ГЛУБОКОЙ ВЫТЯЖКИ С УЧЕТОМ КРИСТАЛЛОГРАФИЧЕСКОЙ ТЕКСТУРЫ ЗАГОТОВКИ**

### **Аннотация**

В работе выполнено численное исследование влияния текстуры исходной заготовки на величину и распределение остаточных напряжений в бериллиевых полусферах после глубокой вытяжки. Расчеты показали, что после полного снятия нагрузки и извлечения из оснастки, остаточные напряжения распределяются неоднородно. Наибольшие значения остаточных напряжений наблюдаются в области перехода от фланца к стенке полусферы, а в области вершины полусферы остаточные напряжения практически отсутствуют. Расчеты позволили установить, что значения и характер распределения остаточных напряжений слабо зависят от текстурного состояния исходной заготовки

*Ключевые слова:* бериллий, глубокая вытяжка.

### **Введение**

Тонкостенные бериллиевые полусферы находят широкое применение акустике, приборостроению и специальной технике. Оптимальным способом изготовления таких полусфер является глубокая вытяжка. Поскольку вытяжка связана со значительной пластической деформацией металла, она может приводить к появлению остаточных напряжений в сформованном изделии, что напрямую влияет на его усталостную прочность (т.е. способность сопротивляться разрушению в условиях циклических нагрузок) [1]. Поскольку эксплуатационные условия полусфер зачастую связаны с работой в условиях циклической откачки и напуска атмосферы, усталостное разрушение может являться значительной проблемой для относительно хрупкого бериллия.

Вытяжку полусфер осуществляют из заготовок, полученных прокаткой. В зависимости от маршрута прокатки заготовка может обладать определенной кристаллографической текстурой, что влечет за собой выраженную анизотропию упругих и пластических свойств бериллия [2]. Таким образом, целью настоящей работы являлся численный анализ величины остаточных напряжений и их распределения в сформованной полусфере с учетом кристаллографической текстуры заготовки.

### **Методы**

Поставленная задача решалась при помощи метода конечных элементов на примере вытяжки полусферы высотой 7,4 мм из заготовки диаметром 22,4 мм толщиной 150 мкм. Для моделирования процесса глубокой вытяжки и пружинения тонкостенных полусфер была разработана конечно-элементная математическая модель в *ABAQUS*. Модель состояла из деформируемой бериллиевой заготовки, металлических обкладок, деформирующего бойка, прижимной шайбы и матрицы. Для

расчетов использовали динамический решатель *Explicit*, хорошо подходящий для моделирования процессов пластической обработки металлов. Расчетная сетка заготовки состояла из 16000 твердотельных элементов C3D6 и содержала 3 элемента по толщине. Аналогичная сетка использовалась для моделирования обкладок. Боек, прижимная шайба и матрица считались абсолютно жесткими, их расчетные сетки состояли из оболочечных элементов R3D4.

Для описания контактного взаимодействия использовали модель кулоновского трения и метод штрафных функций. Коэффициент трения между инструментом и обкладками приняли равным  $\mu=0.1$ , что соответствует высокотемпературной смазке из нитрида бора. Для контакта в условиях отсутствия смазки задавали коэффициент трения  $\mu=0.4$ .

Расчет осуществляли в три этапа. На первом этапе выполняли моделирование глубокой вытяжки с целью получения распределения напряжений и деформаций в бериллиевой полусфере. На втором этапе моделировали отвод бойка, при этом поджим держателя сохранялся. На третьем этапе моделировали извлечение сформованной полусферы из оснастки (рисунок 1).

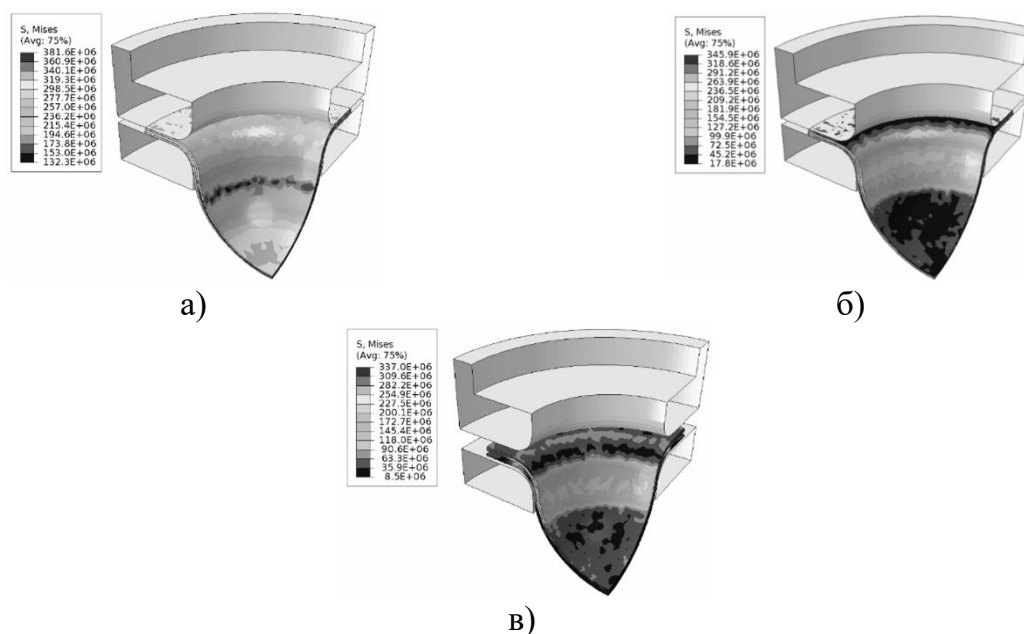


Рисунок 1 – Интенсивность напряжений по Мизесу, рассчитанная для различных стадий процесса: а) окончание вытяжки; б) отвод пуансона; в) отвод держателя

Для описания пластического течения материала задавали кривые пластического течения [3]. Материал обкладок (титан) рассматривали как однородную среду с изотропными упругими и пластическими свойствами. Анизотропию пластических свойств бериллия в зависимости от текстуры учитывали при помощи критерия текучести Хилла. В данной работе рассматривали три текстурных состояния заготовки (обозначены как ГП1, ГП2 и ГП3, см. рисунок 2).

Параметры критерия текучести Хилла, соответствующие рассматриваемым текстурным состояниям, представлены в таблице 1.

Для учета упругой деформации бериллия использовали модель ортотропной упругости. Под ортотропной упругостью в данной работе подразумевается неодинаковость упругих свойств по трём взаимно перпендикулярным направлениям. В качестве этих направлений были приняты направления прокатки, поперечное и

нормальное направление для прокатанной фольги, используемой в качестве заготовки. Ортоотропную упругость моделировали при помощи тензора жесткости, компоненты которого были вычислены для каждого текстурного состояния заготовки при помощи программного обеспечения MTEX (таблица 2).

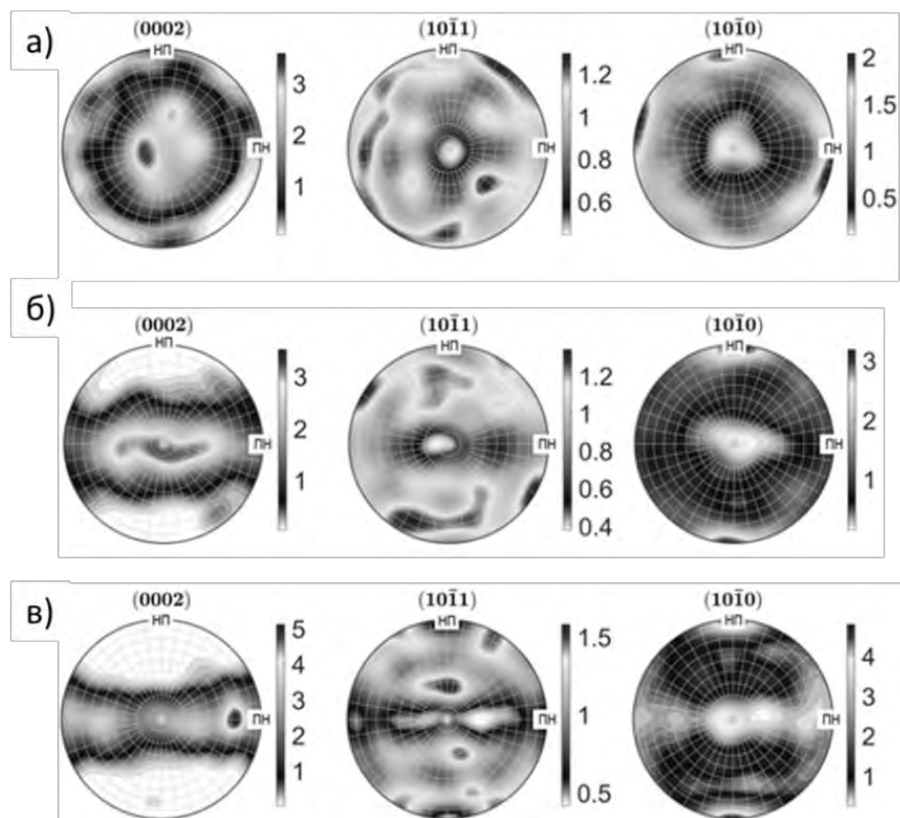


Рисунок 2 – Прямые полюсные фигуры, характеризующие текстуру заготовок для вытяжки: а) ГП 1; б) ГП 2; в) ГП 3

Таблица 1 – Использованные при моделировании значения параметров критерия текучести Хилла

Маршрут	R11	R22	R33	R12	R13	R23
ГП1	1	0,9717	1,1575	0,9368	1	1
ГП2	1	1,0256	1,1318	0,8359	1	1
ГП3	1	1,0324	0,9762	0,6683	1	1

Таблица 2 – Компоненты тензора жесткости для поликристаллического бериллия, обладающего различной кристаллографической текстурой

Текстура	$C_{11}$ , ГПа	$C_{22}$ , ГПа	$C_{33}$ , ГПа	$C_{44}$ , ГПа	$C_{55}$ , ГПа	$C_{66}$ , ГПа	$C_{12}$ , ГПа	$C_{13}$ , ГПа
ГП1	311.27	297.66	307.32	147.04	147.55	148.2	9.95	17.52
ГП2	305.52	298.74	312.29	147.67	148.12	146.86	9.64	16.56
ГП3	301.25	301.34	312.3	148.92	148.07	146.54	9.1	14.59

### Результаты и обсуждение

Расчеты показали (рисунок 3), что после окончания вытяжки до момента снятия нагрузки в сформированной полусфере наблюдается высокий уровень действующих напряжений, который зависит от текстуры заготовки. В случае

текстурного состояния заготовки ГП1 уровень напряжений несколько выше (380 МПа), чем для заготовок с текстурным состоянием ГП2 и ГП3 (360 и 330 МПа). Как и ожидалось, плоскостная изотропия механических свойств приводит к симметричному распределению напряжений, а плоскостная анизотропия – к явно выраженной асимметричности их распределения.

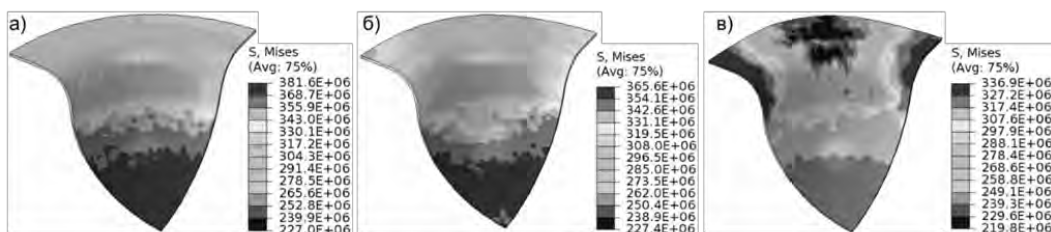


Рисунок 3 – Распределения значений интенсивности остаточных напряжений (по Мизесу) после окончания вытяжки перед снятием нагрузки для заготовок с текстурой: а) ГП1; б) ГП2; в) ГП3

Частичное снятие нагрузки (подъем бойка) приводит к значительному перераспределению напряжений (рисунок 4). Видно, что максимальная интенсивность напряжений наблюдается в областях, граничащих с областью перехода от фланца к стенке. По-видимому, в этих областях релаксация напряжений затруднена, поскольку металл ограничен в перемещении из-за воздействия обкладок, прижимной шайбы и матрицы. При этом наличие плоскостной анизотропии механических свойств на данном этапе незначительно влияет на величину и характер распределения остаточных напряжений. Расчеты показали, что после отвода бойка максимальные значения интенсивности напряжений несколько снижаются, и составляют от 360 МПа (текстура ГП1) до 330 МПа (текстура ГП3).

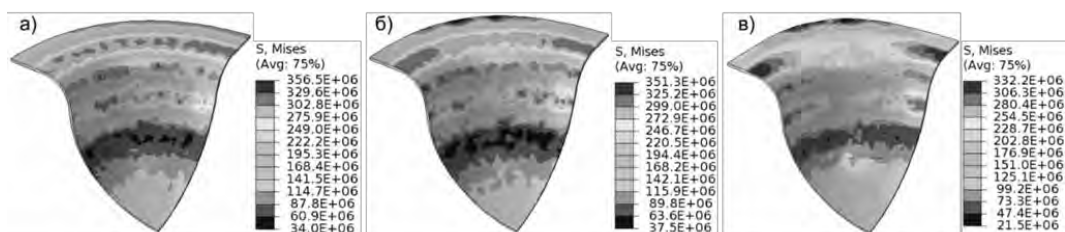


Рисунок 4 – Распределения значений интенсивности остаточных напряжений (по Мизесу) после отвода пуансона, рассчитанные с использованием модели ортотропной упругости для заготовок с текстурой: а) ГП1; б) ГП2; в) ГП3

После извлечения полусферы из оснастки (рисунок 5) величина остаточных напряжений изменяется незначительно, хотя наблюдается некоторое перераспределение напряжений – наибольшие их значения наблюдаются в области перехода от фланца к стенке. Интенсивность остаточных напряжений по Мизесу здесь составляет 320-350 МПа в зависимости от текстурного состояния. В области вершины полусферы остаточные напряжения практически отсутствуют (интенсивность остаточных напряжений по Мизесу составляет 10-15 МПа).

Можно сделать вывод, что принципиальных существенных различий с точки зрения остаточных напряжений для разных текстур заготовки не наблюдается. Таким образом, текстура заготовки (при прочих одинаковых параметрах процесса вытяжки) слабо влияет на величину остаточных напряжений.



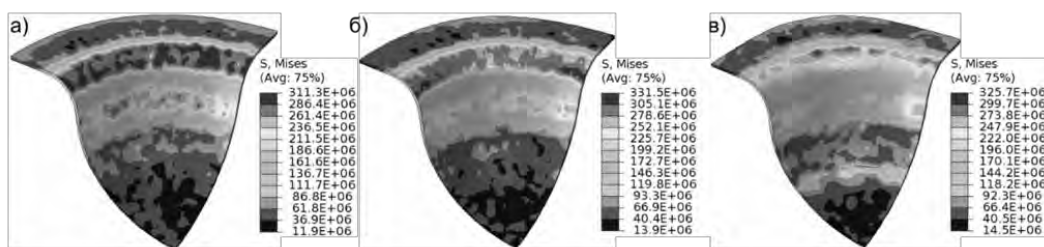


Рисунок 5 – Распределения значений интенсивности остаточных напряжений (по Мизесу) после извлечения из оснастки, рассчитанные с использованием модели ортотропной упругости для заготовок с текстурой: а) ГП1; б) ГП2; в) ГП3

### Заключение

В данной работе выполнено численное исследование влияния текстуры исходной заготовки бериллия на величину и распределение остаточных напряжений в полусфере после глубокой вытяжки.

Расчеты показали, что после полного снятия нагрузки и извлечения из оснастки, наибольшие значения остаточных напряжений наблюдаются в области перехода от фланца к стенке, а в области вершины полусферы остаточные напряжения практически отсутствуют. Установлено, что значения и характер распределения остаточных напряжений слабо зависят от текстурного состояния исходной заготовки.

### Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 20-79-00014)

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Shiozaki T. Effect of residual stresses on fatigue strength of high strength steel sheets with punched holes / Shiozaki T., Tamai Y., Urabe T. // Int. J. Fatigue. 2015. Vol. 80. P. 324–331.
2. Mishin V.V. Enhanced mechanical properties of hot-rolled beryllium foils / Mishin V.V. et al. // Materialia. 2020. Vol. 11. P. 100726.
3. Шишов, И.А. Исследование возможности повышения формуемости бериллия при глубокой вытяжке тонкостенных полусфер / И.А. Шишов, В.В. Мишин // Сборник научных трудов II Всероссийской (национальной) научно-практической конференции «Современные проблемы материаловедения». - Липецк, 2021. - С. 92-98.

# Управление качеством в машиностроении

УДК 621.3

А.А. Кузьменко, Д.П. Гасюк  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Санкт-Петербург, Россия, [kuzmenko.anna97@mail.ru](mailto:kuzmenko.anna97@mail.ru)

## МЕТОДИКА ОБОСНОВАНИЯ РАЦИОНАЛЬНОЙ ТРУДОЕМКОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА НА СБОРОЧНОМ УЧАСТКЕ

### Аннотация

Многие промышленные предприятия заинтересованы в оптимизации технологических процессов производства, внедрении эффективных вариантов контроля над проектами и управления работами, обосновании рациональной трудоемкости технологических процессов и организации условий для ее сокращения в условиях минимизации привлекаемых ресурсов. В данной работе эта задача будет решаться с помощью методов сетевого планирования на примере технологического процесса сборки.

*Ключевые слова:* методы сетевого планирования, метод критического пути, организация технологического процесса, трудоемкость.

### Введение

В условиях современной рыночной экономики качество продукции является одним из важнейших показателей деятельности предприятия, так как в значительной степени определяет его выживаемость среди конкурентоспособных производителей [1 - 4]. Для обеспечения выпуска продукции с максимальным соответствием ее свойств существующим потребностям рынка, необходима качественная технологическая подготовка производства (ТПП), иначе процесс разработки и создания новых изделий не будет представляться возможным [5 - 12].

Разработка технологического процесса (ТП) сборки машины является составной частью технологической подготовки ее производства [13]. Благодаря четкому планированию и разработке технологического процесса сборки, его расчленению на более мелкие операции, их рациональному распределению между исполнителями и подсчетам норм времени, затрачиваемых на выполнение отдельных этапов и всего проекта в целом, можно сократить трудоемкость на 15-20%.

### Методы

На данный момент на промышленных предприятиях существует множество путей сокращения трудоемкости процессов производства. Большинство из них построены на методах сетевого планирования [14 - 19]. Задача состоит в том, чтобы найти оптимальный вариант организации технологического процесса сборки, обеспечивающий выполнение объема работ за предельно короткое время.

Целью данной работы является анализ методов сетевого планирования, используемых на промышленных предприятиях для разработки технологических процессов сборки на этапе подготовки производства и предложение оптимального варианта обоснования рациональной трудоемкости ТП для сборочного участка в условиях сокращения привлекаемых ресурсов.

### **Результаты и обсуждение**

Система сетевого планирования и управления является комплексом графических и расчётных методов, организованных мероприятий и контрольных приёмов, обеспечивающих моделирование, анализ и динамическую перестройку плана выполнения работ.

В кратком изложении сущность методов сетевого планирования и управления заключается в следующем [14]:

1) Процесс, подлежащий планированию и управлению, представляется в виде сетевого графика или столбчатой диаграммы, отражающих логическую и технологическую последовательность операций;

2) Производится детальный расчёт временных характеристик всего процесса и его составляющих, выявляются резервы времени, определяется соответствие длительности процесса поставленным требованиям;

3) На основе анализа привлечения неиспользованных ресурсов производится оптимизация сети, т. е. формируется и рассчитывается такой сетевой план, при котором разрабатываемый процесс будет удовлетворять поставленным требованиям;

4) В процессе управления производится регулярное сравнение сетевого календарного графика с фактическим ходом проекта.

Можно выделить следующие, наиболее используемые на промышленных предприятиях, методы сетевого планирования: ленточные диаграммы (диаграммы Ганта), PERT (англ. Program Evaluation and Revalue Technique, ПЭРТ) – техника оценки и анализа проектов, СРМ (англ. Critical path method, МКП) – метод критического пути.

Особенностью планирования с помощью диаграммы Ганта является представление перечня задач с помощью горизонтального столбчатого графика. С помощью ленточных диаграмм отражается распределение работ (по видам и наименованиям) между рядом исполнителей, объемы работ и календарное расписание их выполнения. Но ее существенным недостатком является сложность контроля и управления трудоемкими проектами.

Модель ПЭРТ является более современным способом сетевого анализа и координированием мероприятий. Главным преимуществом данной системы планирования является способность охватить все многообразие работ, отразить их взаимные связи и влияние на проект в целом, а также обеспечить соблюдение принципа непрерывного анализа и руководства. Благодаря этому сетевой анализ намного полнее удовлетворяет требования сквозного анализа и необходимости осуществлять оптимизацию выполняемых работ (временных, стоимостных, технических).

Модель МКП является разновидностью системы ПЭРТ. Их основное отличие в следующем: в ПЭРТ продолжительность каждой работы задается тремя оценками — оптимистической, наиболее вероятностной и пессимистической. Это целесообразно лишь тогда, когда работы ведутся новыми методами, применяются новые материалы, изготавливаются новые изделия.

В системе МКП используют две оценки — нормальную и критическую. В дальнейшем будут рассмотрены сетевые методы анализа, базирующиеся на методе МКП. Метод критического пути отображается в виде сетевого графа, состоящего из ряда соединенных кружков и стрелок, обозначающие работы, составляющие проект, и взаимосвязи между ними.

Сущность этого метода заключается во всестороннем исследовании технологической зависимости работ друг от друга, установлении их оптимальной и заданной последовательности и определении критического пути — наиболее длительного продолжения работ в данной системе. Критический путь содержит все события сети, задержка наступления которых напрямую влияет на дату окончания проекта в целом. Таким образом, эти задачи не имеют общего резерва времени. События на критическом пути определяют общую продолжительность проекта.

Рассмотрим построение сетевой модели на примере комплекса работ по оптимизации сборки узла машины. Обозначим оптимальные пути протекания операций и их продолжительность.

На основе имеющейся информации построим и упорядочим сетевой график. Исходным событием сетевого графика является событие 1, так как ему не предшествуют никакие работы, а завершающим — событие 7.

Таблица 3 – Возможные варианты путей технологического процесса сборки

№ работы	Шифры работ	Продолжительность работ, минуты	Наименование работ
1	2	3	4
1	1-3	12	A
2	3-4	20	B
3	4-6	28	C
4	6-7	7	D
5	1-2	2	E
6	2-3	10	F
7	5-6	38	K
8	6-7	8	L

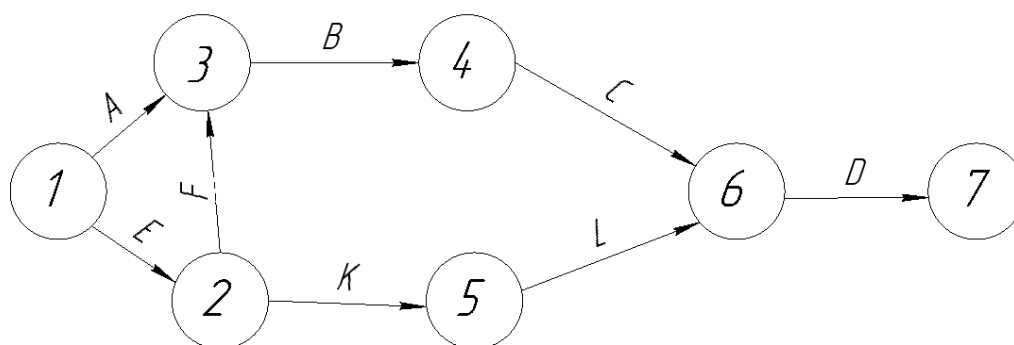


Рисунок 1 – Пример сетевого графика технологического процесса сборки

От начального события к конечной цели в сетевом графике приводит несколько путей различной протяженности. Для того чтобы определить общее время выполнения всего комплекса работ, надо найти критический путь — самый продолжительный.

Далее производится расчет основных показателей модели: ранних  $Tr_j$  и поздних  $Tп_i$  сроков наступления событий.

Ранний срок  $Tr_j$  свершения события  $j$ , где максимум берется по всем событиям  $i$ , непосредственно предшествующим событию  $j$ :

$$Tr_j = \max\{Tr_i + T(i, j)\} \quad (1)$$

Поздний срок  $Tп_i$  свершения события  $i$ , где максимум берется по всем событиям  $j$ , непосредственно предшествующим событию  $i$ :

$$Tп_i = \max\{Tr_j - T(i, j)\} \quad (2)$$

Обозначение  $T(i, j)$  – продолжительность работы с начальным событием  $i$  и конечным событием  $j$ .

Важным показателем является резерв времени события, который определяется как разность между поздним и ранним сроками его наступления:

$$R_i = Tп_i - Tr_j \quad (3)$$

События, лежащие на критическом пути, резервов времени не имеют. Это означает высокую зависимость наступления завершающего события от любых задержек в пределах критического пути.

Следовательно, выбранный вариант протекания сборки является самым оптимальным, что обосновывает рациональную трудоемкость сборочного технологического процесса.

Следовательно, метод критического пути оправдывает себя, как высокоэффективную систему планирования производства, обеспечивающую выполнение проекта в максимально короткие возможные сроки.

### Заключение

Проанализировав существующие методы сетевого планирования производств, сделаем вывод, что использование сетевой модели возможно весьма эффективно применить на промышленных предприятиях при планировании сборки крупных изделий. В основу проектирования поэтапно закладывают технологические процессы сборки узлов машин. Чем больше степень дифференциации сборочного процесса по операциям, тем результативнее система планирования и оптимизации работ.

Благодаря внедрению методики расчета трудоемкости технологических процессов повышается эффективность производства и обосновывается рациональный вариант трудоемкости технологического процесса сборки.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сауренко Т.Н., Чварков С.В. Экономическая политика в системе национальной безопасности российской федерации // Национальные приоритеты России. 2016. № 3 (21). С. 22-32.

2. Анисимов В.Г. Стратегическое управление инновационной деятельностью: анализ, планирование, моделирование, принятия решений, организация, оценка / В.Г. Анисимов, Е.Г. Анисимов [и др.].- Санкт-Петербург, 2017.- 312 с.

3. Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г., Черныш А.Я. Эффективность инвестиций. Методологические и методические основы.- Москва: Военная Ордена Ленина, Краснознамённая, Ордена Суворова Академия Генерального штаба Вооруженных сил Российской Федерации, 2006.- 123 с.

4. Ильин И.В. Математические методы и инструментальные средства оценивания эффективности инвестиций в инновационные проекты / И.В. Ильин [и др.]. - Санкт-Петербург, 2018. - 289 с.

5. Косова В.А., Гасюк Д.П. К вопросу анализа условий разработки технологических процессов машиностроительных предприятий // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2021. № 2. С. 655-658.

6. Чварков С.В. Модель и алгоритм оптимизации решений по технической подготовке предприятия к выполнению государственного оборонного заказа // Научный вестник оборонно-промышленного комплекса России. 2020. № 4. С. 5-11.

7. Федотова А.М., Гасюк Д.П. Анализ рисков возникновения проблем с качеством технологической подготовки производства и разработка мероприятий по их снижению в условиях АО "НИИЭФА" // Металлообработка. 2021. № 1 (121). С. 50-54.

8. Тебекин А.В. Методический подход к моделированию процессов формирования планов инновационного развития предприятий / А.В. Тебекин, Т.Н. Сауренко [и др.] // Журнал исследований по управлению. 2019. Т. 5. № 1. С. 65-72.

9. Гасюк Д.П. Нормативно-правовые основы создания, цели, задачи и функции группы стандартизации и каталогизации вооружения, военной и специальной техники // В сборнике: Актуальные проблемы защиты и безопасности. труды XXII Всероссийской научно-практической конференции РАРАН. 2019. С. 370-374.

10. Гасюк Д.П., Филатов И.Н. Информационное обеспечение процесса обоснования требований к уровню унификации продукции // Труды международного симпозиума "Надежность и качество". 2007. Т. 1. С. 15-18.

11. Зегжда П.Д. Модели и метод поддержки принятия решений по обеспечению информационной безопасности информационно-управляющих систем / П.Д. Зегжда [и др.] // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. 2018. № 1. С. 43-47.

12. Касяненко Е.О., Гасюк Д.П. Применение процессного подхода для оптимальной работы предприятия // В сборнике: Неделя науки СПбПУ. материалы научной конференции с международным участием. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. 2016. С. 26-29.

13. Новиков М. П. Основы технологии сборки машин и механизмов / С. Л. Мартенс, Л. Н. Корякина, И. К. Капралова, Л. А. Макарова, А. М. Усачева, А. А. Снастина, Л. Н. Наумов; под ред. С. Л. Мартенс, Л. Н. Корякина. - 5-е изд. - Ленинград: «Машиностроение», 1980. - 592 с.

14. Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г., Босов Д.Б. Сетевые модели и методы ресурсно-временной оптимизации в управлении инновационными проектами.- Москва, 2006.- 117 с.

15. Гасюк Д.П., Ларькин В.В. К вопросу о современном состоянии и перспективах развития системы освоения ракетного вооружения // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. 2017. № 1 (96). С. 34-40.

16. Мегера Ю.А., Гасюк Д.П., Бурлаков А.А. Анализ взаимодействия системы технического обслуживания и ремонта вооружения и военной техники с оборонно-промышленным комплексом // В сборнике: Проблемы технического обеспечения войск в современных условиях. Труды II межвузовской научно-практической конференции. 2017. С. 314-317.

17. Мегера Ю.А., Гасюк Д.П., Меженев А.В. Адаптация системы технического обслуживания и ремонта к системе комплексного сервисного обслуживания // В

сборнике: Проблемы технического обеспечения войск в современных условиях: Труды II межвузовской научно-практической конференции. 2017. С. 318-322.

18. Асадуллаева С. В. Организация, планирование и управление процессами технологической подготовки производства на основе сетевого планирования оснащения стендового хозяйства: выпускная квалификационная работа магистра (27.04.06)/ Соловейчик Кирилл Александрович. - Санкт-Петербург, 2019. - 89 с.

19. Сетевое планирование как метод эффективного управления, контроля и регулирования технологических процессов [Электронный ресурс] / Самарский гос. Архитектурно-строительный университет. - Электрон.дан. - Самара, 2019. - Режим доступа: <https://studfile.net/preview/8968196/>

Д.П. Гасюк, Е.Г. Деева  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Санкт-Петербург, Россия, [liza.deeva@list.ru](mailto:liza.deeva@list.ru)

## ВЫБОР СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЯ ДЛЯ ЛИНЕЙНЫХ РАЗМЕРОВ

### Аннотация

В статье рассматривается погрешность измерения и термины, связанные с измерениями. Приводятся методики выбора с описанием действий.

*Ключевые слова:* точность, измерение, размер, погрешность

Уровень качества продукции является важнейшим показателем всей работы предприятия. Изучение способов управления качеством способствует систематическому улучшению качества выпускаемой продукции, что обеспечивает улучшение производства [1 - 7]. Важная роль в обеспечении качества продукции принадлежит информационному обеспечению управления технологическими процессами. При этом существенным условием является целостность, доступность и достоверность используемой информации [8 - 10].

Одним из основных факторов, определяющих достоверность информации, является точность измерений. Точность измерения зависит от принципа действия, конструкции прибора, а также от настройки и применения. Для того, чтобы выбрать средства измерения нужно сравнить предельную погрешность измерения конкретного средства измерения с расчетной допускаемой погрешностью измерения, регламентированной стандартами [11, 12]. При этом предельная погрешность не должна превышать допускаемую, составляющую обычно  $20 \div 35\%$  от величины допуска на размер.

По ГОСТ 8.051-81 допускаемые значения случайной погрешности измерения ( $\delta$  изм.), приравниваются зоне  $\pm 2\sigma$  (закон распределения погрешностей – нормальный, где  $\delta$  – среднеквадратическое отклонение результатов измерения)

Средство измерений – техническое средство, предназначенное для измерений, имеющее нормированные метрологические характеристики, воспроизводящее и (или) хранящее единицу физической величины, размер которой принимают неизменным (в пределах установленной погрешности) в течение известного интервала времени.

Они делятся на:

мера физической величины — средство измерений, предназначенное для воспроизведения и (или) хранения физической величины одного или нескольких заданных размеров, значения которых выражены в установленных единицах и известны с необходимой точностью;

Для линейных и угловых измерений различают:

- плоскопараллельные концевые меры длины (ГОСТ 9038-83) [13].;
- угловые меры (ГОСТ 2875-75) [14].;
- специальные меры и эталоны, которые служат для настройки приборов [15].

Измерительный прибор — средство измерений, предназначенное для получения значений измеряемой физической величины в установленном диапазоне;

измерительный преобразователь — техническое средство с нормируемыми метрологическими характеристиками, служащее для преобразования измеряемой



величины в другую величину или измерительный сигнал, удобный для обработки, хранения, дальнейших преобразований, индикации или передачи;

измерительная установка (измерительная машина) — совокупность функционально объединённых мер, измерительных приборов, измерительных преобразователей и других устройств, предназначенная для измерений одной или нескольких физических величин и расположенная в одном месте;

измерительная система — совокупность функционально объединённых мер, измерительных приборов, измерительных преобразователей, ЭВМ и других технических средств, размещённых в разных точках контролируемого объекта и т.п. с целью измерений одной или нескольких физических величин, свойственных этому объекту, и выработки измерительных сигналов в разных целях;

измерительно-вычислительный комплекс — функционально объединённая совокупность средств измерений, ЭВМ и вспомогательных устройств, предназначенная для выполнения в составе измерительной системы конкретной измерительной задачи.

Методика измерений: совокупность конкретно описанных операций, выполнение которых обеспечивает получение результатов измерений с установленными показателями точности. [16]

Погрешность - представляет собой отклонение результата измерения от истинного значения измеряемой величины.

Так как истинное значение величины определить невозможно, в связи с отсутствием средств измерения, не имеющих погрешностей, на практике вместо истинного значения принимают величину, полученную измерением средствами с высокой точностью.

Существуют погрешность измерительного прибора и погрешность результата измерения, полученного с помощью этого прибора.

Погрешность измерительного прибора может быть вызвана несовершенством его конструкции, неточностью изготовления и сборки, а также его износом в процессе эксплуатации.

Погрешность результата измерения может состоять из: инструментальных погрешностей; метода измерения; установочной меры и установки по ней прибора; погрешностей, вызванных отклонением температуры измерения от нормальной; измерительной силой прибора и непостоянством этой силы, погрешности, связанные с неточностью базирования измеряемой детали, износом измерительного прибора и др.

Для линейных размеров основной погрешностью измерения является абсолютная погрешность измерения, выражаемая в единицах измеряемой величины.

Универсальные средства измерения выбираются по величине допускаемой (расчетной) погрешности измерения в зависимости от допуска детали.

Методики выбора:

1. Приближенная - данная методика широко применяется при ориентировочном выборе средств измерения, при проведении метрологического контроля и экспертизы нормативно-технической и конструкторской и технологической документации.

Определяется допуск размера детали. Допуск размера детали (Т.дет) выбирается в зависимости от заданного качества точности по ГОСТ 25347-81 и ГОСТ 25346-81.

Рассчитывается допускаяемая погрешность измерения: Допускаемая погрешность измерения принимается 25% от величины допуска на размер, то есть  $\sigma_{изм} = 0,25 \cdot T_{дет}$

Рассчитывается случайная составляющая допускаемой погрешности измерения.

2. Расчетная - данная методика применяется при выборе средств измерения для единичного и мелкосерийного производства, для экспериментальных исследований, для измерения выборки при статистическом методе контроля, для повторной перепроверки деталей, забракованных контрольными автоматами.

Определяется допуск размера детали в зависимости от заданного качества точности по ГОСТ 25347-81 и ГОСТ 25346-81.

Рассчитывается по формуле:

$$\frac{\Delta Lim_{расч} \cdot 100\%}{T_{дет}}$$

По справочным таблицам выбирается средство измерения в зависимости от детали (вал или отверстие) при условии  $\pm \leq (0,6 \dots 0,8)$   $\sigma_{изм}$  расч.

В метрологическую карту заносятся метрологические характеристики выбранного средства измерения.

3. Табличная методика рекомендуется для выбора средств измерения при серийном, крупносерийном и массовом производстве, если предусмотрены измерения, а не контроль с применением калибров.

Определяется допуск размера детали. Допуск размера детали ( $T_{дет}$ ) выбирается в зависимости от заданного качества точности по ГОСТ 25347-81 и ГОСТ 25346-81.

Определяется допускаемая погрешность измерения. В основе табличной методики лежит ГОСТ 8.051-81 "Погрешности, допускаемые при измерении линейных размеров до 500 мм". Данный стандарт устанавливает значения допускаемых погрешностей измерения  $\sigma_{изм}$  в зависимости от допуска IT и 13 основных интервалов номинальных размеров для 2...17-го классов. Значение  $\sigma_{изм}$  определяют для любых значений допуска.

Рассчитывается случайная составляющая допускаемая погрешность измерения (аналогично п. 2.1.3.) По справочным таблицам выбирается средство измерения в зависимости от детали (вал или отверстие) при условии  $\pm \leq (0,6 \dots 0,8)$   $\sigma_{изм}$ .

В метрологическую карту заносятся метрологические характеристики выбранного средства измерения [17,18]. Следует помнить, что наименования средств измерений выбираются из специальных таблиц предельных погрешностей измерений РД 50-98-86.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Глухов В.В., Гасюк Д.П. Управление качеством.- Санкт-Петербург, 2013. 399 с.

2. Гасюк Д.П. О содержании сущности качества менеджмента, качества продукции и их гармонизации // В сборнике: Управление качеством в интересах устойчивого развития. Сборник материалов межвузовской научно-практической конференции. 2019. С. 31-36.

3.. Косова В.А., Гасюк Д.П. К вопросу анализа условий разработки технологических процессов машиностроительных предприятий // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2021. № 2. С. 655-658.

4. Гасюк Д.П., Хрулев В.Л. Законы и принципы развития и функционирования системы обеспечения ракетных войск и артиллерии ракетами и боеприпасами в современных условиях // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. 2015. № 2 (87). С. 20-22.
5. Тебекин А.В. Способ формирования комплексных показателей качества инновационных проектов и программ / А.В. Тебекин, Т.Н. Сауренко [и др.] // Журнал исследований по управлению. 2018. Т. 4. № 11. С. 30-38.
6. Анисимов В.Г. Модель поддержки принятия решений при формировании товарной стратегии и производственной программы предприятия / В.Г. Анисимов[и др.] // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экономика. 2016. № 2. С. 62-73.
7. Тебекин А.В. Методический подход к моделированию процессов формирования планов инновационного развития предприятий / А.В. Тебекин, Т.Н. Сауренко [и др.] // Журнал исследований по управлению. 2019. Т. 5. № 1. С. 65-72.
8. Анисимов Е.Г., Анисимов В.Г., Солохов И.В. Проблемы научно-методического обеспечения межведомственного информационного взаимодействия // Военная мысль. 2017. № 12. С. 45-51.
9. Зегжда П.Д. Модели и метод поддержки принятия решений по обеспечению информационной безопасности информационно-управляющих систем / П.Д. Зегжда [и др.] // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. 2018. № 1. С. 43-47.
10. Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г., Бажин Д.А., Барабанов В.В., Филиппов А.А. Модели организации и проведения испытаний элементов системы информационного обеспечения применения высокоточных средств // Труды Военно-космической академии им. А.Ф. Можайского. 2015. № 648. С. 6-12.
11. РД 50-98-86. Методические указания по применению ГОСТ 8.051-81.
12. ГОСТ 8.051-81 - «Государственная система обеспечения единства измерений. Погрешности, допускаемые при измерении линейных размеров до 500 мм»
13. ГОСТ 9038-83 - Меры длины концевые плоскопараллельные. Технические условия
14. ГОСТ 2875-75 - «Меры угловые призматические. Технические требования».
15. Справочник контролера машиностроительного завода. Допуски, посадки, линейные измерения/ под ред. А.И. Якушева - М.: Машиностроение, 1980. - 527 с.
16. Федеральный закон от 26 июня 2008 г. N 102-ФЗ "Об обеспечении единства измерений"
17. Белкин, И.М. Средства линейно-угловых измерений: справочник/ И.М. Белкин. - М.: Машиностроение, 1987. - 368 с.
18. ГОСТ 8.009-84. ГСИ. Нормируемые метрологические характеристики средств измерений.

Д.П. Гасюк, Ю.А. Валуйских  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Санкт-Петербург, Россия

## **СОЗДАНИЕ И ВНЕДРЕНИЕ СИСТЕМЫ МЕНЕДЖМЕНТА КАЧЕСТВА НА ПРЕДПРИЯТИИ МАШИНОСТРОЕНИЯ НА ОСНОВЕ РИСК-ОРИЕНТИРОВАННОГО МЫШЛЕНИЯ**

### **Аннотация**

В работе представлено создание и внедрение системы менеджмента качества на предприятии машиностроения на основе риск-ориентированного мышления.

*Ключевые слова:* риск-ориентированное мышление, система менеджмента качества, машиностроение.

В настоящее время в мире господствуют процессы глобализации и технологизации, предполагающие значительное изменение не только политической и социально-экономической среды на общемировом уровне [1 - 6], но также и бизнес-моделей предприятий, позволяя сформировать их новый облик [6 - 10]. Необходимо отметить тот факт, что в условиях развития конкуренции отдельные элементы хозяйственной деятельности предприятия оказываются особенно важными для качественного и количественного улучшения предпринимательской деятельности, и одним из таких элементов является качество выпускаемой продукции [11 - 14]. Опираясь на работу KyriakopoulosGL, можно отметить то, что парадигма качества с точки зрения бизнеса и предоставления услуг является очень существенным фактором, поскольку она содержит в себе способность удовлетворять потребности клиентов в широком спектре бизнес-направленности, что положительным образом скажется на конкурентоспособности предприятия [15]. В связи с увеличивающимся значением качества, как одной из необходимых предпосылок возрастания конкурентоспособности организации в современных условиях рыночной экономики, был разработан системный подход к менеджменту обеспечения качества продукции, который позволил сформировать новое понимание того, как должно развиваться предприятие в рыночных условиях.

Система менеджмента качества (СМК) представляется комплексным феноменом, но в целом её можно описать как формальную систему, которая документирует процессы стратегий, процедур и ответственности за достижение политики и целей в области качества, как подчеркнул в своем исследовании Al-KhuzaiNAW [16]. Шубина Л.Д. представляет более лаконичную формулировку данного концепта, выражая СМК как «систему, направленную на достижение целей и осуществление эффективной политики в области качества на предприятии» [17]. В обоих случаях, константой является качество, как неотъемлемая часть благоприятного функционирования предприятия. Однако, стоит заметить, что, помимо качества, как превалирующего фактора СМК, в данную парадигму могут оказывать влияние и другие факторы [18]. Одним из таких факторов можно назвать риск и базирующееся на этом риск-ориентированное мышление. Как отметили Соловьев В.П. и Перескокова Т.А., одной из ключевых целей СМК является действие на предупреждение, и предупреждающее действие как раз может быть реализовано благодаря риск-ориентированному мышлению [19].

В целом, именно риск-менеджмент [и риск-ориентированное мышление, как составляющая риск-менеджмента] можно считать связующим звеном между различными концепциями в менеджменте для построения эффективной системы менеджмента на основе оценки риска с учетом специфики применения каждой организации. Это и стало одной из основ новой концепции формирования СМК – ИСО 9001-2015, где риск-ориентированное мышление стало основным принципом построения и функционирования СМК. Важно подчеркнуть тот факт, что если ранее в СМК нечто подобное проявлялось, но не так явно, в новой редакции ИСО 9001-2015 риск-ориентированный подход проходит «красной нитью» через все требования, предполагая, что именно он, наряду с процессным подходом, позволит достигнуть наивысшей результативности СМК [20]. Более того, именно риск-ориентированное мышление позволяет снизить или практически полностью нивелировать вероятность отрицательных результатов, способствуя достижению желаемой цели деятельности предприятия. В целом, под риском [с точки зрения бизнеса] понимается вероятность возникновения, потерь, убытков, а также снижение поступления планируемых доходов и прибылей.

Выше было отмечено, что необходимо учитывать специфику применения СМК и риск-ориентированного подхода в зависимости от особенностей организации. Если брать, к примеру, предприятие машиностроительной отрасли, то СМК с опорой на риск-ориентированное мышление будет характеризоваться совершенно другими свойствами в отличии, например, от организации финансового сектора. На компанию в машиностроительной отрасли действует множество рисков различной природы, которые должны быть учтены при создании и внедрении СМК. На основе анализа содержания работы Никитиной Ю.М. [21], можно сделать вывод о том, что деятельность машиностроительных предприятий отличается наличием специфических этапов по подготовке, производству и реализации продукции, что провоцирует возникновение рисков специфической природы. Но даже несмотря на предполагаемую специфику деятельности, целесообразно придерживаться единого процесса риск-менеджмента, к примеру цикла Шухарта Деминга (англ. PDCA) [21]. Данный процесс состоит из следующих этапов, который и может стать одним из основных элементов риск-ориентированного мышления в синергии с СМК, что представлено в работе Спиридоновой А.А. и Хомутовой Е.Г. [22]: определение ситуации, оценка риска, идентификация риска, анализ риска, оценивание риска и воздействие на риск. Взаимосвязи между составными частями в схеме подобного цикла представлены на рис. 1.

Однако независимо от шага данного процесса, также необходимо вводить такие процессы, как «обмен информацией и консультирование», «пересмотр» и «мониторинг», что позволит оперативно реагировать на изменение в конъюнктуре риска, внедряя все аспекты риск-ориентированного мышления в СМК, которая должна строиться с учётом следующих аспектов [22]:

1. Организация – распределение полномочий и ответственности;
2. Процессы – специфика деятельности в организации, взаимосвязь рабочих процессов, нацеленность на результат;
3. Документы – документированная форма осуществления деятельности организации;
4. Ресурсы – трудовые, финансовые, инфраструктура и др. – главное средство реализации СМК.

В ИСО 9001-2015 регламентировано, что для результативного функционирования СМК в организации необходимо понимать её среду [внешнюю и внутреннюю], построение СМК с учётом риск-ориентированного мышления, что обеспечит успешное её развитие. Для реализации риск-ориентированного мышления в практике машиностроительного предприятия его руководством разрабатывается соответствующий стандарт организации (СТО), раскрывающий специфику менеджмента рисков конкретного предприятия, и содержащий следующие разделы [20]:

1. Анализ рисков;
2. Оценивание рисков;
3. Управление рисками;
4. Производственная информация.

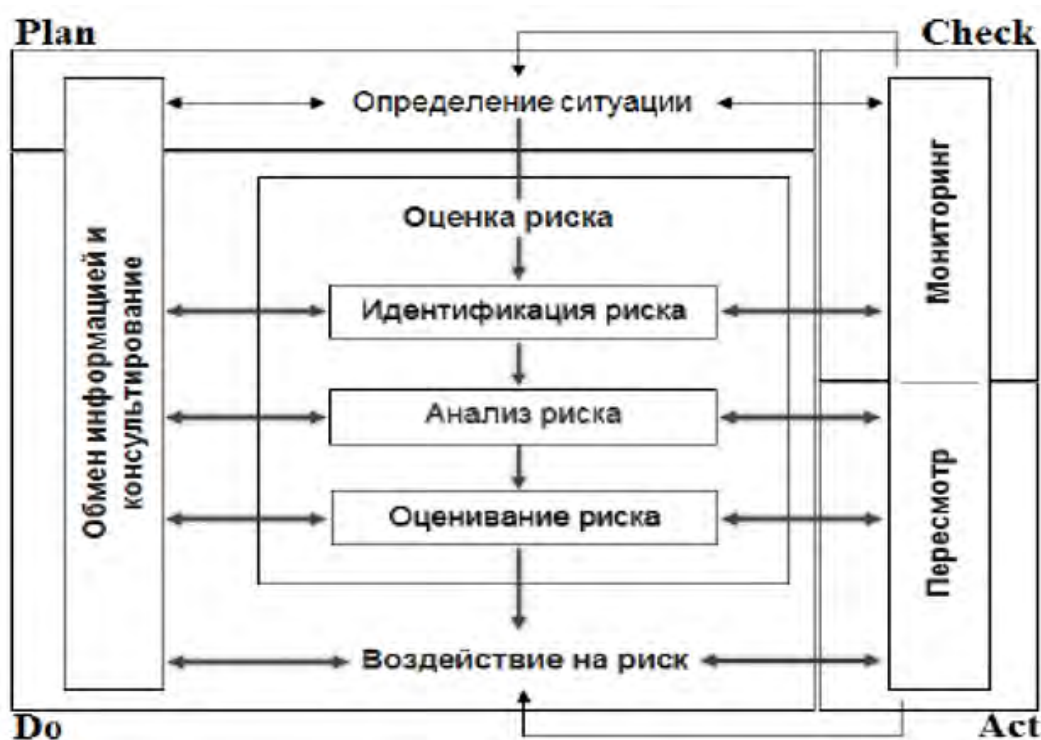


Рисунок – 1. Схема цикла Шухарта Деминга (англ. PDCA)

Более того, в разделе «анализ рисков» необходимо классифицировать возможные виды рисков, особенно в специфике деятельности машиностроительного предприятия, которая отличается технически сложным производством. Машиностроительное предприятие при создании и внедрении СМК на основе риск-ориентированного мышления может более подробно раскрыть источники и содержание рисков и методы их управления. Так, риски можно классифицировать следующим образом: по роду опасности, по сфере проявления, по возможности предвидения, по источникам возникновения и по размеру возможного ущерба.

Также необходимо отметить, что функционирование СМК, созданной на основе риск-ориентированного мышления [в общем смысле] в контексте функционирования машиностроительного предприятия – задача комплексная, поэтому необходимы контроль и решение проблем, носящие систематический характер. В связи с этим можно предложить единые одиннадцать шагов, которыми стоит руководствоваться при возникновении той или иной проблемой ситуации в процессе производственной деятельности предприятия. Помимо этого, можно

применять просто отдельные шаги, если это позволяет обстоятельство. Так, одиннадцать шагов выражены следующими признаками [23]:

1. Обобщение и определение требований. Анализ воздействия окружающей среды на бизнес-цели внутри организации;
2. Четкое определение угроз и опасностей в контексте организации;
3. Оценка ситуации, анализ ограничений, непосредственная оценка рисков;
4. Анализ взаимодействия между контекстом организации и другими элементами системы (технологиями, людьми, внешняя среда и др.);
5. Подробный анализ причин, их взаимосвязей и их влияния на величину риска;
6. Оценка мер по управлению рисками;
7. Представление предлагаемого решения заинтересованным сторонам;
8. Оценка эффективности представленных мер по их влиянию на риски и возможности по развитию организации;
9. Реализация предложенных мер;
10. Оценка эффективности и действенности реализованных мер по снижению или удалению рисков;
11. Мониторинг и управление изменениями.

В вышеприведенном составе шагов шестой шаг предполагает оценку мер по управлению рисками. Так, руководство машиностроительного предприятия может воспользоваться следующими мерами, которые смогут не только снизить степень проявления риска, но также выявить причины его возникновения [19]:

1. Разрабатывать и применять предупреждающие действия для исключения возникновения риска [в контексте функционирования предприятия машиностроительной отрасли, к примеру, выбирать только проверенных поставщиков для производства, контролировать работоспособность оборудования, проводить повышение квалификации сотрудников и др.];

2. Признание риска с возможностью его локализации финансовыми средствами из заложенного заранее бюджета организации [в контексте функционирования предприятия машиностроительной отрасли, к примеру, может помочь осознание, что какое-либо оборудование может быть подвергнуто износу и которое не сможет быть налажено, вследствие чего важно заложить в бюджет средства на будущую покупку нового оборудования];

3. Разделение риска с другими сторонами [в контексте функционирования предприятия машиностроительной отрасли, к примеру, если была повышена цена на первоначальное сырье для производства того или иного товара, конечные потребители могут быть поставлены в положение заплатить больше за товар, чем было прежде];

4. Смягчение риска благодаря предупреждающим действиям [в контексте функционирования предприятия машиностроительной отрасли, к примеру, можно проводить регулярный технический осмотр оборудования, чтобы вовремя обнаружить фактор вероятной неисправности];

5. Привлечение дополнительных ресурсов для снижения степени негативного воздействия риска [в контексте функционирования предприятия машиностроительной отрасли, к примеру, руководство может застраховать собственные возможные убытки].

Принимая во внимание также фактор постоянного развертывания и увеличения использования информационных технологий, особенно в таких наукоемких производствах, какими являются машиностроительные предприятия, при создании и

внедрении СМК на основе риск-ориентированного мышления необходимо разрабатывать систему внутреннего информирования, обработки и анализа информации о рисках, которая позволит стать одним из инструментов СМК в организации в контексте управления рисками. Такая система может содержать в себе синергию функционирования таких компонентов, как [23]:

1. Экспертная информация о рисках, влияющих на прибыль машиностроительного предприятия;
2. Хранение релевантной информации в базе данных;
3. Представление обобщенной информации в виде отчетов о рисках;
4. Разработка мероприятий по управлению рисками;
5. Информационное сопровождение обучения персонала в области управления рисками.

Таким образом, можно сделать вывод, что СМК машиностроительного предприятия, созданная на основе риск-ориентированного мышления должна быть ориентированной на комплексность оценок, предупреждение и опережающее реагирование на риски, которые могут в той или иной степени повлиять на конъюнктуру деятельности организации. Подобный подход позволит всецело обеспечить желаемые показатели адаптивности компании к вызовам внешней и внутренней среды, в итоге положительно сказываясь на результативности её функционирования.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сауренко Т.Н., Чварков С.В. Экономическая политика в системе национальной безопасности российской федерации // Национальные приоритеты России. 2016. № 3 (21). С. 22-32.

2. Тебекин А.В., Анисимов Е.Г. О фронтах гибридной войны в экономическом и геополитическом пространстве // Журнал исследований по управлению. 2020. Т. 6. № 5. С. 60-74.

3. Гарькушев А.Ю., Селиванов А.А., Чварков С.В. Сущность и проблемы управления обеспечением безопасности и обороной государства // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. 2016. № 3 (93). С. 3-10.

4. Солохов И.В. Проблемы научно-методического обеспечения межведомственного информационного взаимодействия // Военная мысль. 2017. № 12. С. 45-51.

5. Анисимов В.Г. Макромодель структурных изменений экономики государства на этапах ее эволюционного развития/ В.Г. Анисимов, Е.Г. Анисимов [и др] // Журнал исследований по управлению. 2020. Т. 6. № 4. С. 69-77.

6. Касяненко Е.О., Гасюк Д.П. Применение процессного подхода для оптимальной работы предприятия // В сборнике: Неделя науки СПбПУ. материалы научной конференции с международным участием. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. 2016. С. 26-29.

7. Тебекин А.В. Методический подход к моделированию процессов формирования планов инновационного развития предприятий / А.В. Тебекин, Т.Н. Сауренко [и др.] // Журнал исследований по управлению. 2019. Т. 5. № 1. С. 65-72.

8. Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г., Босов Д.Б. Сетевые модели и методы ресурсно-временной оптимизации в управлении инновационными проектами.- Москва, 2006.- 117 с.



9. Мегера Ю.А., Гасюк Д.П., Меженов А.В. Адаптация системы технического обслуживания и ремонта к системе комплексного сервисного обслуживания // В сборнике: Проблемы технического обеспечения войск в современных условиях: Труды II межвузовской научно-практической конференции. 2017. С. 318-322.
10. Мегера Ю.А., Гасюк Д.П., Бурлаков А.А. Анализ взаимодействия системы технического обслуживания и ремонта вооружения и военной техники с оборонно-промышленным комплексом // В сборнике: Проблемы технического обеспечения войск в современных условиях. Труды II межвузовской научно-практической конференции. 2017. С. 314-317
11. Глухов В.В., Гасюк Д.П. Управление качеством.- Санкт-Петербург, 2013. 399 с.
12. Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г., Черныш А.Я. Эффективность инвестиций. Методологические и методические основы.- Москва: Военная Ордена Ленина, Краснознамённая, Ордена Суворова Академия Генерального штаба Вооруженных сил Российской Федерации, 2006.- 123 с.
12. Зегжда П.Д. Методический подход к построению моделей прогнозирования показателей свойств систем информационной безопасности / П.Д. Зегжда, А.Ф. Супрун[и др.] // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. 2019. № 4. С. 45-49.
13. Гасюк Д.П. О содержании сущности качества менеджмента, качества продукции и их гармонизации // В сборнике: Управление качеством в интересах устойчивого развития. Сборник материалов межвузовской научно-практической конференции. 2019. С. 31-36.
14. Тебекин А.В. Способ формирования комплексных показателей качества инновационных проектов и программ / А.В. Тебекин, Т.Н. Сауренко[и др.] // Журнал исследований по управлению. 2018. Т. 4. № 11. С. 30-38.
15. Kyriakopoulos, G.L. 2019. The role of quality management for effective implementation of customer satisfaction, customer consultation and self-assessment, within service quality schemes: A review // African Journal of Business Management 5(12):4901-4915.
16. Al-Khuzai HAW. 2021. Quality Management System // ResearchGate 12(1):173-175.
17. Шубина, Л.Д. Система менеджмента качества // Наука и образование сегодня. - 2019. - 2. - С. 38-40.
18. Глухов В.В., Гасюк Д.П. Аудит систем менеджмента качества.- Санкт-Петербург, 2019.
19. Соловьев В.П., Перескокова Т.А. Процессное и риск-ориентированное мышление работников // Экономика в промышленности. - 2020. - 2. - С. 206-217.
20. ГОСТ Р ИСО 9001-2015. Системы менеджмента качества. Требования.
21. Никитина, Ю.М. Характерные риски российских машиностроительных предприятий // Синергия наук. - 2017. - 18. - С. 396-401.
22. Спиридонова, А.А., Хомутова Е.Г. Риск-ориентированный подход в системе менеджмента качества промышленного предприятия: проблема выбора методов управления рисками // Организатор производства. - 2017. - № 2. - С. 92-100.
23. Pačaišova, H., Markulik S., Turisova R., Nagyova A. 2018. How to Build Risk-based Thinking Methodology Based on Process Approach // ActaMechanica Slovakia 22(1):24-32.

Д.П. Гасюк, К.С. Гречина  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого  
Санкт-Петербург, Россия

## **ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССА ПРЕССОВАНИЯ, ОКАЗЫВАЮЩИЕ СУЩЕСТВЕННОЕ ВЛИЯНИЕ НА СОСТАВ И СОДЕРЖАНИЕ ТРЕБОВАНИЙ К ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОСНАСТКЕ ДЛЯ ПРЕССОВАНИЯ СПЕЦСОСТАВА В ДУГОВОЙ КАНАЛ КОЛЬЦА ВЗРЫВАТЕЛЯ**

### **Аннотация**

В работе рассмотрены особенности процесса прессования спецсостава в дуговой канал кольца, а также необходимые условия хранения и эксплуатации состава, для его безопасного использования. В результате проделанной работы было разработано техническое задание на изготовление специальной оснастки с учётом факторов, влияющих на качество процесса запрессовывания канала кольца взрывателя в соответствии с конструкторской документацией и техническими условиями.

*Ключевые слова:* взрыватель, дуговой канал кольца, прессование, спецсостав, техническое задание, технологический процесс, взрывчатое вещество.

### **Введение**

Совершенствование технологических процессов производства взрывателей является важной задачей, от решения которой существенно зависит качество боеприпасов используемых различными видами и родами войск и затраты на реализацию всех стадий их жизненного цикла [1 - 11]. При этом в ходе проектирования технологического процесса прессования спецсостава в дуговой канал кольца взрывателя возникает ряд особенностей данного процесса и, прежде всего, тот факт, что данный процесс является специальным, особо ответственным процессом, т.к. основным признаком данного процесса является то, что он является взрывопожароопасным.

### **Методы**

При изучение данной темы были использованы: научная и нормативная литература на тему прессования спецсостава, а также опыт, полученный АО «НПО «Поиск» при их многолетней работе с взрывателями разных типов.

### **Результаты и обсуждения**

Особенностью конструкции взрывателя является то, что кольцо представляет собой один из элементов огневой цепи взрывателя. Для горения взрывчатого вещества (ВВ), запрессованного в кольцо, перед ним в механизме взрывателя размещают электро-воспламенитель (ЭВ), электро-детонатор (ЭД) или капсуль воспламенитель (КВ), который в свою очередь инициирует работу спецсостава в кольце. Горение дугового канала обеспечивает передачу импульса горения на капсуль детонатор (КД), передаточный заряд (ПЗ) или вышибной заряд (ВЗ). На рисунки 1 представлен эскиз кольца.

Виды снаряжения с точки зрения методов наполнения взрывателя подразделяют на:

- заливку;
- механическое наполнение;
- набивку или насыпку.

Данные методы наполнения связаны в существенной степени с рисками возникновения в процессе выполнения данной специальной технологической операции взрывопожароопасных явлений.

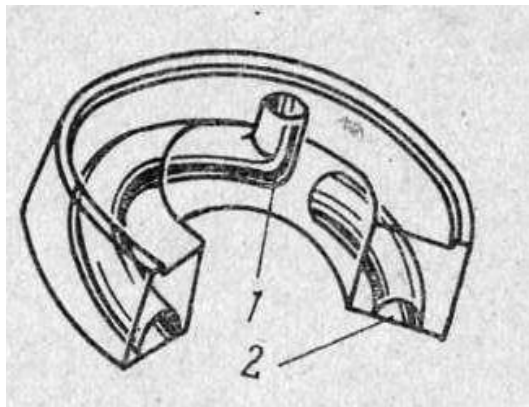


Рисунок 1 – Эскиз кольца, 1– Передаточный пороховой столбик; 2– медленно горящий пороховой состав

Одним из направлений снижения рисков является разработка специальной оснастки, позволяющей безопасно осуществлять технологический процесс прессования специального состава в дуговом канале кольца взрывателя. В связи с этим были определены требования к данной специальной технологической оснастке, которые нашли отражение при разработке технического задания на проектирование оснастки для прессования специальных составов в дуговой канал кольца взрывателя с применением гидравлических прессов, методом механического наполнения.

Особенности процесса прессования, оказывающие существенное влияние на состав и содержание требований к технологической оснастке в ходе её разработки, вызваны рядом факторов [12, 13].

Прежде всего, прессуемость ВВ – нестабильный процесс, зависит от условий и технологии изготовления состава, а также от условий хранения.

Кристаллы ВВ имеют различную форму и размер. В таблице 1 представлены некоторые из них.

Условия хранения и прессования ВВ, в том числе температура, влажность. При пониженной влажности в помещении прессовать ВВ достаточно опасно, скопление статического электричества может привести к срабатыванию состава. Если состав хранить не в герметичной упаковке и при повышенной влажности (свыше 65%) он отсыреет, при условии последующей сушки в нормальных условиях - нет гарантии полного восстановления его изначальных свойств.

Высокая стоимость и сложность прессового оборудования и оснастки. Высокая стоимость и сложность обусловлена необходимостью обеспечения мер безопасности при эксплуатации данного оборудования: изготовление во взрывоопасном исполнении и дополнительное заземления отдельных элементов оборудования для снятия статического заряда.

Взрывопожароопасность процесса.

Прессование – это механическое воздействие на прессуемый состав. Ряд других факторов так же могут повлиять на детонацию состава во время прессования.

Таблица 1 – кристаллы взрывчатых веществ.

Наименование	Краткая характеристика	Изображение вещества
Гремучая ртуть	Мелкокристаллическое сыпучее вещество белого или серого цвета. Наиболее чувствительна к удару и тепловому воздействию в сравнении с другими инициирующими ВВ.	
Гексоген или триметилен-тринитроамин	Мелкокристаллическое вещество белого цвета. В воде не растворяется, не гигроскопичен, не агрессивен.	
ДРП-1	По внешнему виду пороха представляют собой полированные зерна серовато-черного цвета, не имеющие на поверхности налета выкристаллизовавшейся селитры и желтоватых крапин серы.	
Нитрат аммония	Кристаллическое вещество белого цвета. В качестве взрывчатых веществ используются смеси нитрата аммония с восстановителем, например - с алюминиевой пудрой (аммонал).	
Тротил	Кристаллическое вещество желтого цвета, обладающее сильной взрывчатой силой. Индивидуальное взрывчатое вещество, малочувствительное к удару и трению. Применяется для снаряжения боеприпасов и для взрывных работ в чистом виде и в смесях, напр. с аммиачной селитрой.	
Тетрил	Кристаллическое вещество белого цвета. Но цвет технического продукта светло-желтый, обусловлен примесями. Практически не растворим в воде. Не гигроскопичен. Мощное взрывчатое вещество, по взрывчатым характеристикам относится к вторичным (бризантным).	

Учёт данных факторов определяет особенности процесса прессования и определяет преимущества данного метода наполнения, к которым можно отнести следующие:

- большая восприимчивость ВВ к детонации после прессовки, так как между кристаллами при прессовании меньше пустот;
- уменьшение доли брака разрывного заряда по результатам выполнения данного специального технологического процесса;
- обеспечение механизации выполнения самого процесса.

Факторы, влияющие на качество оснастки для прессования:

- обоснованно разработанные конструкторская и технологическая документация (особенно проблематичным вопросом является расчет рабочей части пуансона);
- рациональный выбор оборудования, инструмента для изготовления специальной оснастки;
- выбор на основе входного контроля сырья, материалов для изготовления деталей данной оснастки;
- контроль технологической дисциплины исполнителей;
- настройка и аттестация технологического оборудования;
- достоверное и в полном объёме проведение испытания на время горения, для определения пригодности, в том числе и оснастки.

### **Заключение**

Проведенный анализ особенностей процесса прессования, позволил разработать технического задания на изготовление специальной оснастки с учётом факторов, влияющих на качество процесса запрессовывания канала взрывателя в соответствии с конструкторской документацией и техническими условиями, что обеспечит качество изготовления всего изделия в целом.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Гарькушев А.Ю., Селиванов А.А., Чварков С.В. Сущность и проблемы управления обеспечением безопасности и обороной государства // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. 2016. № 3 (93). С. 3-10.
2. Сауренко Т.Н., Чварков С.В. Экономическая политика в системе национальной безопасности российской федерации // Национальные приоритеты России. 2016. № 3 (21). С. 22-32.
3. Гасюк Д.П., Хрулев В.Л. Законы и принципы развития и функционирования системы обеспечения ракетных войск и артиллерии ракетами и боеприпасами в современных условиях // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. 2015. № 2 (87). С. 20-22.
4. Гасюк Д.П., Казенов И.Д. Способы обоснования затрат на эксплуатацию и ремонт ракетно-артиллерийского вооружения в условиях выполнения государственного оборонного заказа // В сборнике: Проблемы технического обеспечения войск в современных условиях: труды IV межвузовской научно-практической конференции. 2019. С. 269-273.
5. Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г., Черныш А.Я. Эффективность инвестиций. Методологические и методические основы.- Москва: Военная Ордена Ленина, Краснознамённая, Ордена Суворова Академия Генерального штаба Вооруженных сил Российской Федерации, 2006.- 123 с.

6. Гасюк Д.П., Казенов И.Д. К вопросу ценообразования процессов создания образцов ракетно - артиллерийского вооружения в условиях государственного оборонного заказа // В сборнике: Проблемы технического обеспечения войск в современных условиях: Труды III Межвузовской научно-практической конференции. 2018. С. 268-272.

7. Гасюк Д.П., Ларькин В.В. К вопросу о современном состоянии и перспективах развития системы освоения ракетного вооружения // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. 2017. № 1 (96). С. 34-40.

8. Мегера Ю.А., Гасюк Д.П., Бурлаков А.А. Анализ взаимодействия системы технического обслуживания и ремонта вооружения и военной техники с оборонно-промышленным комплексом // В сборнике: Проблемы технического обеспечения войск в современных условиях. Труды II межвузовской научно-практической конференции. 2017. С. 314-317.

9. Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г., Босов Д.Б. Сетевые модели и методы ресурсно-временной оптимизации в управлении инновационными проектами.- Москва, 2006.- 117 с.

10. Мегера Ю.А., Гасюк Д.П., Меженев А.В. Адаптация системы технического обслуживания и ремонта к системе комплексного сервисного обслуживания // В сборнике: Проблемы технического обеспечения войск в современных условиях: Труды II межвузовской научно-практической конференции. 2017. С. 318-322.

11. Анисимов Е.Г., Анисимов В.Г., Сазыкин А.М., Усиков Р.Ф. Методические положения сокращения объема выборки при испытаниях артиллерийских боеприпасов // Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. 2019. № 9-10 (135-136). С. 90-96.

12. Шиллинг Н.А., Взрывчатые вещества и снаряжение боеприпасов. Краткий курс. - Москва: ОБОРОНГИЗ, 1946.

13. ГОСТ 1028-79. Пороха дымные.

А.М. Федотова, Д.П. Гасюк  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Санкт-Петербург, Россия, [fedotovaanny@gmail.com](mailto:fedotovaanny@gmail.com)

## ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА ОБНАРУЖЕНИЯ И ОЦЕНКИ РИСКОВ В ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОМ МАШИНОСТРОЕНИИ

### Аннотация

В данной статье приводятся факторы и их численные показатели, влияющие на эффективность технологического процесса. Показатели рассчитаны и описано как на них влияет применение метода обнаружения и оценки рисков.

*Ключевые слова:* риск, обнаружение и оценка риска, внутрикамерные компоненты, эффективность, технологический процесс, уровень технологического процесса.

Путь налаживания технологического процесса производства в экспериментальном машиностроении — путь с большим количеством препятствий. Из-за сложности технологий, наладки оборудования, сложных для обработки материалов и т.д. затрачиваются финансовые временные и человеческие ресурсы. Снижается точность планирования бюджета на производство, увеличиваются трудозатраты, не учитывает возможности задержки поставок или дефицит материалов и комплектующих для производства, возможность возникновения рисков при работе с контрагентами и подрядчиками [1 - 7]. Также есть возможность определить неприемлемые риски и провести мероприятия по их предупреждению или устранению, помогает определить заведомо неудачные проекты.



Рисунок 1 — жизненный цикл продукции

На рисунке 1 представлен жизненный цикл продукции без применения метода обнаружения и оценки рисков. Из-за этого происходят затраты времени и ресурсов на предотвращение «произошедших рисков», совершенных на этапах исследования и обоснования разработки, разработки изделия и производства. Если стадии жизненного цикла изделия дополнить пунктом обнаружения и анализа рисков, то это в свою очередь поможет предугадать и предотвратить значительную часть «ошибок» жизненного цикла изделия [8, 9].

Для определения эффективности внедрения метода обнаружения и анализа рисков необходимо понять какие факторы влияют на стоимость процесса

производства (проекта). Оценка уровня технологического процесса согласно РД 50-532-85 оценивается по следующим показателям:

- показатель производительности труда;
- показатель применения прогрессивного технологического оборудования;
- показатель охвата рабочих механизированным и автоматизированным трудом;
- показатель использования материалов.

Факторами, влияющими на технико-экономические показатели в данном случае, являются время, затраченное на производство, материал, который удалось сэкономить, благодаря уменьшению брака и трудоемкость.

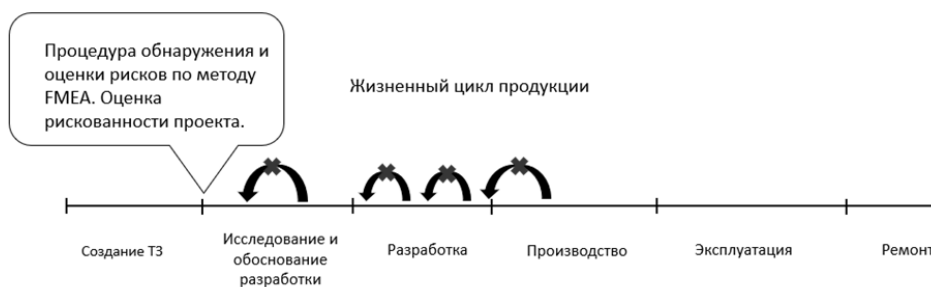


Рисунок 2 — жизненный цикл продукции с применением метода обнаружения и анализа рисков

Данные о стоимости каждой детали рассчитываются в таблице «Фактические затраты» в которой указываются прямые, накладные расходы, в том числе цены на материалы и их подготовку, технологические операции, неразрушающие контроли, зарплаты сотрудников и расходы на работу контр. агентов. Так как большая часть компонентов серийных изделий будет изготавливаться по договору о кооперации на ФГУП «Приборостроительный завод» города Челябинск, по причине того, что АО «НИИЭФА» не обладает большими производственными мощностями.

Например, в сумме на изготовление одного купола дивертора (внутрикамерного компонента экспериментального термоядерного реактора ИТЭР), не включая конструкторско-технологическую подготовку, необходимо потратить 11500 €. По факту сумма затрат получается больше, из-за некоторого количества бракованных изделий. Вследствие применения вышеуказанных методов процент изделий с дефектами должен сократиться, из-за этого будет сокращаться конечная стоимость изделий и в идеале, будет стремиться к запланированной стоимости.

Также по статье «Расходы на оплату труда» запланировано 132 исполнителя затраты на которых составят 148 157,100 тыс. рублей. Но фактически исполнители в разной степени, которая зависит от должности, потратят больше времени на работу из-за плохо спланированного процесса производства, ошибок в расчетах и при производстве. Это вероятнее всего приведет к переработкам со стороны сотрудников.

Ко всему вышеперечисленному, можно добавить и расходы на материал. Например, без применения метода обнаружения и анализа рисков не все купола дивертора в партии получались с первого раза. Бракованные детали изымаются из партии, а вместо них изготавливаются другие. Данный подход ведет к перерасходу материала относительно запланированных объемов. Что в итоге превращается в дополнительные финансовые расходы.

Для численной оценки показателей эффективности применения метода обнаружения и оценки рисков необходимо рассчитать численные показатели влияющих факторов.



Численный показатель эффективности технологического процесса можно выразить через расчет уровня технологических процессов производства изделия в условиях среднесерийного, мелкосерийного и единичного типов производств [10]. Уровень технологического процесса можно выразить по формуле:

$$y'_{\text{т.в.}} = \sum_{i=1}^n K_i \frac{\Pi_i}{\Pi_i^{K_i}} \quad (1)$$

где  $K_i$  - коэффициент весомости (важность показателя, стремится к 1);  $\Pi_i$  - показатель, характеризующий одно из свойств технологического процесса (точность, стабильность, воспроизводимость).

В данном случае за приоритетный показатель возьмем точность, так как именно его экспертная комиссия по обнаружению рисков считает наиболее важным в технологическом процессе производства внутрикамерных компонентов экспериментального термоядерного реактора ИТЭР. В процентном соотношении Показатель точности по значимости члены экспертной комиссии считают приоритетным, отдавая ему 60% оценки от уровня технологического процесса.

Расчет точности до применения метода обнаружения и оценки рисков:

$$y_{\text{т.в.}} = 1 \cdot \frac{0,6}{0,9} = 0,67$$

где  $\Pi_i = 0,6$  исходя из экспертной оценки, а  $\Pi_i^H = 0,9$  требуемый уровень точности процесса.

В идеале численно показатель эффективности технологического процесса должен стремиться к единице. Применение метода обнаружения и анализа рисков позволит предусмотреть ситуации, которые могут уменьшать точность процесса. По оценкам группы экспертов технической комиссии применение метода FMEA позволит повысить точность технологического процесса от 15 до 20 %, вследствие чего эффективность технологического процесса вырастет до 88% и будет максимально приближена к необходимому и ожидаемому уровню точности процесса. Графически динамика данного показателя эффективности процесса показана на рисунке 3.

Следующий фактор оценки технологического процесса— показатель использования материала. Все показатели рассчитываются на основе данных статистической отчетности предприятий [11].

Данный показатель можно найти по формуле:

$$\Pi_{\text{им.}} = \frac{M}{H} \quad (2)$$

где  $M$  - масса изделия;  $H$  - норматив расхода материала на изделие.

Норма расхода - максимально допустимое плановое количество сырья, материалов на производство единицы продукции (работы) установленного качества в планируемых условиях производства.

В составе нормы расхода материала следует учитывать:

- полезный расход материала;

- технологические отходы, обусловленные установленной технологией производства;

- потери материалов [11 - 13].

Расчет данного показателя до применения метода обнаружения и оценки рисков:

$$P_{\text{им.}} = \frac{6,38}{5,7} = 1,12$$

Из результатов расчетов видно, что имеется перерасход материала. Такие показатели можно связать с тем, что для отработки технологии механической обработки, в среднем, на партию из 10 штук пальцев купола дивертора одна штука точно уходит в брак. Причины этого могут быть разные: ошибки оператора станка, экстренной остановки станка в связи с отключением электроэнергии, ошибки позиционирования при установке детали на станок и т.д. К получившимся 10% перерасхода можно добавить еще несколько процентов брака, связанного с остальными комплектующими купола дивертора, такими как S-образные трубы коллектора, Ве-облицовка и другие.

После применения метода обнаружения ожидается понизить данный коэффициент.

Графически данный коэффициент показан на рисунке 4.

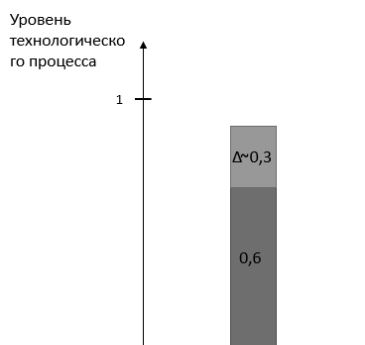


Рисунок 3 – Динамика изменения показателя эффективности после применения метода

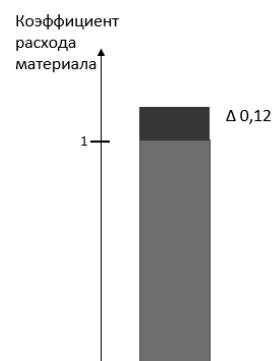


Рисунок 4 — Динамика изменения коэффициента расхода материала после применения метода обнаружения и оценки рисков

И наиболее важный и показательный фактор — трудозатраты. Трудозатраты показывают количество рабочего времени необходимого для выполнения определенных работ.

Трудозатраты можно найти по формуле:

$$\text{Трудоемкость(ч/час)} = \text{Кол-во сотрудников} * T, \quad (3)$$

где T– это время, потраченное на работу.

$$\text{Трудоемкость} = 132 \cdot 277904 = 36\,683\,328 \text{ (ч/ часов)}$$

В данном случае рассчитаны планируемые показатели трудоемкости (загрузка сотрудников), но фактическое это значение трудно оценить из-за невозможности полноценно отследить этот показатель. На практике данный показатель в среднем будет больше на 10-17 % из-за возможных непредвиденных ситуаций (рисков), которые возникают в процессе работы. К увеличению загрузки сотрудников могут привести, например, невозможность остановить процесс испытания, вследствие чего сотрудникам приходится выходить на работу в том числе в выходные и праздничные дни, или же внезапная поломка оборудования так же может привести к переработкам.

Применением метода обнаружения и анализа рисков можно снизить этот показатель до минимального уровня, чтобы он составлял не более 10%. Возможно будет исключить риски, связанные с обслуживанием и ремонтом оборудования, подготовки документов и получить возможность быстрее реагировать на внештатные ситуации.

Графически процесс применения метода обнаружения и оценки рисков показан на рисунке 5. Где красным показаны трудозатраты, которые возможно предотвратить применением данного метода, а бледно-синим трудозатраты, которые невозможно будет предотвратить, так как они не зависят от возможных возникающих рисков.

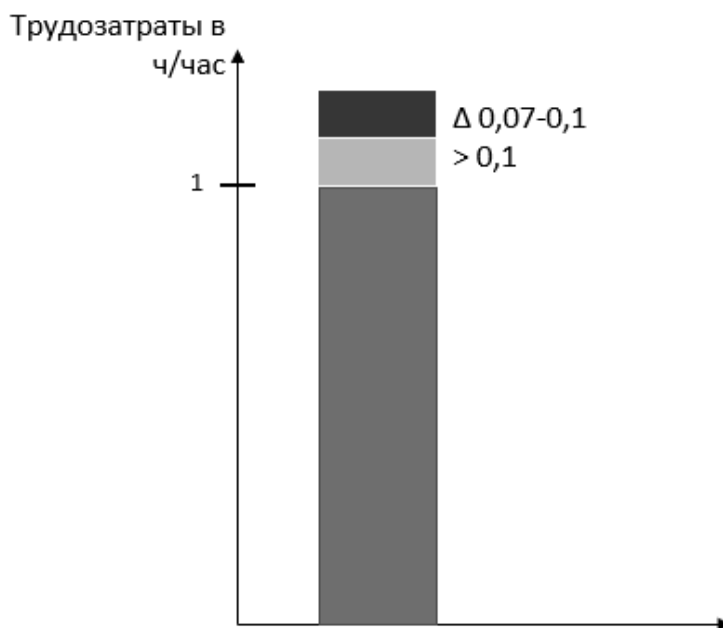


Рисунок 5 — Динамика изменения количества трудозатрат при применении метода обнаружения и оценки рисков

Так как проект ИТЭР не является коммерческим, то технико-экономический эффект будет мало заметен. Исполнитель сможет гарантировать сроки изготовления и вероятную экономию материала, за счет сокращения рисков, возникающих при технологической подготовке и производстве.

Применение метода обнаружения и оценки рисков дает возможность детально рассмотреть процесс до его начала, оценить возможность его реализации, выявить слабые места, выявить, оценить и проранжировать риски, подумать над предупреждающими действиями. Тем самым метод позволяет экономить ресурсы,

деньги, лично время сотрудников и сроки выполнения проекта. Приводя их к запланированным экономическим расчётам.

Благодаря применению метода обнаружения и оценки рисков получится снизить трудоемкость проекта, приведя данный показатель к рассчитанным запланированным нормам. Благодаря применению метода получится снизить данный показатель в среднем на 10-15%. Так же точность технологического процесса. Данный показатель сможет приблизиться к планируемому уровню точности технологического процесса. Из этого следует количественное улучшение показателя расхода материала, ведь чем точнее процесс, там меньше мы теряем материала на брак.

От каждого вышеперечисленного фактора зависит эффективность технологического процесса, следовательно, доводя данные факторы до запланированных значений, также повышается эффективность технологического процесса. В среднем, можно сказать, что эффективность технологического процесса, по мнению экспертной комиссии, может увеличиться на 15%.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Глухов В.В., Гасюк Д.П. Управление качеством.- Санкт-Петербург, 2013. 399 с.
2. Гасюк Д.П. О содержании сущности качества менеджмента, качества продукции и их гармонизации // В сборнике: Управление качеством в интересах устойчивого развития. Сборник материалов межвузовской научно-практической конференции. 2019. С. 31-36.
3. Касяненко Е.О., Гасюк Д.П. Применение процессного подхода для оптимальной работы предприятия // В сборнике: Неделя науки СПбПУ. материалы научной конференции с международным участием. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. 2016. С. 26-29.
4. Мегера Ю.А., Гасюк Д.П., Меженев А.В. Адаптация системы технического обслуживания и ремонта к системе комплексного сервисного обслуживания // В сборнике: Проблемы технического обеспечения войск в современных условиях: Труды II межвузовской научно-практической конференции. 2017. С. 318-322.
5. Гасюк Д.П., Ларькин В.В. К вопросу о современном состоянии и перспективах развития системы освоения ракетного вооружения // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. 2017. № 1 (96). С. 34-40.
6. KireevK.V., ErmakovV.V., KikkasK., ShcheglovaA.E., GasyukD.P., RodionovaU. Mathematical modeling of arc extinction process in devices with liquid-metal contact // В сборнике: Reliability, Infocom Technologies and Optimization (Trends and Future Directions). 6th International Conference ICRITO. 2017. С. 271-275.
7. Мегера Ю.А., Гасюк Д.П., Бурлаков А.А. Анализ взаимодействия системы технического обслуживания и ремонта вооружения и военной техники с оборонно-промышленным комплексом // В сборнике: Проблемы технического обеспечения войск в современных условиях. Труды II межвузовской научно-практической конференции. 2017. С. 314-317.
8. Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г., Богоева Е.М., Липатова Н.Г. Методика расчета латентного эффекта применения системы управления рисками // Вестник Российской таможенной академии. 2015. № 2. С. 115-123.

9. Анисимов Е.Г., Анисимов В.Г., Солохов И.В. Проблемы научно-методического обеспечения межведомственного информационного взаимодействия // Военная мысль. 2017. № 12. С. 45-51.

10. РД 50-532-85 «Методические указания. ЕСТПП. Аттестация технологических процессов». -М: Госстандарт СССР, 1986 г.

11. ГОСТ 14.322-83 НОРМИРОВАНИЕ РАСХОДА МАТЕРИАЛОВ. Основные положения. Сборник национальных стандартов. -М.: Стандартиформ, 2009

12. ГОСТ 15.309-98 Система разработки и постановки продукции на производство. Испытания и приемка выпускаемой продукции. Основные положения. -М.: Стандартиформ, 2000

13. Мазуль И.В. Разработка и исследования энергонагруженных компонентов термоядерного реактора, контактирующих с плазмой: дис. доктор техн. наук: 01.04.13/ Мазуль Игорь Всеволодович. - СПб., 2003. -328 с.

Н.В. Сырейщикова, В.И. Гузеев  
Южно-Уральский государственный университет (национальный  
исследовательский университет), Челябинск, Россия, snv.ktn@mail.ru

## **ОСВОЕНИЕ СИСТЕМЫ «TOTAL PRODUCTIVE MAINTENANCE» ДЛЯ ПЛАНИРОВАНИЯ РЕМОНТОВ И ОБСЛУЖИВАНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРЕДПРИЯТИЯ**

### **Аннотация**

В работе представлены результаты освоения системы «Total Productive Maintenance» (TPM) для совершенствования процессов планового технического и самостоятельного обслуживания и ремонта оборудования операторами для станков с ЧПУ токарной и фрезерной групп цехов машиностроительного предприятия. В результате освоения системы и реализации принципов TPM создана единая схема взаимодействия между операторами станков и персоналом отдела главного механика; внедрены процедуры регистрации данных в случае обнаружения неисправности оборудования операторами; внедрены процедуры принятия данных в случае неисправности оборудования со стороны персонала отдела главного механика. Достигнуто повышение качества выпускаемой продукции; уменьшение числа рекламаций; уменьшение простоя оборудования.

*Ключевые слова:* система всеобщего обслуживания оборудования, ремонт, операторы, станки, освоение.

### **Введение**

В настоящее время на производстве крайне велика доля оборудования, как с высокими коэффициентами физического износа, так и исчерпавшего свой ресурс. Но и новое оборудование при неправильной эксплуатации неэффективно функционирует, часто возникают простои, связанные с отказом оборудования. В результате, рациональное техническое обслуживание и ремонт оборудования играют всё большую роль в деятельности предприятий, оказывая существенное влияние на качество, стоимость выпускаемой продукции и конкурентоспособность предприятия в целом и является одной из актуальных задач любого производственного предприятия [1- 5].

Система «Total Productive Maintenance» (TPM) (Всеобщее обслуживание оборудования) – это комплекс взаимосвязанных технических и организационных мероприятий, направленных на поддержание постоянной готовности работоспособности и исправности оборудования при его использовании по назначению, во время хранения или транспортировки и исключению его преждевременного износа [6].

Проведенный кафедрой технологии автоматизированного машиностроения ЮУрГУ анализ состояния дел на машиностроительных предприятиях позволил установить, что в настоящее время на российских предприятиях существуют следующие проблемы в области технического обслуживания и ремонта оборудования:

- высокий удельный вес сильно-изношенного оборудования, требующего частых ремонтов и работающего с низкой эффективностью;

- нехватка средств для обновления оборудования и необходимость сокращения затрат на ремонт и его обслуживание;
- нерациональная организация технического обслуживания и ремонта оборудования (ТОиР), использование устаревшей системы;
- недоиспользование трудового потенциала специалистов и рабочих [7].

Актуальность настоящего исследования очевидна, а целью является освоение системы «Total Productive Maintenance» для планирования ремонтов и обслуживания оборудования.

### Методы

Для решения выявленных проблем, связанных с производством и обслуживанием оборудования, таких, как: наличие 75 % загрязнённого оборудования; наличие физически устаревшего оборудования; отсутствие должностных инструкций на рабочих местах; отсутствие конкретного взаимодействия в цехах между производством и сервисными службами; оптимальным является освоение системы «Всеобщее обслуживание оборудования» в связи с: привлечением в рабочий процесс всего персонала – от начальника цеха и до рабочего; вовлечением персонала отделов главного механика и главного электрика; целенаправленными действиями по уходу за старым оборудованием, освоением нового оборудования.

«Total Productive Maintenance» (TPM) – система, направленная на улучшение производительности оборудования посредством техник обслуживания, направленных на предотвращение сбоев в его работе. Для устранения простоев и дефектов TPM требует участия всех уровней управления. Основной акцент делается на работу по предотвращению проблем, осуществляемую производственным и ремонтным персоналом. Данная система осуществляется по 8 принципам (см. рисунок 1) [8 - 10].

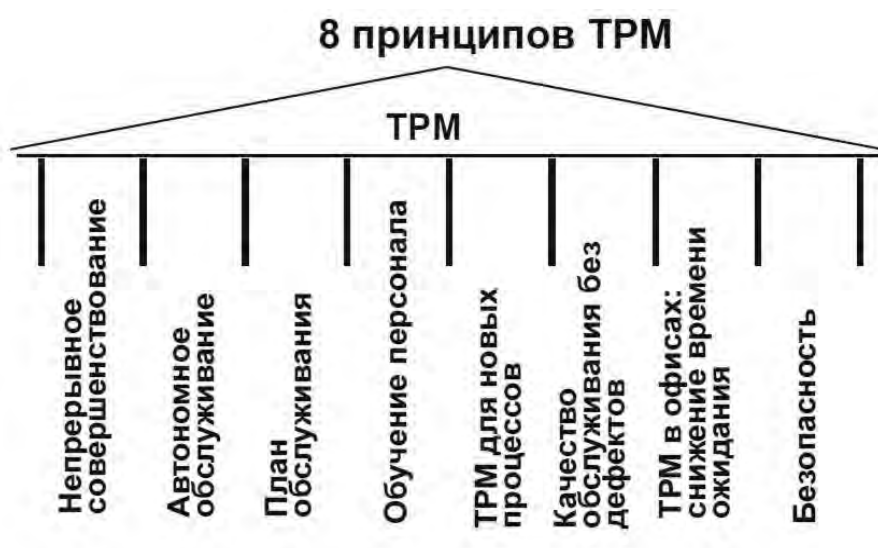


Рисунок 1 – Принципы системы TPM

Бесперебойная работа оборудования является залогом стабильного производства и основой для гарантированного выполнения заказов и достижения запланированных показателей. Жизненный цикл оборудования состоит из последовательного чередования двух фаз: эксплуатации и обслуживания [11, 12]. Ответственность за реализацию этих фаз возлагается на технологический персонал, который задействован в эксплуатации оборудования и на службы обслуживания, которые занимаются профилактикой и ремонтом. Ремонтная и эксплуатационная

службы имеют различные, не связанные друг с другом цели, и как следствие, различные показатели, характеризующие результативность. Для эксплуатационников главное – выполнение плановых показателей. Зачастую это понимается как выполнение плана любой ценой и приводит к нещадной эксплуатации оборудования, требующего профилактики или даже ремонта. Для ремонтных служб главное – выполнение задач по приведению неисправного оборудования в работоспособное состояние. Однако, когда оборудование раз за разом выходит из строя по причине неправильной эксплуатации, в среде служб поддержки возникает ощущение, что труд ремонтника не ценится, а достижение запланированных показателей результативности не зависит от прикладываемых усилий. Получается конфликт интересов, который не может не сказаться на общей эффективности производства. В свою очередь, нестабильность функционирования производства приводит к затруднению планирования, переносу сроков выполнения заказов, повышению издержек [13 - 16]. Никак не улучшается и морально-психологическая атмосфера в коллективе.

Также идеальным представляется случай, когда состояние оборудования может быть спрогнозировано в любой момент времени. Подобное может быть достигнуто лишь в случае, когда удастся полностью избавиться от форс-мажорных остановок. Вполне естественно, что любое оборудование подвержено износу и рано или поздно наступает такой момент, когда изношенные детали разрушаются, приводя к неполадкам оборудования в целом. Важно не допустить подобного развития событий, вовремя предугадать наступление критической ситуации и принять меры по ее предотвращению. Таким образом, из фазы обслуживания полностью должно быть устранено время, необходимое для внеочередного ремонта. В этом случае, оборудование может находиться либо в фазе эксплуатации, либо в фазе планового обслуживания. Для того чтобы получить полный контроль над работоспособностью производственного оборудованием, необходимо коренным образом пересмотреть отношение к нему. Самостоятельное обслуживание оборудования оператором и планирование технического обслуживания оборудования – важнейшие принципы ТРМ. Их цель – минимизировать потери эффективности, которые и возникают из-за отказов устройств.

### **Результаты и обсуждение**

Согласно разработанному план-графику проведения мероприятий по внедрению системы ТРМ на предприятии было выделено девять этапов.

Первый этап – объявление решения о внедрении ТРМ. Был выпущен приказ о сроках проведения мероприятий по внедрению системы ТРМ, создания рабочих групп и назначения ответственных лиц, уполномоченный генеральным директором.

Второй этап – заказ необходимых средств для реализации системы. Производился закуп чистящих средств фирмы «Kemiline» для станков; цветовой индикации в виде магнитов; магнитной доски для изготовления стенда для отображения работоспособности станков. Магниты заказывались двух видов с разным назначением:

- для идентификации состояния оборудования на стенде «Всеобщее обслуживание оборудования», прикрепляющиеся на схематические изображения станков, имеющие круглую форму (см. рисунок 2а);

- для идентификации состояния самих станков, прикрепляющиеся на кожухи, имеющие прямоугольную форму (см. рисунок 2б).



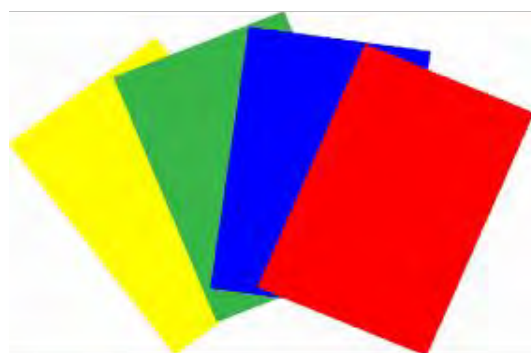
Третий этап – разработка системы идентификации состояния оборудования, показателей работы и информационной процедуры регистрации данных. Разработанная система идентификации состояния оборудования применяет следующие цветовые индикаторы:

- зеленый индикатор – оборудование работоспособно, замечаний нет;
- желтый индикатор – имеются мелкие замечания, но оборудование работоспособно;
- красный индикатор – оборудование неисправно, сигнализирует о полном отказе;
- фиолетовый индикатор – заявка принята, и оборудование находится в процессе определения неисправности; (фиолетовый магнит устанавливается только ремонтными службами отдела главного механика и находится на стенде до момента сдачи/приема оборудования из ремонта, подтвержденного записью в цеховом журнале);
- черный индикатор – оборудование неремонтопригодное.

Цветовые индикаторы представляют собой разноцветные магниты, описанные во втором этапе (см. рисунки 2а, 2б).



а)



б)

Рисунок 2 – Цветовые индикаторы: а) для изображения станков на стенде; б) для прикрепления на станках

Был создан стенд «Обслуживание оборудования», представляющий собой магнитную доску с нанесённой при помощи трафарета схемы расположения станков согласно планировке. Стенд установлен внутри цеха вдоль автомобильного проезда для всеобщего обозрения и предназначен для регистрации проведения технического обслуживания, а также визуализации состояния оборудования на данный момент. Рядом с ним размещён журнал для занесения операторами возможных аварий и их устранения со стороны сервисных служб, стационарный телефон и на стене лампа дневного света (см. рисунок 3).

На стенде схематически изображено оборудование участков цеха. На каждое схематическое изображение станка установлен магнит, в зависимости от состояния оборудования. Параллельно устанавливаются такие же магниты на кожухи станков. Телефон предназначен для связи между операторами станков и сервисными службами. Лампа на стене включается оператором при обнаружении поломки станка для наглядности проблемы для всеобщего обозрения. Введены бланки регистрации, прикреплённые к станкам, заполняемые оператором для отметок о проведении

автономного технического обслуживания. Нижняя часть бланка заполняется ремонтным персоналом для регистрации выполнения планов профилактических работ. Бланки регистрации заполняются ежедневно в зависимости от количества смен работы оборудования в конце смены.



Рисунок 3 – Стенд «Обслуживание оборудования»

Четвёртый этап – разработка методических материалов, инструкций. Разработана памятка для операторов станков, показанная на рисунке 4 и отдельно для сотрудников служб главного механика и главного электрика (см. рисунок 5).

Пятый этап – создание команды поддержки для освоения системы «ТРМ». Команда поддержки, сформированная из техотдела, закреплена за каждым участком цехов для координирования действий рабочих и ремонтных служб.

Шестой этап – обучение персонала. Произведено обучение всего производственного и обслуживающего персонала по системе «ТРМ» без отрыва от производства. Процесс обучения осуществлялся в следующей последовательности: в самом начале обучались все мастера участков цехов, затем персонал отдела главного механика и в конце – операторы станков.

Седьмой этап – проведение бизнес-игры. Проведена пробная реализация мероприятий плана ТРМ путём бизнес-игры при проведении обучения среди мастеров, отдела главного механика и операторов станков.

Восьмой этап – организация старта системы ТРМ. Оповещение производственного и обслуживающего персонала об официальных сроках начала действия системы ТРМ на предприятии.

Девятый этап – запуск системы «ТРМ».

Процесс освоения системы ТРМ на предприятии дан диаграммой последовательности на рисунке 6.

Для определения результативности процесса освоения системы «ТРМ» разработаны оценочные показатели и их аналитические модели. Один из основных показателей – повышение общей эффективности оборудования ( $O_\epsilon$ ):

$$O_\epsilon = K_q \times K_{pro} \times K_k \times 100, \% \quad (1)$$

где:  $K_q$  – коэффициент готовности оборудования:



Рисунок 4 – Действия рабочего

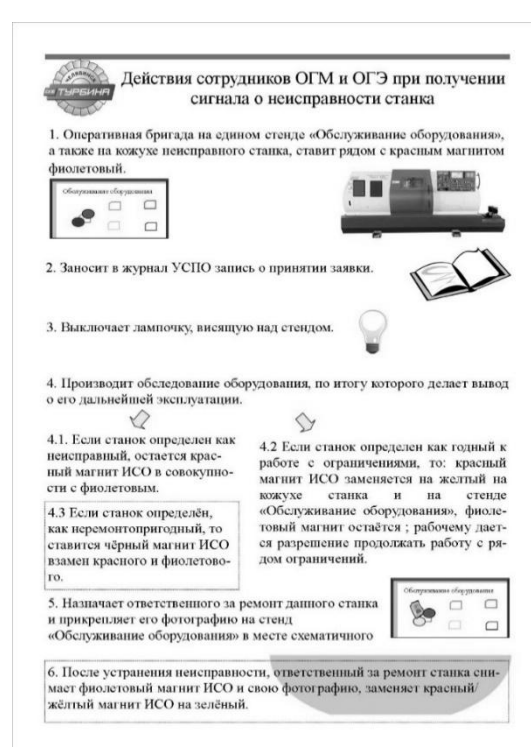


Рисунок 5 – Действия сотрудников отделов главного механика и энергетика

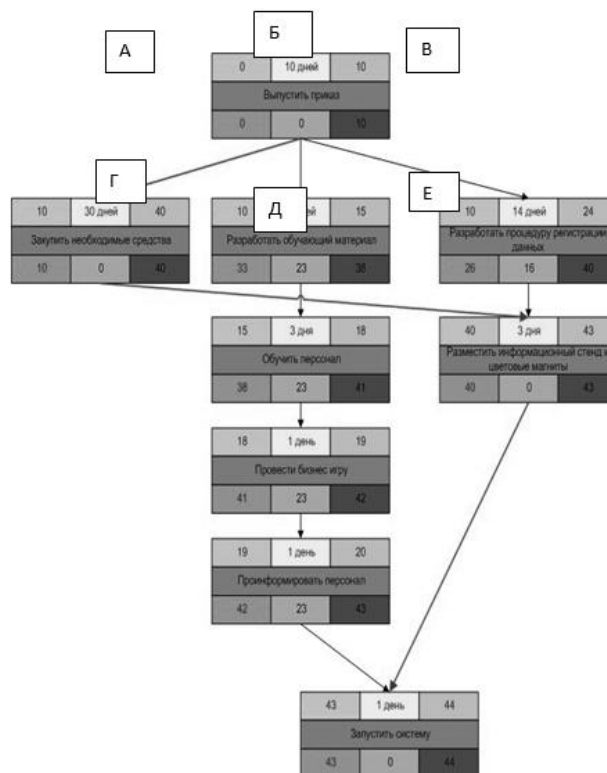


Рисунок 6 – Сетевой график процесса запуска системы «ТРМ» на ОАО СКБ «Турбина»: А – раннее начало; Б – длительность; В – раннее окончание; Г – позднее начало; Д – временной резерв; Е – позднее окончание

$$K_q = \frac{t_f}{t_n}, \text{ мин} \quad (2)$$

где:  $t_f$  – фактическое время работы оборудования, мин;  
 $t_n$  – нормативное время работы оборудования, мин.  
 $K_{pro}$  – коэффициент производительности оборудования:

$$K_{pro} = \frac{T_v}{P_v}, \text{ шт} \quad (3)$$

где:  $T_v$  – текущая выработка изделий, шт;  
 $P_v$  – плановая выработка, шт;  
 $K_k$  – коэффициент качества произведённой продукции:

$$K_k = \frac{K_{ki}}{K_{zi}}, \text{ шт} \quad (4)$$

где:  $K_{ki}$  – количество качественных изделий, шт;  
 $K_{zi}$  – количество запланированных к выпуску изделий, шт.

Для оценки показателя общей эффективности оборудования задано условие:

$O_\epsilon \geq 80\%$ , если  $O_\epsilon$  будет меньше указанного значения, то эффект от внедрения

ТРМ не будет существенным.

Коэффициент потерь времени в результате плановых остановок ( $K_{pl}$ ):

$$K_{pl} = \frac{t_{plo}}{t_{norm}}, \text{ мин} \quad (5)$$

где:  $t_{norm}$  – нормативное время работы оборудования, мин;

$t_{plo}$  – время плановых остановок, мин.

Потери времени не должны превышать 5%.

Ещё один немаловажный показатель – коэффициент квалификации рабочих:

$$K_{kv} = \frac{K_{cr}}{R_{vr}} \times 100, \% \quad (6)$$

где:  $K_{cr}$  – средний квалификационный разряд;

$R_{vr}$  – разряд выполняемых работ.

Значение  $K_{kv}$  должно варьироваться от 95 – 100%.

Также принят во внимание  $K_{rm}$  – коэффициент организации рабочих мест:

$$K_{rm} = \frac{Z_{cm}}{Z_{ncm}}, \text{ шт} \quad (7)$$

где:  $Z_{cm}$  и  $Z_{ncm}$  – число соответствующих и несоответствующих нормам рабочих мест, шт.

Анализ только количественных показателей не обеспечивает достаточно полного представления о положении дел в области технического обслуживания и ремонта оборудования, поскольку существенная часть параметров не имеет строго выраженного количественного выражения. Поэтому для данной системы решено было использовать и качественные показатели, приведённые в таблице 1.

Таблица 1 – Качественные показатели

Содержание вопроса	Вариант ответа	Респонденты
Создаются ли малые группы по техническому обслуживанию и ремонту оборудования?	Да/ Нет	Специалисты ОГМ,ОГЭ
Участвуют ли операторы оборудования в его первичной диагностике и техническом обслуживании?	Да/Нет/ Частично	Рабочие, специалисты ОГМ, ОГЭ
Существует на предприятии система визуального оповещения о возникающих на оборудовании неисправностях?	Да/Нет	Специалисты ОГМ, ОГЭ, начальники цехов, мастера цехов
Происходят ли поломки оборудования, допущенные в результате неправильной эксплуатации?	Да, часто/ Да, редко/ Нет	Специалисты ОГМ, ОГЭ, мастера цехов
Проводится ли самостоятельное обслуживание рабочих мест?	Да/ Нет/ Частично	Рабочие, мастера участков

После сбора полученных показателей осуществляется обработка качественных и количественных показателей. Данные оценки состояния технического обслуживания и ремонта оборудования позволяют получить комплексное представление о данной области на предприятии и соответствии ее принципам и основным показателям.

### Заключение

В результате проведенной работы на предприятии внедрена система ТРМ: реализованы принципы ТРМ, создана единая схема взаимодействия между операторами станков и персоналом отдела главного механика; внедрены процедуры регистрации данных в случае обнаружения неисправности оборудования операторами; внедрены процедуры принятия действий в случае неисправности оборудования со стороны персонала отделов главного механика, главного энергетика, сервисных служб. Достигнуты следующие факторы экономии: повышение качества выпускаемой продукции на 15%; уменьшение числа рекламаций на 10%; уменьшение простоя оборудования на 25%.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вумек, Дж. П. Бережливое производство. Как избавиться от потерь и добиться процветания вашей компании / Дж. Т. Даниел, Дж. П. Вумек. - «Альпина Паблишер», 2011. - 192 с.
2. Мегера Ю.А., Гасюк Д.П., Бурлаков А.А. Анализ взаимодействия системы технического обслуживания и ремонта вооружения и военной техники с оборонно-промышленным комплексом // В сборнике: Проблемы технического обеспечения

войск в современных условиях. Труды II межвузовской научно-практической конференции. 2017. С. 314-317.

3. Касяненко Е.О., Гасюк Д.П. Применение процессного подхода для оптимальной работы предприятия // В сборнике: Неделя науки СПбПУ. материалы научной конференции с международным участием. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. 2016. С. 26-29.

4. Гасюк Д.П., Ларькин В.В. К вопросу о современном состоянии и перспективах развития системы освоения ракетного вооружения // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. 2017. № 1 (96). С. 34-40.

5. Мегера Ю.А., Гасюк Д.П., Меженев А.В. Адаптация системы технического обслуживания и ремонта к системе комплексного сервисного обслуживания // В сборнике: Проблемы технического обеспечения войск в современных условиях: Труды II межвузовской научно-практической конференции. 2017. С. 318-322.

6. Голоктеев, К. Управление производством: инструменты, которые работают / К. Голоктеев, И. Матвеев - СПб.: Питер, 2008. - 203 с.

7. Сырейщикова, Н.В. Организация производственного процесса ремонта электроподвижного состава / Н.В. Сырейщикова, К.С. Лукина // Материалы XI межд.н.-т. конф. «Уральская инженерная школа». - Екатеринбург, 2019. - С.392-395.

8. Тайити, Оно. Производственная система Тойоты: уходя от массового производства / Т. Оно - М: Издательство ИКСИ, 2012. - 321с.

9. Синго, Сигео. Изучение производственной системы Тойоты с точки зрения организации производства / С. Сигео - М: ИКСИ, 2010. - 347 с.

10. Джордж, Л. М. Бережливое производство + шесть сигм. Комбинируя качество шести сигм со скоростью бережливого производства / Дж. Л. Майкл. - «Альпина Паблишер», 2007. - 357 с.

11. Лукина, К.С., Сырейщикова, Н.В. Организация производственного процесса ремонта электроподвижного состава /материалы XII межд.н.-т. конф. Екатеринбург. - УГЛТУ, 2019. - С. 392-395.

12. Вэйдер, М. Инструменты бережливого производства/ М. Вэйдер «Мини-руководство по внедрению методик бережливого производства». - Альпина Бизнес Букс, 2007. - 124 с.

13. Бабенков В.И., Гасюк Д.П., Дубовский В.А. Метод оценивания рисков на этапах жизненного цикла образцов вооружения и военной техники // Вооружение и экономика. 2020. № 3 (53). С. 59-65.

14. Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г., Бойко А.П., Калинина О.В., Карпов В.А., Лобас Е.В. Введение в экономический риск-менеджмент. - Москва, 2008. - 91 с.

15. Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г., Босов Д.Б. Сетевые модели и методы ресурсно-временной оптимизации в управлении инновационными проектами.- Москва, 2006.- 117 с.

16. Федотова А.М., Гасюк Д.П. Анализ рисков возникновения проблем с качеством технологической подготовки производства и разработка мероприятий по их снижению в условиях АО "НИИЭФА" // Металлообработка. 2021. № 1 (121). С. 50-54.

М.А. Щирова, Д.П. Гасюк, М.Х. Седлер  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого  
Санкт-Петербург, Россия, [shirovamasha@yandex.ru](mailto:shirovamasha@yandex.ru)  
ООО «ТЕХНИОР», Санкт-Петербург, Россия

## **ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ВНУТРЕННЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ТРУБОПРОВОДОВ С КРИВОЛИНЕЙНОЙ ОСЬЮ ПУТЁМ РАЗРАБОТКИ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ПОДГОТОВКИ ПОВЕРХНОСТИ И НАНЕСЕНИЯ АНТИКОРРОЗИОННОГО ПОКРЫТИЯ**

### **Аннотация**

В работе описана проблема обработки внутренней поверхности трубопроводов с криволинейной осью. Имеющиеся способы не позволяют добиться высоких показателей качества наносимого покрытия и увеличения производительности. В результате проделанной работы представлена конструкция и принцип действия автоматизированного оборудования для обработки внутренней поверхности трубопроводов данного типа.

*Ключевые слова:* трубопроводы с криволинейной осью, дробеструйная обработка, антикоррозионное покрытие, автоматизированное оборудование

### **Введение**

Для транспорта нефти используются трубопроводы, включающие прямолинейные и криволинейные участки. Требования к их внутренней поверхности описывает ГОСТ Р 58346-2019. Основными показателями качества покрытия труб являются его внешний вид, толщина, диэлектрическая сплошность, адгезия к стали, стойкость при изгибе [1].

Согласно ГОСТ 9.402-2004, определяющему процесс подготовки труб, перед нанесением защитного покрытия проводится подготовка поверхности путем очистки от окалина и ржавчины, препятствующих нанесению покрытия и ускоряющих коррозионные процессы [2]. Для используемых в нефтяной промышленности труб применяется механическая очистка песком или дробью [3]. Окрашивание проводится бензостойкими лакокрасочными материалами [1].

Обычно короткие участки труб заранее сваривают, а затем их внутреннюю поверхность (включая сварные швы) подвергают зачистке [4]. Однако сейчас данный способ применяется только для прямолинейных участков, поскольку существующее оборудование не позволяет обрабатывать криволинейные участки трубопроводов.

Автоматизированное устройство для обработки внутренней поверхности трубопроводов любой формы (в том числе и на криволинейных участках) было разработано ООО «ТЕХНИОР». Ниже приведено назначение этого устройства, требования назначения, габариты устройства и требования безопасности.

### **Назначение устройства**

Комплект оборудования для нанесения покрытия на внутреннюю поверхность труб сложной формы, предназначен для дробеструйной обработки и нанесения жидкого эпоксидного двухкомпонентного покрытия на внутреннюю поверхность труб сложной формы (отводы, трубы с приваренными отводами и др.).

### Требования назначения

- Диапазон внешних диаметров труб: 57–325 мм
- Максимальная длина труб: 4 м
- Максимальный угол изгиба труб: 90°
- Радиус изгиба труб: 1,5 диаметра

### Габариты устройства

- Устройство абразивно-струйной обработки: не более 9×6 м
- Устройство нанесения покрытия: не более 9×6 м

### Требования безопасности

Электрооборудование должно быть выполнено во взрывозащищенном исполнении.

### Состав комплекта

- Установка абразивно-струйной обработки;
- Установка нанесения покрытия;

### Установка абразивно-струйной обработки

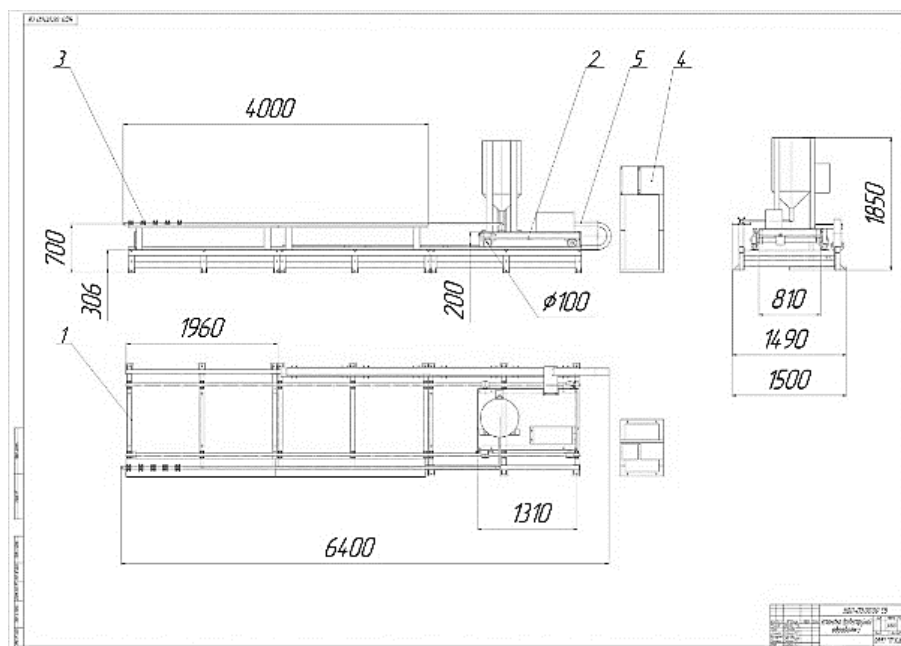


Рисунок 1 – Установка абразивно-струйной обработки:  
1 – основание, 2 – каретка с дробеструйным аппаратом,  
3 – гибкая штанга, 4 – блок управления, 5 – комплект кабелей

Холостой ход: после запуска каретка с размещенным на ней дробеструйным аппаратом начинает ускоренно перемещаться по направляющим, расположенным на основании. Вместе с кареткой перемещается присоединенная гибкая штанга, которая протягивается внутрь трубы. Движение каретки продолжается до контакта концевых выключателей (расположенных на каретке) со струбцинами (закрепленными на концах основания), являющимися ограничителями хода.



Рабочий ход: при включении рабочего хода каретка начинает движение в обратном направлении с постоянной скоростью. Вместе с движением каретки работает дробеструйный аппарат: поступающая из него дробь попадает в шланг и вылетает из сопла на большой скорости, обрабатывая внутреннюю поверхность трубопровода.

Чтобы собрать дробь, которая может препятствовать продвижению гибкой штанги, работа дробеструйного аппарата осуществляется периодами. Между ними запускается аппарат рекуперации, предназначенный для приёма дроби с продуктами очистки (коррозия, грязь, пыль), отделения и сбора пригодной для повторного использования дроби, сбора продуктов очистки, фильтрации выходящего в цех воздуха [5].

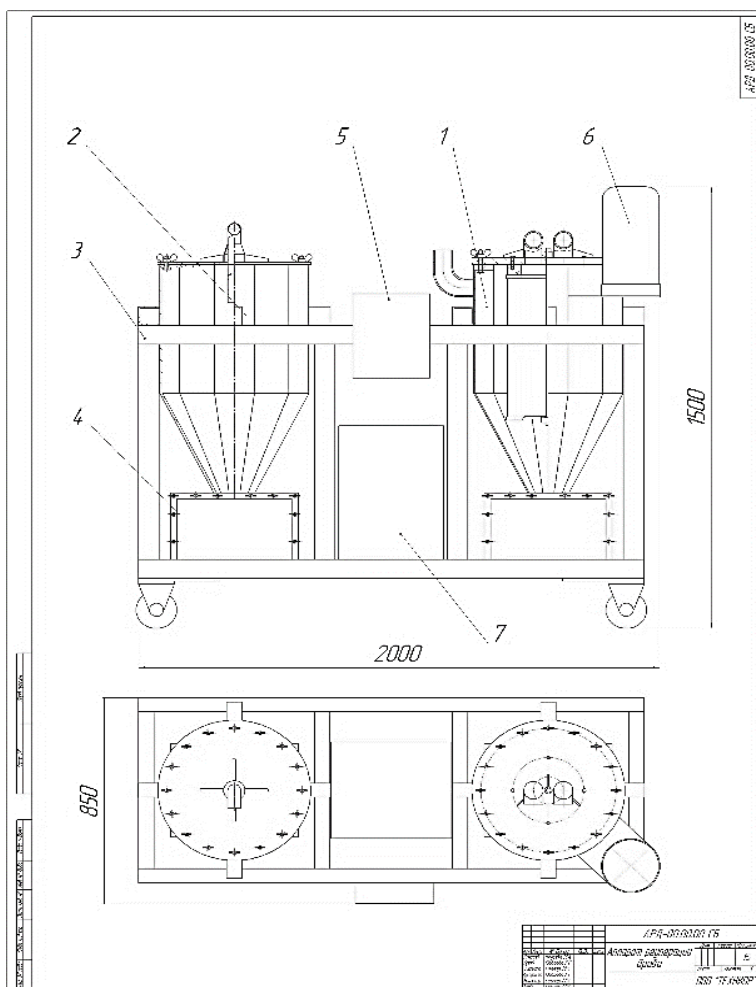


Рисунок 2 – Аппарат рекуперации дробы:

- 1 – циклон для сбора продуктов очистки и фильтрации,
- 2 – циклон для сбора отработанной дробы,
- 3 – несущая рама, 4 – ящик, 5 – блок управления,
- 6 – ресивер, 7 – воздуходувка

### Установка нанесения покрытия

Холостой ход: принцип работы установки нанесения покрытия на холостом ходу аналогичен работе установки абразивно-струйной обработки.

Рабочий ход: после включения рабочего перемещения каретка начинает движение в обратном направлении с заданной скоростью. Во время движения работает аппарат безвоздушного распыления: поступающая из аппарата краска

попадает в шланг, затем в распылительную каретку с чашей, откуда под воздействием центробежной силы распыляется на внутреннюю поверхность трубопровода. Для обеспечения необходимой толщины и равномерности наносимого покрытия работа аппарата выполняется непрерывно.

### Гибкая штанга

Важнейшим элементом, необходимым для обеспечения возможности обработки труб криволинейной формы, является гибкая штанга.

Гибкая штанга имеет конструкцию, обеспечивающую свободное перемещение внутри криволинейного участка, а также равномерность покрытия. Для этого в её устройстве предусмотрены центраторы, позволяющие проходить криволинейные участки труб и обеспечивающие распыление материалов из центра трубы.

Необходимая длина центратора зависит от внутреннего диаметра трубы. Поэтому для устройства были спроектированы комплекты корпусов центраторов, рычагов и колес, позволяющие обрабатывать трубопроводы с диаметрами, указанными в технических характеристиках.

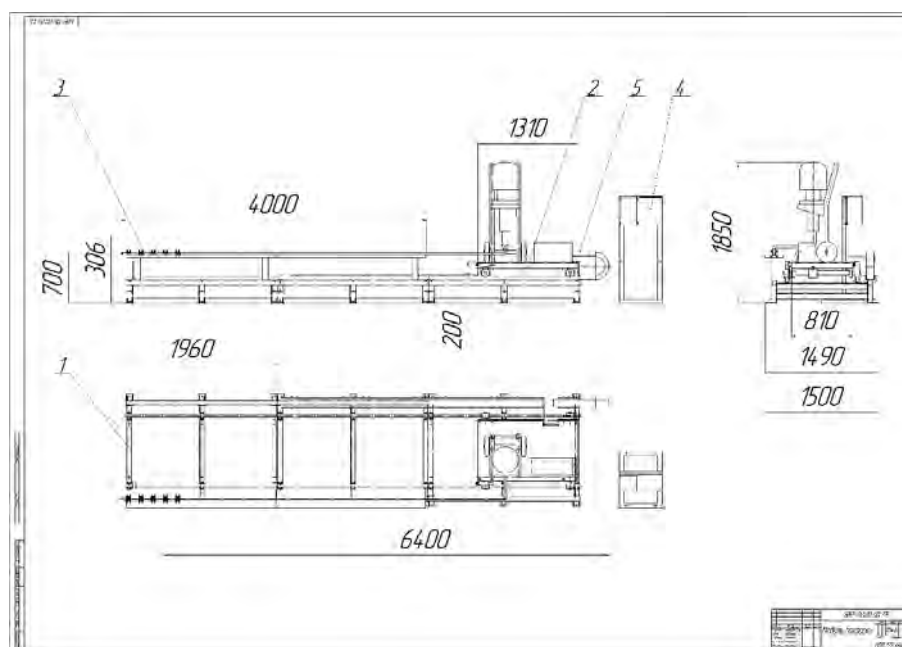


Рисунок 3 – Установка нанесения покрытия: 1 – основание, 2 – каретка с аппаратом безвоздушного распыления, 3 – гибкая штанга, 4 – блок управления, 5 – комплект кабелей

Опытным путем были выявлены зависимости размеров элементов гибкой штанги от внутреннего диаметра обрабатываемой трубы ( $d$ ).

Длина гибкого конца штанги:

$$l_{г.ш.} = d \cdot 1,5 \cdot \pi \quad 1)$$

Допустимая длина центратора из условия касания его корпусом стенки трубы:

$$l_{ц} < \sqrt{3d^2 - 100d - 2500} - 5 \quad 2)$$

Расстояние между центраторами:

$$l_{ав} = (0,7 \dots 1,2)l_{ц} \quad 3)$$

Проходимость криволинейного участка гибкой штангой была проверена на макете. Для трубы  $d = 48$  мм был выполнен отдельный центратор.

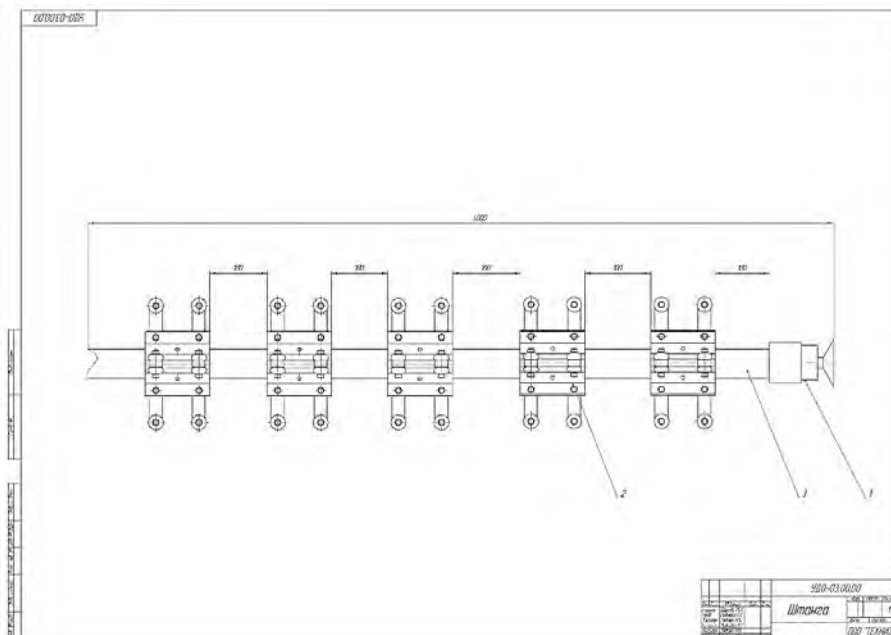


Рисунок 4 – Гибкая штанга:  
1 – распылитель, 2 – центратор, 3 - шланг

### Заключение

Разработанное ООО «ТЕХНИОР» устройство позволяет обрабатывать внутреннюю поверхность трубопроводов на прямо- и криволинейных участках труб. Автоматизация оборудования обеспечивает высокое качество покрытия, соответствующее требованиям ГОСТ. Реализованная рекуперация дроби увеличивает материалоотдачу и уменьшает материалоёмкость.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ Р 58346-2019. Трубы и соединительные детали стальные для нефтяной промышленности. Покрытия защитные лакокрасочные внутренней поверхности. Общие технические требования.
2. ГОСТ 9.402-2004 "Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия лакокрасочные. Подготовка металлических поверхностей к окрашиванию"
3. ГОСТ 12.3.028-82. Система стандартов безопасности труда. Процессы обработки абразивным и эльборовым инструментом. Требования безопасности.
4. ГОСТ Р 53462-2009. Соединения трубопроводов неразъемные термомеханические. Технические требования
5. Сайт ООО «ТЕХНИОР» [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://tehnior.ru/>
6. Фазлутдинов К.К. Абразивная обработка поверхности металла, улучшающая адгезию покрытий/ Фазлутдинов К.К. – Текст: электронный // zctc.ru : [сайт]. – 2020. – 07 июля. – URL: [https://zctc.ru/sections/mechanicheskaya\\_obrabotka\\_izdelij\\_pered\\_galvanicheskim\\_pokritie\\_m](https://zctc.ru/sections/mechanicheskaya_obrabotka_izdelij_pered_galvanicheskim_pokritie_m) (дата обращения 02.05.2022)

А.С. Козлов, Д.П. Гасюк  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Санкт-Петербург, Россия, [ankozlov98@gmail.com](mailto:ankozlov98@gmail.com)

## **АНАЛИЗ СЛОЖНОСТИ АВТОМАТИЗАЦИИ СБОРА И ОБРАБОТКИ ДАННЫХ, ПОЛУЧЕННЫХ В ХОДЕ МОНИТОРИНГА ПЕРСОНАЛА В РАМКАХ СИСТЕМЫ МЕНЕДЖМЕНТА КАЧЕСТВА**

### **Аннотация**

В работе анализируется степень сложности автоматизации сбора и обработки данных, полученных в ходе мониторинга персонала. Описаны критерии оценивания методов мониторинга персонала, выбраны наиболее подходящие.

*Ключевые слова:* цифровизация, мониторинг персонала, автоматизация сбора данных, анализ методов.

### **Введение**

Одной из ключевых черт концепции «Промышленность 4.0» является абсолютная цифровизация процессов трудовой деятельности. Автоматизация управления, проектирования изделий и технологических процессов, создание динамически изменяемых производственных линий с использованием «цифрового двойника» производства, кибербезопасность – это те практики, без которых не будет представляться функционирование любой компании в сфере производства и эксплуатации продукции машиностроения [1 - 9].

Развитие систем менеджмента качества идет рука об руку с постепенным внедрением информационных технологий в работу предприятий. Согласно ГОСТ Р ИСО 9001–2015 ключевыми принципами менеджмента качества являются:

- ориентация на потребителя;
- лидерство;
- взаимодействие людей;
- процессный подход;
- улучшение;
- принятие решений, основанных на свидетельствах;
- менеджмент взаимоотношений.

Внедрение улучшений, поддержка процессного подхода и осуществление принятия решений, основанных на свидетельствах – эти тезисы говорят о необходимости цифровизации, задачи которой не должны ограничиваться составлением смет и организацией различных баз данных. Контроль эффективности системы управления качеством тоже может быть частично отдан в руки соответствующего программного обеспечения, как и один из ее важнейших компонентов – мониторинг персонала. Мониторинг персонала является не только совокупностью мероприятий, предполагающих оценку результативности работы сотрудников, наблюдение за сотрудниками в рамках их трудовой деятельности. Проведение подобных мероприятий нередко характеризуется длительностью организации и осуществления, большим объемом собранной информации, которая, к тому же, характеризуется субъективностью и сложностью в обработке и дальнейшем использовании, которая усугубляется ротациями кадрового состава в условиях

нестабильного или переходного экономического климата. Решение этих проблем позволит дать установленной системе менеджмента качества возможность функционировать в соответствии с принципами постоянного улучшения и принятия решений, на основании свидетельств.

### **Анализ**

Мониторинг персонала разделяется на две созависимые составляющие: оценку персонала и наблюдение за персоналом, что вносит сложность в понимание комплексной практики мониторинга.

Под оценкой персонала понимается комплекс мероприятий, направленный на оценку компетентности сотрудников, а, значит, определение ценностного комплекса свойств каждого отдельного работника, с тем, чтобы впоследствии произвести анализ итогов его трудовой деятельности [11], и результативности их трудовой деятельности, что подразумевает проведение ряда мероприятий, задача которых состоит в осуществлении контроля трудовой деятельности исследуемого работника с целью подтверждения или опровержения полученных выводов, относительно эффективности методов воздействия [11].

Под наблюдением, в свою очередь, понимается практика контроля, документирования и анализа выполнения сотрудником трудовых обязанностей в реальном времени во время рабочего периода или на протяжении длительного времени [12]. В отличие от большинства методов оценки персонала – наблюдение не имеет инвазивного характера – оно не должно отвлекать сотрудников от осуществления рабочей деятельности. Этичность проведения подобных мероприятий является острым вопросом, но при легальности и легитимности осуществляемых практик она снимается с обсуждения.

Для определения возможности автоматизации сбора и анализа информации, полученных в ходе мониторинга персонала, будут использоваться критерии, обозначенные в таблице 1.

Благодаря информации в таблице 1 была осуществлена оценка методов наблюдения на сложность их внедрения в систему мониторинга персонала. Результаты представлены в таблице 2, вычисление производилось сложением. В таблице 3 представлена необходимая информация для понимания диапазонного характера выборочных значений.

В таблице 4 приведены оценки методов оценки персонала [13], а также представлены дополнительные столбцы, характеризующие характер оценки по отношению к объекту оценивания и характер полученных данных. Тип оценки может быть качественным, то есть – описывающим качественные характеристики сотрудников без использования количественных данных, а может быть количественным – использующим в качестве основы количественные данные.

Ни одному методу оценки персонала не был присвоен минимальный балл по критерию 1 в связи с необходимостью привлечения человеческих ресурсов для сбора данных и их внесения в систему для последующего анализа.

Стоит отметить, что всем инструментам оценки качественного типа за исключением матричного метода были присвоены максимальные баллы по критериям 2 и 3 в связи с субъективностью получаемой информации и сложностью ее обработки без использования обученных нейронных сетей, тем не менее метод «360 градусов» показал свою эффективность при сборе информации для анализа текущего состояния предприятия и степени удовлетворенности сотрудников, что в свою очередь согласно

ГОСТ Р ИСО 10018-2015 позволяет выявлять зоны роста мотивации сотрудников, что в свою очередь согласуется с концепцией «Кайдзен».

Таблица 1 – Критерии для оценки возможности автоматизации методов

	Зависимость от внесения данных пользователем	Зависимость от предварительной обработки данных пользователем	Зависимость от последующей обработки данных пользователем
№ критерия	1	2	3
Комментарий	Внесение данных осуществляется без привлечения человеческих ресурсов	Данные не нуждаются в предварительной обработке	Обработка данных автоматизирована
Балл	1		
Комментарий	Внесение данных требует привлечения человеческих ресурсов без значительных затрат рабочего времени	Данные нуждаются в минимальной предварительной обработке	Обработка не автоматизирована в достаточной степени для вынесения выводов, но дает результаты полезны и дает представление о контролируемой метрике.
Балл	2		
Комментарий	Внесение данных требует привлечения человеческих ресурсов со значительными затратами рабочего времени/требуется привлечение дополнительной рабочей силы	Данные нуждаются в значительной предварительной обработке	Обработка не автоматизирована ввиду значительной субъективности информации.
Балл	3		

Таблица 2 – Оценивание методов наблюдения

Метод наблюдения	К1	К2	К3	Сумма
Фотография реального времени	1-2*	3	2	5-6
Содержание интернет-трафика	1	1	1	3
Отслеживание нажатий работающей техники	1	1	2-3**	4-5
Наблюдение под прикрытием	3	3	3	9
Учет использованных ресурсов	1	1	2	4
Карты для прохождения контрольных пунктов	1	1	1	3

Таблица 3 – Дополнительные комментарии по распределению баллов в таблице 3

	Содержание комментария
*	Использование данного метода предполагает четкое планирование рабочего дня сотрудника для постановки соответствующей оценки. Абсолютная автоматизация сбора и обработки данных невозможна в связи с необходимостью внедрения систем машинного зрения и нейронных сетей, что может оказаться экономически не целесообразным.
**	Необходимость выявления причин простоя техники, часть из которых может быть вызвана обслуживающими мероприятиями, может быть вызвано человеческим фактором, не обладающим источником в виде прокрастинации или саботирования рабочего процесса, что приводит к внесению информации постфактум.

Таблица 4 – Оценивание методов наблюдения

Метод оценки	Тип оценки	Характер данных	K1	K2	K3	Сумма
Матричный метод	Качественный	Бинарный	2	1	1	4
Метод «360 градусов»	Качественный	Словесный	3	3	3	9
Метод системы произвольных характеристик	Качественный	Бинарный + словесный	2	3	3	8
Метод бальной оценки	Количественный	Цифровой	2	1	2	5
Рейтинговый метод	Количественный	Цифровой + Бинарный	2	1	1	4
Метод свободной бальной оценки	Количественный	Цифровой	2	1	3	6

### Результаты

В таблице 5 представлены выводы по необходимости внедрения методов мониторинга персонала в программное обеспечение для его (мониторинга) осуществления, а также возможности автоматизации избранных практик.

### Заключение

Таким образом были определены следующие методы мониторинга персонала, которые подходят для включения в программное обеспечение в связи с легкостью автоматизации:

1. Содержание интернет-трафика;
2. Отслеживание нажатий работающей техники;
3. Учет использованных ресурсов;
4. Карты для прохождения контрольных пунктов;
5. Матричный метод;
6. Рейтинговый метод.

Методы, автоматизация сбора и анализа, которых затруднена, но с помощью них производится сбор большого количества ценной информации:

1. Фотография реального времени;
2. Метод «360 градусов».

Таблица 5 – Выводы

Сторона мониторинга	Название метода	Возможность автоматизации	Необходимость включения
Оценка персонала	Фотография реального времени	-	+
	Содержание интернет-трафика	+	+
	Отслеживание нажатий работающей техники	+	+
	Наблюдение под прикрытием	-	-
	Учет использованных ресурсов	+	+
	Карты для прохождения контрольных пунктов	+	+
Наблюдение за персоналом	Матричный метод	+	+
	Метод «360 градусов»	-	+
	Метод системы произвольных характеристик	-	-
	Метод бальной оценки	-	-
	Рейтинговый метод	+	+
	Метод свободной бальной оценки	-	-

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Левенцов, В.А. Аспекты концепции "Индустрия 4.0" в части проектирования производственных процессов / В.А. Левенцов, А.Е. Радаев, Н.Н. Николаевский // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Экономические науки. - 2017. - Т. 10. - № 1. - DOI 10.18721/Е.10102 - с. 19-31.
2. Сауренко Т.Н., Чварков С.В. Экономическая политика в системе национальной безопасности российской федерации // Национальные приоритеты России. 2016. № 3 (21). С. 22-32.
3. Гарькушев А.Ю., Селиванов А.А., Чварков С.В. Сущность и проблемы управления обеспечением безопасности и обороной государства // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. 2016. № 3 (93). С. 3-10.
4. Касяненко Е.О., Гасюк Д.П. Применение процессного подхода для оптимальной работы предприятия // В сборнике: Неделя науки СПбПУ. материалы научной конференции с международным участием. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. 2016. С. 26-29.
5. Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г., Босов Д.Б. Сетевые модели и методы ресурсно-временной оптимизации в управлении инновационными проектами.- Москва, 2006.- 117 с.



6. Анисимов Е.Г., Анисимов В.Г., Солохов И.В. Проблемы научно-методического обеспечения межведомственного информационного взаимодействия // Военная мысль. 2017. № 12. С. 45-51.

7. Kireev K.V., Ermakov V.V., Kikkas K., Shcheglova A.E., Gasyuk D.P., Rodionova U. Mathematical modeling of arc extinction process in devices with liquid-metal contact // В сборнике: Reliability, Infocom Technologies and Optimization (Trends and Future Directions). 6th International Conference ICRIITO. 2017. С. 271-275.

8. Мегера Ю.А., Гасюк Д.П., Меженова А.В. Адаптация системы технического обслуживания и ремонта к системе комплексного сервисного обслуживания // В сборнике: Проблемы технического обеспечения войск в современных условиях: Труды II межвузовской научно-практической конференции. 2017. С. 318-322.

9. Мегера Ю.А., Гасюк Д.П., Бурлаков А.А. Анализ взаимодействия системы технического обслуживания и ремонта вооружения и военной техники с оборонно-промышленным комплексом // В сборнике: Проблемы технического обеспечения войск в современных условиях. Труды II межвузовской научно-практической конференции. 2017. С. 314-317.

10. Зегжда П.Д. Модели и метод поддержки принятия решений по обеспечению информационной безопасности информационно-управляющих систем / П.Д. Зегжда [и др.] // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. 2018. № 1. С. 43-47.

11. Еремина И.Ю., Идигова Л.М., Лавров И.И. Оценка и аттестация персонала как перспективный карьерный шанс // Журнал «Труды Российского государственного университета нефти и газа им. И.М. Губкина». 2015. № 2. с. 82-91.

12. Kirstie Ball. Workplace surveillance: an overview // DOI 10.1080/00236561003654776 // Labor History February 2010 - с. 4-5

13. Силантьева Е.А., Семина А.П. Мотивация и стимулирование персонала на предприятиях высокотехнологичных отраслей промышленности // Гагаринские чтения - 2018. - М.: Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), 2018 - с. 152-153.

Д.П. Гасюк, В.О. Маркевич  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Санкт-Петербург, Россия, markevich.vo@edu.spbstu.ru

## **ПРОВЕДЕНИЕ ФОТОГРАФИИ РАБОЧЕГО ВРЕМЕНИ ДЛЯ АНАЛИЗА ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА**

### **Аннотация**

В данной работе рассматривается такой инструмент анализа и оптимизации трудовых процессов, как фотография рабочего времени. Описаны классификация, задачи и этапы проведения. Приведен практический пример применения и его результаты.

*Ключевые слова:* анализ, эффективность, рабочий процесс, оптимизация, фотография рабочего времени.

### **Введение**

Одним из важнейших шагов для оптимизации процессов внутри компании является повышение эффективности трудовых ресурсов. Для улучшения бизнес-процесса, в первую очередь, необходимо выявить его «узкие места». Их можно определить как место (операция, ресурсы или этап процесса), после которого процесс производства продукции замедляется [1,2]. На предприятии «узким местом» считается недостаток производственных мощностей в общей цепочке технологического процесса. Для выявления «узких мест» необходимо внимательно присмотреться к производственным процессам и увидеть их внешние проявления. К часто встречающимся причинам можно отнести скопление незавершенного производства, простой оборудования, переналадку оборудования для производства другого изделия или выполнения другой операции [3 - 8].

Для анализа эффективности рабочего процесса часто применяется такой инструмент, как фотография рабочего времени, под которой понимается сбор детализированной информации о занятости сотрудника и поминутных статистических данных в течение рабочего дня. Такой способ мониторинга может помочь определить фактический баланс затрат трудового ресурса, грамотно распределить эти затраты, проследить потери внутри процесса и определить их причины. Руководитель получает возможность получить актуальную информацию об эффективности рабочего процесса, определить риски и оперативно повлиять на его улучшение посредством планирования и внедрения корректирующих действий. Это создаст основу для повышения результативности, достижения улучшенных результатов и предотвращение неблагоприятных последствий [10].

Для проведения фотографии рабочего времени можно определить следующие задачи:

1. Проанализировать действия рабочего и оценить эффективность его работы;
2. Детализированно рассмотреть затраты рабочего времени и определить наиболее затратные операции;
3. Выявить «узкие места» на всех этапах рабочего процесса;
4. Установить причины невыполнения норм и планов;

5. Выявить проблемы во взаимодействии между структурными подразделениями;
6. Повысить уровень организации труда и дисциплинированность сотрудника;
7. Понять, где происходят невынужденные потери времени и оптимизировать процессы.

Фотографию рабочего времени можно классифицировать по методу наблюдения, по числу объектов наблюдения, по способу наблюдения. Классификация фотографии рабочего времени приведена в таблице 1.

Таблица 1 - Классификация фотографии рабочего времени

По методу наблюдения	По числу объектов исследования	Способ наблюдения
1. Сплошная – измерения проводятся непрерывно, при этом фиксируются все совершенные за смену (день) операции	1. Индивидуальная –наблюдается один сотрудник	1. Визуально с применением часов
2. Выборочная – измеряются конкретные периоды времени либо определенный перечень работ	2. Групповая или бригадная – изучается работа нескольких сотрудников	2. С применением автоматических средств регистрации
3. Периодическая – замеры проводятся отдельными отрезками, например: 2 часа с утра одного дня, 1,5 часа днем следующего и т. д.	3. Маршрутная – фиксация занятости происходит во время периодического последовательного движения наблюдателя по нескольким рабочим местам	3. Путем самостоятельной записи сотрудником своих действий –самофотография
4. Методом моментных наблюдений – состояние занятости работника фиксируется через строго определенные временные промежутки в течение всего дня	-	-

Создание фотографии рабочего времени происходит в три этапа (рисунок 1).

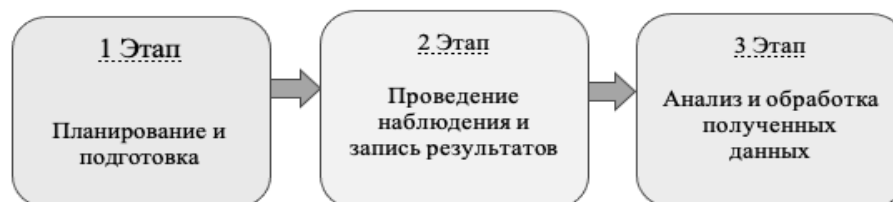


Рисунок 1 – Этапы создания фотографии рабочего времени

**На этапе планирования и подготовки** необходимо выполнить следующие действия:

1. Определить объект наблюдения, цели проведения фотографии рабочего времени, вид фотографии рабочего времени.
2. Выбрать параметры анализа и провести аналитическую работу по классификации временных затрат.
3. Собрать информацию о наблюдаемом рабочем месте и уточнить вид выполняемых работ: изучаются должностные инструкции, технологический процесс, операционные карты, порядок обслуживания, состояние оборудования, технические характеристики и пр.
4. Запланировать время проведения фотографии рабочего времени и согласовать его с заинтересованными лицами.
5. Разработать бланк для внесения информации и фиксации времени при проведении фотографии рабочего времени. Формы разрабатываются предприятием

самостоятельно в зависимости от параметров, перечисленных в п. 1. В бланк предварительно заносятся общие сведения.

**На этапе проведения наблюдений и записи результатов** регистрируются все действия рабочего и фиксируются временные затраты на выполнение каждого из них. Особое внимание стоит уделять причинам простоя оборудования и внеплановой работе сотрудника, обстоятельствам, повлиявшим на ее возникновение. Для получения более достоверных и объективных данных рекомендуется проводить наблюдения в течение нескольких дней. Наблюдатель не должен отвлекать внимание работника и мешать рабочему процессу.

**На этапе анализа и обработки полученных данных** вычисляются временные затраты по каждому элементу наблюдения. По выбранным на этапе планирования параметрам следует группировать одноименные затраты, указать их продолжительность и повторяемость.

Полученные в результате наблюдений данные подвергаются всестороннему анализу, позволяющему определить, насколько оптимально распределяется трудовой ресурс, выявить потери, в т. ч. скрытые. Также должны быть тщательно изучены потери, связанные с нерациональным использованием оборудования, инструментов, оснастки, организацией рабочего места.

На основе данных анализа следует определить фактический баланс времени и разработать нормальный баланс времени, в который включают только те затраты, которые необходимо производить в условиях правильной организации рабочего места при эффективном использовании технических параметров оборудования, применении прогрессивной технологии и рациональной организации труда. [10]

Комплекс организационно-технических мероприятий по сокращению, а в лучшем случае устранению потерь рабочего времени и совершенствованию организации труда является завершающим этапом анализа и обработки данных. Этот комплекс мероприятий можно расценивать как корректирующие действия по устранению несоответствий.

Согласно ГОСТ Р ИСО 9001–2015 [9], при появлении несоответствий организация должна:

- а) реагировать на данное несоответствие и насколько применимо:
  1. предпринимать действия по управлению и коррекции выявленного несоответствия;
  2. предпринимать действия в отношении последствий данного несоответствия;
- б) оценивать необходимость действий по устранению причин данного несоответствия с тем, чтобы избежать его повторного появления или появления в другом месте посредством:
  1. анализа несоответствия;
  2. определения причин, вызвавших появление несоответствия;
  3. определения наличия аналогичного несоответствия или возможности его возникновения где-либо еще;
- с) выполнять все необходимые действия;
- д) проанализировать результативность каждого предпринятого корректирующего действия;
- е) актуализировать при необходимости риски и возможности, определенные в ходе планирования;

f) вносить при необходимости изменения в систему менеджмента качества.

Рассмотрим пример фотографии рабочего времени на рабочем месте оператора лазерной резки листового металла. Оборудование - автоматизированный комплекс лазерной резки «IRON MAC 3015BT» (рисунок 2).

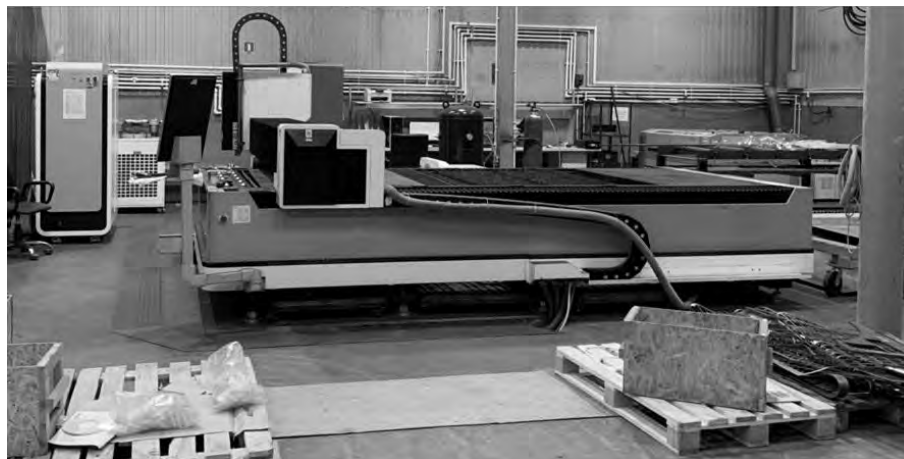


Рисунок 2 – Автоматизированный комплекс лазерной резки

Наблюдение проводилось в течение трех дней: в первый день – 6 часов, во второй день – 3 часа, в третий день – 2 часа. В таблице 2 представлен фрагмент заполненного бланка фотографии рабочего времени.

Таблица 2 - Наблюдение за работой оператора лазерной резки, 08.03.2022

Время	Статус станка	Действия оператора/сопутствующие	Потери
9:35	работает	Привезли баллоны с газом	
9:39	работает	Замена баллона	
9:43	работает	помощь с заменой баллонов другим, оператор находится у станка "термэйд"	
9:50	станок стоит	перерыв 12 мин	12 минут
10:02	работает	конец перерыва, оп. 3 мин. работает у станка kamach, после находится у станка "термэйд"	
10:26	работает	ушел на 4 мин., после находится у станка "термэйд"	
10:31	работает	работа за компьютером	
10:34	работает	замеряет обрезки в стеллаже, без материала возвращается к танку "термэйд"	
10:39	станок стоит	отнес обрезок листа в стеллаж, снял со станка лист с мелкими деталями	3 минуты
10:42	не работает	привез лист со стеллажа на погрузчике	2 минуты
10:44	станок стоит	работа за компьютером	10 минут
10:54	работает	оператор находится у станка и наблюдает	
10:58	не работает	убирает обрезки (в стеллаж и отходы на поддон)	4 минуты
11:02	станок стоит	ищет подходящие лист в стеллаже, находит	4 минуты
11:06	работает	резка первого листа	
11:12	не работает	снимает готовые детали	1 минута
11:13	работает	режет второй (из 2-х) лист	
11:16	не работает	оп. снял готовые детали, ушел за новым листом к стеллажу	1 минута
11:17	работает	резка листа	
11:20	не работает	меняет сопло	1 минута
11:21	работает	оп. наблюдает	

Продолжение таблицы 2

11:23	не работает	снимает готовые детали, устанавливает новый лист	1 минута
11:24	работает	уходит за ящиком для вырезанных мелких деталей	
11:25	не работает	снимает готовые детали, устанавливает новую заготовку	1 минута
11:26	работает	резка	
11:28	станок стоит	Обеденный перерыв	Обед 30 минут + 4 минуты
11:56	станок стоит	оп. сидит на рабочем месте	
12:00-12:30	работает	цикл: каждые 2 минуты оп. то включает, то выключает лазер и снимает мелкие детали, кладет новую заготовку (обрезки прим. 500*100). 7 итераций	38 минут
12:30	станок стоит	вытаскивает упавшие детали из поддона под станком	
12:33	станок стоит	относит обрезок в стеллаж	
12:35	станок стоит	работа за компьютером	
12:42	станок стоит	оператор находится у станка "термэйд"	
12:46	станок стоит	берет штангенциркуль и ищет в стеллаже подходящий лист, не находит	
12:50	станок стоит	то же самое на поддоне с листами у станка	
12:55	станок стоит	снова сходил до стеллажа	
12:56	станок стоит	с помощью крана вдвоем поднимают (со 2 попытки) с поддона у станка стопку верхних листов, достают руками нижние листы и оставляют на полу, опускают верхние листы обратно. Вытащенные листы на погрузчике подвозит ко второму крану у станка "термэйд".	
13:04	станок стоит	Стопку верхних листов снова поднимают, опускают на погрузчик и оставляют рядом.	
13:06	станок стоит	Ломом поддевают листы на поддоне, цепляют зажимы	
13:08	не работает	Установка листа на станок	2 минуты
13:10	станок стоит	оп. возвращает листы с погрузчика на поддон, откатывает погрузчик на место	2 минуты
13:12	не работает	смена сопла	2 минуты
13:14	станок стоит	сходил до станка "термэйд" (забыл очки)	4 минуты
13:15	станок стоит	проверка баллона с азотом	
13:17	станок стоит	телефонный звонок	
13:18	работает	сидит и наблюдает, стоит рядом	
13:27	не работает	достает мелкие детали из листа, из поддона под станком	3 минуты
13:30	не работает	чистит поддон от отходов, отбивает приклеившееся ломом	4 минуты
13:34	станок стоит	делает замер установленного листа рулеткой, включает и сразу выключает лазер, звонит телефон	2 минуты
13:36	работает	резка 1 мин	
13:37	станок стоит	встав на направляющие, поправляет расположение листа ломом, уходит к стеллажу и возвращается, делает замер установленного листа рулеткой	3 минуты
13:40	работает	отрез части листа	
13:42	станок стоит	телефонный звонок, оп. на погрузчике взял пустой поддон и вернулся на раб. место	51 минута
13:50	станок стоит	большие обрезки листа (отрезанные ранее) поддевает ломом, цепляет зажимами и устанавливает на погрузчик	
13:56	станок стоит	везет поддон с листом в стеллаж, возвращает погрузчик на место, смотрит бумаги у себя, у соседнего станка, снова у себя	
14:00	станок стоит	ищет материал в стеллаже, уходит	
14:01	станок стоит	едет на погрузчике к стеллажу, достает с верхней полки поддон с листами, опускает на уровень глаз, рассматривает. Везет все к ближнему стеллажу (с ящиками), оставляет все на полу	

В результате анализа, обработки и расчетов были получены данные, представленные в таблице 3. В таблице приведены данные по наблюдению в первый из трех дней наблюдения.

Таблица 3 – Результаты расчетов

Общее время наблюдения, мин	359	100%
Станок резал материал, мин	138	38,4%
Станок простаивал, мин	221	61,5%
Из них вынужденная работа, мин	39	10,8%
Из них потери, мин	182	50,6%

Главными задачами были выявление потерь и определение причин простоя оборудования. Выбранный вид фотографии рабочего времени – индивидуальная, периодическая, способ наблюдения – визуальный с применением часов. Причины потерь и простоя оборудования, выявленные в ходе наблюдения, и корректирующие действия по их решению представлены в таблице 6. Цель, которую необходимо достигнуть путем выполнения этих корректирующих действий, - минимизировать потери и достигнуть уровня полезной работы в 85%.

Таблица 4 – Проблемы, выявленные в процессе наблюдения

№ п/п	Выявленная проблема	Действия по решению проблемы
1	В перечне опытных работ в общей папке на сервере не вся информация. Задания выдают на месте. Долгий поиск dxf файла на серийную продукцию.	Сделать объявление с указанием ссылки на папку. Сделать единую базу на dxf файлы по серийной продукции с указанием адресата на рабочем месте. Уведомить работников о создании единой базы чертежей.
2	Во время перерывов и обеда лазер простаивает (10 минут каждый час + 30 минут обеда)	Поиск операторов на лазер или подсобного рабочего, которые переключат простои по перерывам и обеду. Закрепление графика перерывов и обеда с учетом максимальной работы оборудования
3	Нет визуализации на стеллаже с обрезками, которые числятся на участке.	Сделать вертикальный стеллаж для оптимального хранения, визуализацию. На поиск материала должно уходить менее 15 секунд. Для тонкостенного металла (0,8–1,5мм) сделать горизонтальные полки.
4	Неудобство в извлечении мелких деталей, транспортировки и утилизации делового остатка.	Необходимо подобрать коэффициент исп. металла, раскрой, анализ доп. ПО, в т. ч. сокращение тех. отходов. Подобрать инструмент, который позволит снимать заготовки без сдвига листа (плоскогубцы и др.) - сейчас съём идет ломом, напильником. Проверить функционал программы на формирование раскроя.
5	Инструмент/оснастка внутри шкафа расположены хаотично.	Сделать сортировку и визуализацию инструмента/оснастки, сделать ложементы. На поиск должно уходить менее 15 секунд.
6	При снятии и установке захватов крана оператору приходится вставать на направляющие станка.	Определить возможно ли изготовление площадки/лестницы, исключающей ходьбы по направляющим трубореза. Подобрать и купить пневматические захваты до 1,5 т.
7	Сбои с поставками азота и кислорода. После наполнения бочки азоту необходимо отстояться не менее 12 ч., иначе происходит его закипание и как следствие потеря около 0,5 т. газа. Рез с азотом получается намного дороже, чем с воздухом под высоким давлением	Рассчитать экономическую часть (еженедельно тратится 4 тонны азота), сколько стоит компрессор и система очистки. Проект производства работ: обсудить с поставщиком перенос времени заправки бочки на вечернее время с возможностью оставлять машину на парковке предприятия.

Продолжение таблицы 4

8	Медленный вывод станка в 0.	Проверить позиционирование быстрой привязки стандартного листа. Если нет указания на эту точку, сделать ложемент под быстрый поиск "0" станка.
9	Из-за отсутствия визуализации листового металла на складе металла работник долго ищет нужный материал.	Сделать сортировку и визуализацию листового проката на складе металла. Внедрить систему карточек канбан - выдача металла к нужному времени под роспись складского работника.
10	На подкатном столе с материалом большая стопка листового материала – оператору неудобно доставать нижние листы.	Сделать сортировку и визуализацию металла на складе. Внять в обязанности работника поддержание порядка на тележке - материал на работу станка в текущий день.
11	Тележка под входящие на лазер листы не функционирует должным образом.	Поднять вопрос об изменении принципа выдачи листового материала (напр., установка тележки на рельсы).
12	Неудобные поддоны под рабочим столом станка.	Доработать поддоны, заказать колеса и сделать ручку.
13	Нет удобного места под готовую продукцию - вырезанные листы прислонены к стенкам, колонне, таре и т. д.	Сделать визуализацию, обозначить помимо места под поддон, полку с готовой продукцией.
14	Во время доставания из листа заготовок лазер простаивает.	Сделать стандарт работы с указанием последовательности действий (доставать заготовки, когда режется следующий лист).
15	Не сделаны мероприятия ТРМ на оборудовании.	Создание стандартов ЕТО, безопасности, уборки, 5S Р.М. создание тележки ЕТО.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сауренко Т.Н., Сазыкин А.М., Усиков Р.Ф. Модель и алгоритм обоснования состава оборудования и специалистов для проведения испытаний // Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. 2021. № 1-2 (151-152). С. 113-122.

2. Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г., Босов Д.Б. Сетевые модели и методы ресурсно-временной оптимизации в управлении инновационными проектами.- Москва, 2006.- 117 с.

3. Воскресенский Б.В., Паламарчук А.С. Справочник экономиста-машиностроителя. Изд. 2-е, перераб. и доп. - Москва: изд-во Машиностроение, 1997. - 302 с.

4. Касяненко Е.О., Гасюк Д.П. Применение процессного подхода для оптимальной работы предприятия // В сборнике: Неделя науки СПбПУ. материалы научной конференции с международным участием. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. 2016. С. 26-29.

5. Косова В.А., Гасюк Д.П. К вопросу анализа условий разработки технологических процессов машиностроительных предприятий // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2021. № 2. С. 655-658.

6. Федотова А.М., Гасюк Д.П. Анализ рисков возникновения проблем с качеством технологической подготовки производства и разработка мероприятий по их снижению в условиях АО "НИИЭФА" // Металлообработка. 2021. № 1 (121). С. 50-54.

7. Мегера Ю.А., Гасюк Д.П., Меженев А.В. Адаптация системы технического обслуживания и ремонта к системе комплексного сервисного обслуживания // В сборнике: Проблемы технического обеспечения войск в современных условиях: Труды II межвузовской научно-практической конференции. 2017. С. 318-322.



8. Мегера Ю.А., Гасюк Д.П., Бурлаков А.А. Анализ взаимодействия системы технического обслуживания и ремонта вооружения и военной техники с оборонно-промышленным комплексом // В сборнике: Проблемы технического обеспечения войск в современных условиях. Труды II межвузовской научно-практической конференции. 2017. С. 314-317.

9. ГОСТ Р ИСО 9001-2015 Системы менеджмента качества. Требования.

10. Тихомирова Т.П. Организация, нормирование и оплата труда на предприятии : учеб.пособие / Т.П. Тихомирова, Е.И. Чучкалова. - Екатеринбург: Изд-во ГОУ ВПО РГППУ, 2008. - 185 с.

С.В. Федосова, Д.П. Гасюк  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Санкт-Петербург, Россия, [fedosova.Sonya@mail.com](mailto:fedosova.Sonya@mail.com)

## ОСОБЕННОСТИ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ, ПЕРЕДАННЫМИ НА АУТСОРСИНГ

### Аннотация

В статье проведен анализ стандартов в области качества и технологического процесса, рассмотрены основные понятия и их взаимосвязи. Представлены ключевые особенности управления технологического процесса.

*Ключевые слова:* аутсорсинг, технологический процесс, качество, процессный подход, конкурентоспособность.

Главная цель предприятия машиностроения состоит в обеспечении конкурентоспособности и ликвидности в условиях рыночной экономики. Существенное влияние в этом направлении играет множество факторов, которые оказывают влияние на результаты его хозяйственной деятельности: качество поставляемой продукции, своевременное изучение рынка, конкурентная цена, уровень квалификации персонала, расширение рынка сбыта. Анализ внешней и внутренней среды предприятия позволил прийти к выводу, что часть факторов способствует повышению конкурентоспособности, другая наоборот приводит к её снижению [1 - 15]. Так, например, в современных условиях обременение предприятия непрофильными видами продукции уменьшает эффективность производства и является одной из причин снижения конкурентоспособности. Во избежание этого в настоящее время во всем деловом мире стали прибегать к практике аутсорсинга.

На фоне непростой экономической ситуации и нового индустриального переворота России - роль аутсорсинга еще больше возрастает, так как большинство руководителей считают, что аутсорсинг никак иначе, как средство повышения эффективности и снижения издержек предприятия. По своей сути аутсорсинг – это передача организацией одной или нескольких своих процессов (циклов), как основных, так и вспомогательных, сторонним организациям [7, 8]. Несмотря на то, что на сегодняшний день существует достаточно большое количество литературы, посвященной общим вопросам аутсорсинга, остается все также достаточно мало информации о том, с какими особенностями управления технологическими процессами сталкиваются организации при передаче циклов на аутсорсинг.

Поначалу сторонним организациям передавали только функции, которые не представляли значительных рисков, например, бухгалтерский учет. Затем наблюдалась массовая передача процессов управления контактами или обслуживания клиентов. Сейчас мы можем наблюдать, как сторонним организациям передают целую стадию жизненного цикла (рис. 1). В статье мы как раз рассмотрим с какими особенностями сталкиваются компании, когда передают разработку технологического процесса, который входит в стадию «производство», сторонним организациям.

Для начала давайте разберемся подробнее, что называют «технологическим процессом». Для этого обратимся к ГОСТ 3.1109-82: технологический процесс - часть производственного процесса, содержащая целенаправленные действия по изменению

и (или) определению состояния предмета труда [12]. То есть, техпроцесс - взаимосвязанные действия на производстве и если его разобрать по пунктам, то можно выделить следующие необходимые этапы для любого вида предприятия:

- подготовка и анализ входных данных о перспективном продукте, материалу, производственной базе;
- определение основных технологических решений;
- подготовка технико-экономического обоснования;
- оформление технологического процесса в формате технической документации;
- заключения ОТК на готовую продукцию;
- упаковка или установка, реализация готового продукта.

Качественно сформированная структура технологического процесса повышает организованность и контроль во время передачи данных процессов сторонним организациям. Помимо отлаженного техпроцесса, еще одной задачей компании, намеревающейся использовать передачу производственного цикла на стороннюю организацию, является обеспечение условий необходимых для гарантированного выполнения требований потребителя. Поэтому наиболее результативным подходом, позволяющим комплексно управлять решениями в области аутсорсинга и определить его особенности, является процессный подход в системе менеджмента качества, позволяющий эффективно выбрать регламент работы, снизить риск возникновения несоответствий в процессе аутсорсинга, оценить его результативность и выявить особенности управления.

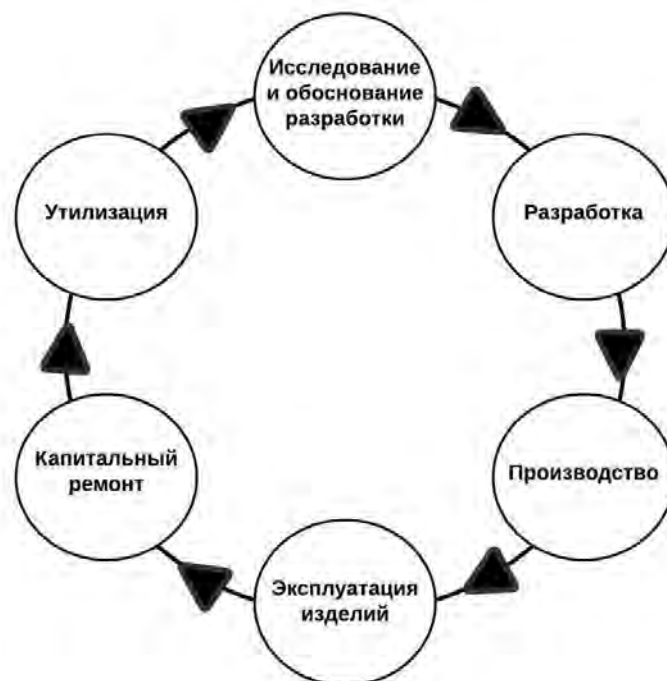


Рисунок 1 — Стадии жизненного цикла

Выделим основные факторы процессного подхода, которые окажут влияние на управление системой организации с целью достижения желаемых результатов при передаче процесса сторонним организациям, применение которых приведет к:

- снижению издержек;
- росту производительности и рентабельности, а также к скорости ликвидности продукции;

- систематическому определению видов деятельности, необходимых
- для достижения желаемого результата;
- установлению четкой иерархической лестницы по подразделениям, которая приведет к четкой системе ответственности и подотчетности по управлению видами деятельности;
- концентрации внимания на тех факторах, которые будут улучшать ключевые виды деятельности организации – таких, как ресурсы, методы и ресурсы;
- упрощенному анализу компании, то есть бизнес-процесс станет прозрачным, станет легко определить слабые места и понять, что нужно улучшить или заменить.

Обратимся к стандарту ISO 9001:2015: «Процессный подход позволяет организации планировать свои процессы и их взаимодействие». Данная формулировка говорит о том, что процессный подход предполагает наличие ключевых элементов: вход/выход процесса, источники входа/выхода, а также ресурсы и нормативная документация.

На рисунке 2 приведена диаграмма процессной модели IDEF0. Разберемся более подробно в элементах модели. Прямоугольником обозначен процессный блок. Так, стрелка справа «вход» процесса—это элементы, претерпевающие изменения в ходе выполнения действий. В качестве входов процессный подход рассматривает материалы, оборудование, документацию, различную информацию, персонал, финансы и прочие ресурсы организации. Стрелка «Управление», расположенная сверху модели, характеризует базу управления процессом. Блок управление включает регламентирующие, нормативные и законодательные документы, стандарты и т.п. Стрелка «Механизмы», расположенная под процессом, отражает ресурсы, используемые для реализации процесса (персонал, техника, оборудование). Стрелка слева обозначает «выход» процесса, под ней подразумеваются данные или материальные объекты, произведенные процессом. Другими словами, «выход» — это продукция, информация или услуга, получаемая в результате реализации процесса.



Рисунок 2 — Процессная модель «Управление технологическими процессами»

Процессный подход [5] ориентирован, в первую очередь, не на организационную структуру предприятия, а на бизнес-процессы, конечными целями выполнения которых является создание продуктов, которые полностью должны удовлетворять потребителя.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г., Бойко А.П., Калинина О.В., Карпов В.А., Лобас Е.В. Введение в экономический риск-менеджмент. - Москва, 2008. - 91 с.
2. Сауренко Т.Н., Чварков С.В. Экономическая политика в системе национальной безопасности российской федерации // Национальные приоритеты России. 2016. № 3 (21). С. 22-32.
3. Мегера Ю.А., Гасюк Д.П., Меженов А.В. Адаптация системы технического обслуживания и ремонта к системе комплексного сервисного обслуживания // В сборнике: Проблемы технического обеспечения войск в современных условиях: Труды II межвузовской научно-практической конференции. 2017. С. 318-322.
4. Мегера Ю.А., Гасюк Д.П., Бурлаков А.А. Анализ взаимодействия системы технического обслуживания и ремонта вооружения и военной техники с оборонно-промышленным комплексом // В сборнике: Проблемы технического обеспечения войск в современных условиях. Труды II межвузовской научно-практической конференции. 2017. С. 314-317.
5. Касяненко Е.О., Гасюк Д.П. Применение процессного подхода для оптимальной работы предприятия // В сборнике: Неделя науки СПбПУ. материалы научной конференции с международным участием. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. 2016. С. 26-29.
6. Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г., Босов Д.Б. Сетевые модели и методы ресурсно-временной оптимизации в управлении инновационными проектами.- Москва, 2006.- 117 с.
7. Вырвич А.А., Гасюк Д.П., Шахов Д.Г., Жуков П.Ю., Майгов А.В. К вопросу повышения качества сервисного обслуживания подвижного состава транспортной кампании в условиях цифровизации экономики // В сборнике: Модели и методы развития технологий машиностроения в условиях цифровизации экономики России: Научные труды Высшей школы машиностроения / Под редакцией А.А. Поповича.- Санкт-Петербург, 2022. С. 220-227.
8. Луцкая Н.В. Требования и порядок управления процессами аутсорсинга в системах менеджмента качеств // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2013. № 11 (82). С.359–365
9. ГОСТ РВ 15.004-2004. Система разработки и постановки продукции на производство. Военная техника. Стадии жизненного цикла изделий и материалов.
10. ГОСТ Р ИСО 9001:2015. Национальный стандарт Российской Федерации. Системы менеджмента качества. Требования
11. Пешкова О.В. BPM-подход к управлению организацией: регламенты и проблемы /О.В. Пешкова. — DOI 10.17150/2411-6262.2021.12(2).11 // BaikalResearchJournal. —2021. — Т. 12, № 2.
12. ГОСТ 3.1109-82. Единая система технологической документации. Термины и определения основных понятий
13. Р 50.1.028-2001. Информационные технологии поддержки жизненного цикла продукции. Методология функционального моделирования.
14. СТ РК ISO 37500-2018 «Руководство по аутсорсингу»
15. Документ ISO/TC 76/SC 2 №630 R2

К.А. Тихомиров, В.В. Ваганов  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Санкт-Петербург, Россия, [k.tikhomirov@yandex.ru](mailto:k.tikhomirov@yandex.ru).

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ПЕЧАТИ НА ЦИФРОВЫХ ПЕЧАТНЫХ МАШИНАХ С ПОМОЩЬЮ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ ПОДГОТОВКИ ЗАПЕЧАТЫВАЕМОГО МАТЕРИАЛА**

### **Аннотация**

Объектом исследования данной статьи является изучение возможности повышения качества печати на цифровых печатных машинах с помощью предварительной подготовки запечатываемого материала. В результате проделанной работы, определены оптимальные режимы подготовки для выбранных материалов. Данные режимы позволят улучшить адгезионные свойства печати и повысят ее качество.

*Ключевые слова:* упаковка, грунтование, качество, полимер, цифровая печать, коронирование, праймирование, оптимизация материала, печатно-технические возможности.

### **Введение**

В настоящее время в России, как и за рубежом, наблюдается активный переход предприятий на цифровое оборудование.

Цифровое оборудование открывает перед предприятиями новые возможности. В первую очередь это касается ширины спектра запечатываемого материала, который намного больше, чем в других способах печати. С такими технологическими возможностями по запечатыванию материалов появляется проблема сохранения требуемого качества печати. Для решения данной проблемы используют различные способы оптимизации запечатываемого материала.

В данной статье будет рассмотрен вопрос исследования влияния различных способов подготовки запечатываемого материала на качество печати.

Целью данной работы является выбор оптимальных способов повышения качества печати, путем оптимизации запечатываемых материалов для цифровых печатных машин.

На сегодняшний день в России, а также и в мире, происходит активное развитие упаковочной индустрии. В качестве выпускаемой продукции популярны: самоклеящиеся этикетки (бумага, PE, PP, PET), гибкая упаковка (PE, PP, PET), термоусадочная пленка (PET, PP, OPS, PLA) и картонная упаковка.

Оценив состояние международного рынка и спроса на полимерную упаковку, можно констатировать, что спрос постоянно растет на пленки из полипропилена PP и полиэтилентерефталата PET. Данный рынок является очень прибыльным, но в то же время конкурентным.

В данной статье рассмотрено влияние подготовки запечатываемого материала на качество выпускаемой продукции, а именно: полипропилена и полиэтилентерефталата.

Полипропилен — полимер из класса полиолефинов, неполярен и термопластичен, является традиционным материалом. Вид имеет белого твердого

вещества. Данный вид материалов используется в производстве упаковочных изделий технического и бытового назначения, также применим для изоляционных целей.

Полиэтилентерефталат — термопластик, принадлежащий к классу полиэфиров. Представляет собой твердое, прозрачное вещество в аморфном состоянии и белое непрозрачное в кристаллическом. Данный вид материалов используется для изготовления упаковочных изделий, волокон и преформ для емкостей. Лидирующие позиции занимает в полиграфической, шинной и текстильной промышленности.

Рассмотрены такие способы оптимизации запечатываемых материалов, как:

- коронирование
- праймирование (грунтование)

Коронирование – обработка поверхности коронным разрядом для придания дополнительных свойств материалу. Коронирование напрямую влияет на адгезию краски, от которой в свою очередь зависит качество печати и прочностные характеристики.

Праймирование – нанесение на запечатываемый материал специального раствора (грунта) для улучшения адгезионных свойств.

В ходе проведения исследования, были использованы различные режимы подготовки запечатываемого материала (табл. 1).

Для каждого режима подготовки был проведен тест на адгезионные свойства. Исследование проведено на цифровой печатной машине HPIndigoWS6600 с использованием красок HPElectroInk. Измерение адгезионных свойств проверено с помощью тестера адгезии SAMYON JP15-M1.

## Результаты

В результате тестов было определено, что для наиболее эффективной подготовки полипропилена следует использовать режим №7 (рис. 1) – грунтование среднего уровня и коронная обработка зарядом 600В, а для полиэтилентерефталата использовать режим №4 (рис. 2) – грунтование низкого уровня и коронная обработка зарядом 800В.

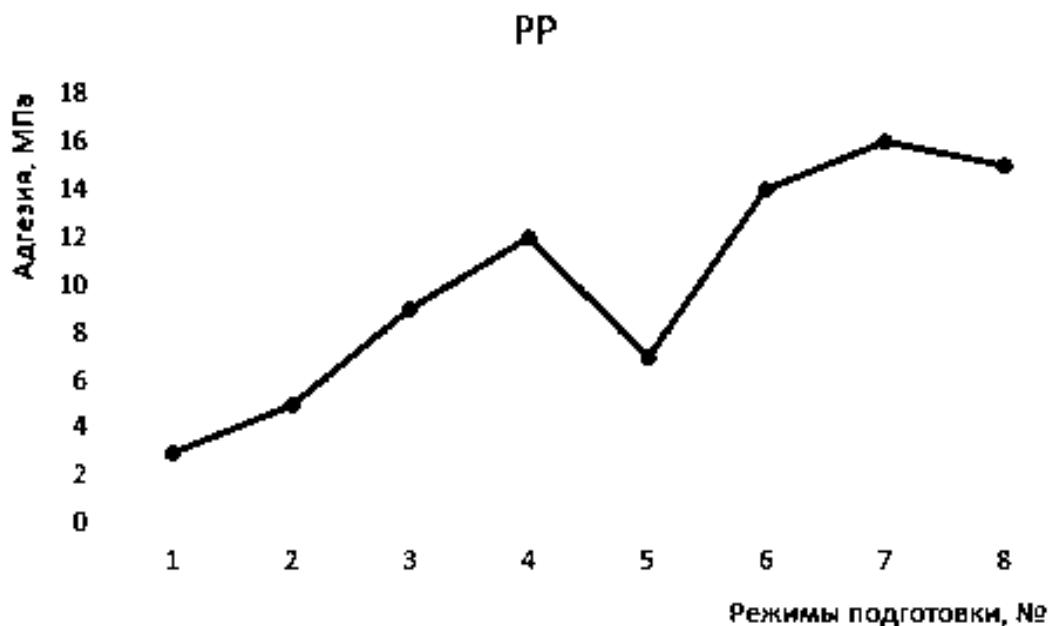


Рисунок 1 – График зависимости адгезионных свойств пропилена от режима подготовки

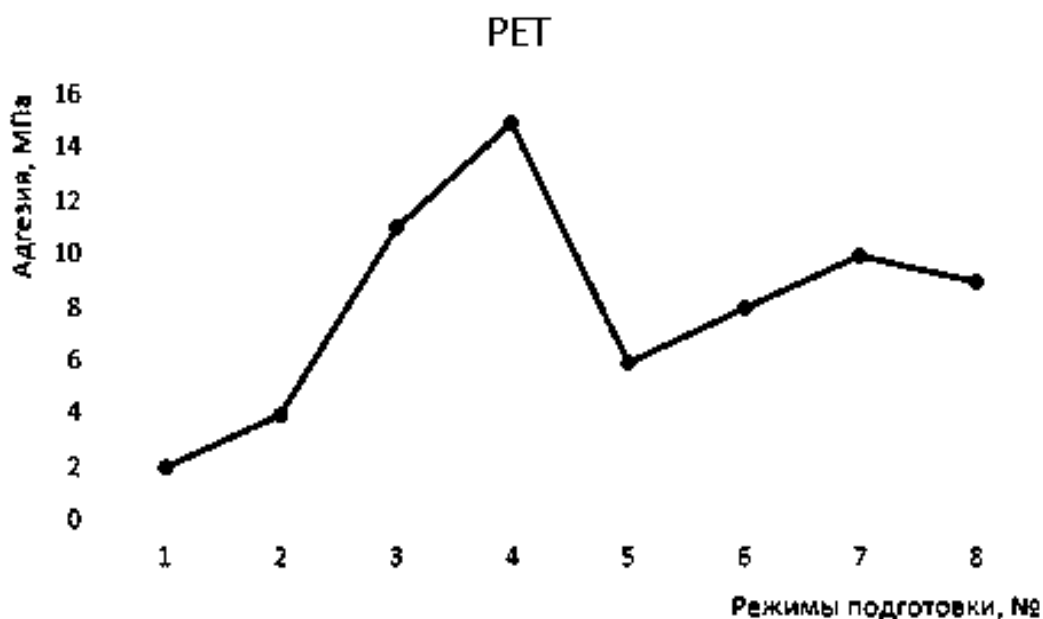


Рисунок 2 – График зависимости адгезионных свойств полиэтилентерефталата от режима подготовки

Таблица 1 – Режимы обработки запечатываемого материала

Режим подготовки \ Вид подготовки	Коронирование, В	Праймирование, уровень грунтования
Режим №1	нет	низкий
Режим №2	400	низкий
Режим №3	600	низкий
Режим №4	800	низкий
Режим №5	нет	средний
Режим №6	400	средний
Режим №7	600	средний
Режим №8	800	средний

### Заключение

В результате исследования выявлены оптимальные режимы подготовки полипропилена и полиэтилентерефталата, благодаря чему повышены адгезионные свойства красочного слоя, которые, в свою очередь, определяют качество печати.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Виноградов Е.Л. Цифровые технологии в принт-медиаиндустрии. Оптическое сканирование: монография / Е.Л. Виноградов, В.В. Ваганов. - СПб. : ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2021. - 263 с.
2. Маркевич И.Е. Методика оценки печатных оттисков с применением технологии цифрового сканирования / И.Е. Маркевич, В.В. Ваганов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. - 2021. - № 2. - С. 606-610.



# Перспективные материалы и технологии

УДК 621.891

М.А. Шилов  
Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина,  
Иваново, Россия, [Mshilov@yandex.ru](mailto:Mshilov@yandex.ru)

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ОРИЕНТАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В СМАЗОЧНОМ СЛОЕ ПРИ СДВИГЕ ПОД ДАВЛЕНИЕМ

### Аннотация

В работе представлена модель сдвигового течения пластичного смазочного материала под давлением с учетом ориентационных процессов углеродных наноструктур. Показано, что на величину напряжения сдвига влияют как концентрация углеродных наноструктур, так и степень их ориентирования относительно смазочных слоев.

*Ключевые слова:* модель, сдвиг, углеродные наноструктуры, ориентация, смазочный слой.

### Введение

Консистентные смазки нашли применение во многих областях машиностроения. Использование смазочных материалов данного рода позволяют снижать потери на трение, износ и теплопередачу в механических системах [1, 2]. Понимание сдвиговых процессов в смазочном слое консистентных смазок имеет важное значение для оптимизации их характеристик и повышения величины времени между техническими обслуживаниями машин. Одним из методов повышения смазочной способности консистентных смазок является использование углеродных наноструктур в качестве присадок. Эффективность такого подхода показана в работах [3, 4]. Интерес к исследованиям пластичных смазочных материалов (ПСМ) с углеродными наноструктурами (УНС) обусловлен высокой чувствительностью ориентации молекул УНС к механическим воздействиям. Даже слабое воздействие меняет начальную ориентацию молекул УНС, и молекулы отклоняются периодически от равновесного положения. Как было показано, в случае холестерических и сегнетоэлектрических пластичных материалов углеродные нанотрубки ориентируются вдоль мезогенных молекул [5, 6]. В случае немезогенных ПСМ повышение интенсивности воздействия приводит к образованию деформаций смазочного слоя (СС), когда молекулы колеблются около нового равновесного положения, периодически меняющегося вдоль слоя. Образование периодически упорядоченных структур при сдвиге зависит от начальной ориентации молекул УНС в смазочном слое, вида движения граничной пластины, условий ориентации молекул УНС на границе [7]. Появление частично упорядоченной деформированной структуры в СС под действием гидродинамических потоков теоретически анализируется во многих работах, однако эти исследования не охватывают всех

особенностей упорядочения структуры смазочного слоя. В связи с этим, целью работы стало создание модели, позволяющей оценивать влияние ориентационных процессов УНС в смазочном слое в условиях сдвига под давлением.

### Постановка задачи

Объектом моделирования являлся ПСМ, представляющий собой базовое масло с присадками углеродных наноструктур (УНС), заключенных в каркас загустителя. Поверхности трения полагали идеально гладкими. Задачей модели было оценить влияние типа и концентрации УНС на величину сдвиговых напряжений. Рассмотрена упрощенная схема трения двух контактирующих поверхностей разделенных смазочным слоем (СС) объемом  $V = blh$ , где  $h$  - высота,  $l$  - длина,  $b$  - ширина (рис. 1). Этот объем подвергался операции сдвигания и сдвига с постоянной скоростью  $v_0$ . В качестве присадок УНС рассматривали углеродные нанотрубки (1D) и графены (2D). Особенностью УНС является то, что в каждой из них есть преимущественное направление ориентирования молекул, характеризующееся безразмерным параметром порядка  $S$ . При деформации объема  $V$ , находящиеся в ее составе УНС, под действием моментов сил, возникающих вследствие движения среды, вызывают изменение параметра порядка с тенденцией к упорядочиванию вдоль линий течения среды (по полю скоростей). Конечно, может оказаться и так, что сформированный порядок по показателю параметра порядка будет таким же, что был в начале, поэтому при создании данной модели, чтобы учесть переориентирование УНС и формирование порядка в новом направлении, вводится понятие вектора параметра порядка.

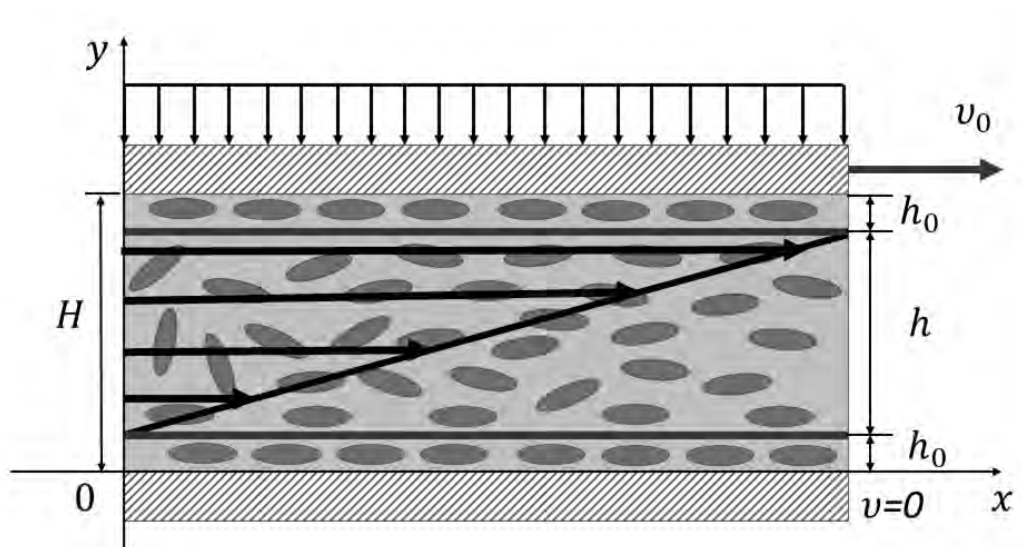


Рисунок 1 – Процесс сдвига слоев при трении металлов

Модель должна установить связь между параметром порядка  $S$ , меняющимся в процессе деформаций и значением сдвиговых деформаций. Полагая то, что в процессе деформирования будет меняться параметр порядка в направлении сдвига и вследствие этого скольжение слоев будет происходить с меньшими сдвиговыми напряжениями. Вначале рассмотрим простую модель. Считаем, что объем СМ, уже сжатого между пластинами, сдвигается путем перемещения верхней его части относительно нижней со скоростью  $v_0$ . Задачу рассмотрим, как случай деформирования в плоскости  $XOY$ . Движение верхней части будем всегда направлять

вдоль оси  $OX$ . Изначально выделенное направление в объеме выберем вдоль оси  $OY$ . Наделим это направление вектором параметра порядка  $\vec{S}$ . По мере движения этот вектор будет менять свое положение и стремиться занять положение вдоль оси  $OX$ . Поэтому важно выяснить, как изменяется со временем проекция этого вектора на ось  $OX$ , т.е.  $S_x(t)$ . В кинематической части модели параметрами служат константы, в которые могут входить молекулярные параметры УНС. Согласно экспериментальным данным, скорость роста  $S_x$  пропорциональна градиенту скоростей  $\frac{\partial v_x}{\partial y}$ . С учетом этого и предположением о том, что скорость изменения проекции параметра порядка пропорциональна степени его удаленности максимального значения  $S_x = 1$  будем иметь:

$$\frac{\partial S_x}{\partial t} = \alpha \cdot \frac{\partial v_x}{\partial y} \cdot (1 - S_x), \quad (1)$$

где  $\alpha$  – коэффициент пропорциональности, описание и физический смысл которого приведен ниже. По мере сдавливания выбранного объема градиент скоростей изменяется вследствие уменьшения толщины слоя. В общем случае градиент скоростей будет зависеть от координаты  $x$ , но в рамках нашей модели можем принять:

$$\frac{\partial v_x}{\partial y} = \frac{v_0}{h}, \quad (2)$$

где  $h$  – толщина слоя. Уравнение (1) в этом случае легко проинтегрировать с начальным условием  $S_x(0) = 0$ . В результате интегрирования получим

$$S_x(t) = 1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right), \quad (3)$$

где  $\tau$  – характерное время релаксации параметра порядка. В нашем случае его можно оценить как

$$\tau = \frac{1}{\alpha \cdot \frac{v_0}{h}} \quad (4)$$

Важно, что полученная зависимость (3) показывает, что механизм выстраивания молекул вдоль поля скоростей носит релаксационный характер. На величину времени релаксации оказывает влияние концентрация и геометрия УНС. Поскольку УНС проявляют мезоморфизм, то для описания их геометрических характеристик в соответствии с теорией Флори можно ограничиться рассмотрением аспектного отношения (AR). В работе [8] нами показано, что его величина влияет на изгибную жесткость отдельных нанотрубок. Однако, с ростом их концентрации в объеме смазочного материала, возрастает упругая составляющая модуля сдвига ПСМ и, соответственно, величина времени релаксации. Для оценки времени релаксации, т.е. определения времени установления равновесных процессов при трении металлов было предположено, что снижение адсорбционной активности сопровождается

уменьшением концентрации УНС в ПСМ. С физической точки зрения процесс насыщения поверхности конечен и ограничен величиной оптимальной концентрации  $C_0$ , после превышения величины которой УНС на поверхности трения практически не адсорбируются. Эксперименты по оценке скорости насыщения поверхности трения УНС (рис. 2) показали наличие двух четко выраженных участков. На первом наблюдается резкое снижение концентрации, на втором концентрация практически не изменяется. Это свидетельствует о насыщении поверхности и переходе трибосистемы в равновесное состояние.

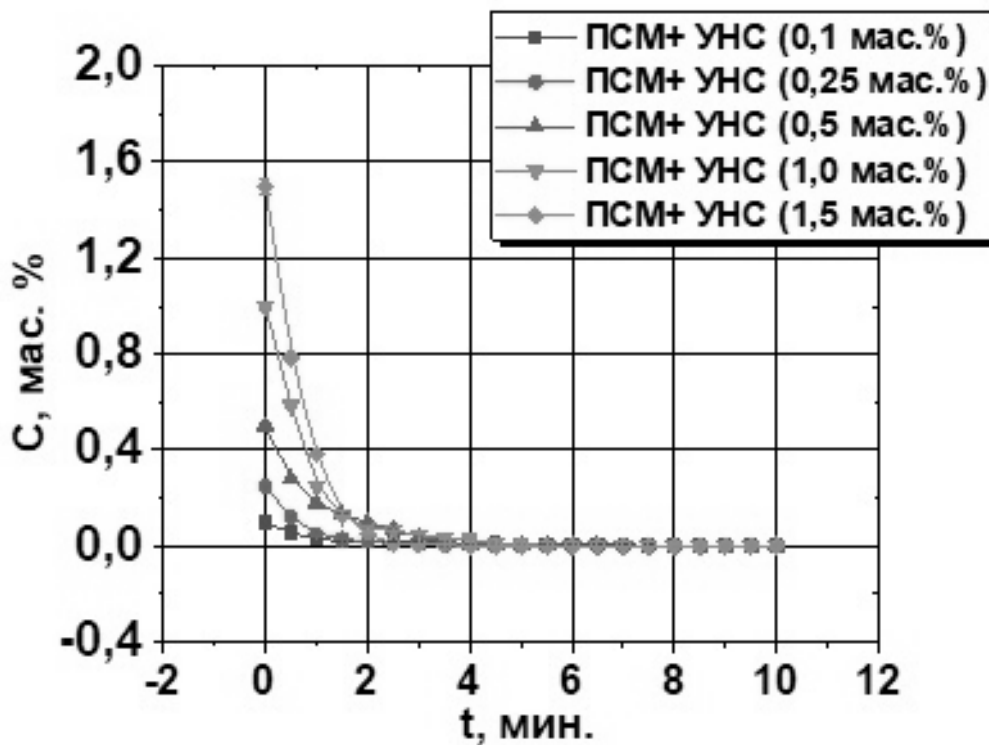


Рисунок 2 – Скорость снижения концентрации

Для описания процесса снижения концентрации УНС в ПСМ в процессе трения воспользуемся условием:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -k(C - C_0), \quad (5)$$

здесь  $k$  коэффициент пропорциональности, зависящий от геометрических характеристик (аспектного отношения) и адсорбционной активности конкретного УНС. Разделив переменные и проинтегрировав выражение с учетом начальных условий (в начальный момент ( $t = 0$ ) времени  $C = C_{max}$ ) получим:

$$C^* = C_{max}e^{-kt} + C_0(1 - e^{-kt}). \quad (6)$$

Общее время процесса  $t$  можно оценить по длине размазывания объема в направлении оси  $OX$ . Поскольку объем СМ несжимаем можно считать, что первоначальный объем  $V \sim b^3$ , равен конечному  $V \sim h \cdot b \cdot l$  сдвинутого вдоль оси  $OX$ , где  $l$  – длина сдвига. Отсюда следует, что

$$l = \beta \cdot \frac{b^2}{h}, \quad (7)$$

где  $\beta$  – параметр, зависящий от пластических характеристик ПСМ. Тогда время процесса можно найти как

$$t = \frac{l}{v_0} = \beta \cdot \frac{b^2}{h \cdot v_0}. \quad (8)$$

Подставляя значения параметров в значение параметра порядка, получим:

$$S_x(t) = 1 - \exp\left(-\gamma \cdot \left(\frac{b}{h}\right)^2\right), \quad (9)$$

где  $\gamma = \alpha \cdot \beta$  – безразмерный параметр. Свяжем полученное выражение (3) проекции параметра порядка со сдвиговыми напряжениями в плоскости  $XOY$ , которые обозначим:  $\sigma_{xy}$ . В случае стационарного течения, касательные напряжения можно представить в виде:

$$\tau_{xy} = \eta(S_x, C^*) \cdot \frac{v_0}{h}. \quad (10)$$

$\eta(S_x, C^*)$  – коэффициент динамической вязкости, зависящий от проекции параметра порядка  $S_x$  УНС, их концентрации  $C$  и пластических свойств СМ. Из теории жидкокристаллического состояния известно, что наиболее оптимальной ориентацией молекул жидких кристаллов, при которой наблюдается максимальный эффект смазочного действия является планарная. В силу того, что УНС являются потенциально мезогенными соединениями к ним также применимы теории жидкокристаллического состояния. Поэтому предполагается, что линейное падение коэффициента вязкого трения от проекции параметра порядка:

$$\eta(S_x, C^*) = \eta(0) - a \cdot S_x(t) \quad (11)$$

$\eta(0)$  – коэффициент динамической вязкости (для базовой ПСМ), когда  $S_x = 0$  (как в нашем случае),  $a$  – коэффициент пропорциональности. Таким образом, в конце движения значение напряжения сдвига примет вид:

$$\tau_{xy} = \left\langle \eta(0) - a \cdot \left\{ 1 - \exp\left(-\gamma \cdot \left(\frac{b}{h}\right)^2 \cdot \frac{1}{C^* \cdot AR}\right) \right\} \right\rangle \cdot \frac{v_0}{h} \quad (12)$$

Формула (12) выражает собой то значение касательных напряжений, которое сформируется в конце процесса сдвига объема ПСМ по поверхности.

### Заключение

Разработана модель сдвигового течения пластичного смазочного материала, учитывающая концентрацию и способность к ориентации УНС различной геометрии.

Показано, что напряжение сдвига зависит от пластических характеристик ПСМ, скорости сдвига и толщины смазочного слоя.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Lugt, P.M. Grease Lubrication in Rolling Bearings; Wiley: Hoboken, NJ. – USA, 2013. – 472 p. ISBN 978-1-118-35391-2.

2. Torbacke, M.; Rudolphi, A.K.; Kassfeldt, E. Lubricants Properties and Performance; Luleå Tekniska Universitet: Luleå. – Sweden, 2012. – 268 p. ISBN 978-91-7439-410-8

3. Парфенов А.С., Шилов М.А., Смирнова А.И., Берёзина Е.В., Ткачев А.Г., Бурков А.А., Рожкова Н.Н., Усольцева Н.В. Влияние различных аллотропов углерода на трибологические и реологические характеристики модельных смазочных систем // Трение и износ. - 2021. - Т. 42. - № 3. - С. 338-349.

4. Stolbov D.N., Smirnova I., Usol'tseva N.V., Savilov S.V., Shilov M.A., Burkov A.A., Parfenov S. Influence of different types of carbon nanoflakes on tribological and rheological properties of plastic lubricants // Fullerenes Nanotubes and Carbon Nanostructures. 2021.

5. Lisetski L.N., Minenko S.S., Zhukov A.V., Shtifanyuk P.P., Lebovka N.I. Dispersion of carbon nanotubes in cholesteric liquid crystals // Mol. Cryst. Liq. Cryst. - 2009. - Vol. 509. - Iss. I. - P. 43(1177)-50(1184).

6. Yakemseva M., Dierking I., Kapernaum N., Usol'tseva N., Giesselmann F. Dispersions of multiwall carbon nanotubes in ferroelectric liquid crystals // European Physical Journal E. Soft Matter. - 2014. - Vol. 37. - Iss. 2. № 7. - 7 p.

7. Buyanovskii, I.A., Ignatyeva, Z.V., Levchenko, V.A. et al. Orientation ordering of boundary layers and lubricity of oils. // J. Frict. Wear. - 2008. - Vol. 29. - P. 282–287.

8. Шилов М.А., Смирнова А.И., Столбов Д.Н., Усольцева Н.В. Моделирование деформационных процессов углеродных нанотрубок // Жидкие кристаллы и их практическое использование. 2020. - Т. 20. - № 1. - С. 85-91.

П.В. Королёв, М.А. Шилов  
Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина,  
Иваново, Россия, vedunking@mail.ru

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОРИЕНТАЦИИ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛАСТОМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

### **Аннотация**

В работе получены результаты зависимости физико-механических характеристик эластомерных композитов от концентрации армирующего элемента – многостенных углеродных нанотрубок (МУНТ) и их ориентации относительно направления внешних нагрузок. На основании экспериментальных данных определено оптимальное значение концентрации (МУНТ), при котором увеличиваются значения твердости, прочности на разрыв, снижаются относительно удлинение. Показано, что ориентирование УНТ в эластомерной матрице оказывает решающее влияние на физико-механические характеристики композита.

*Ключевые слова:* эластомер, композит, углеродные нанотрубки, свойства материала

### **Введение**

Основные особенности механических характеристик изделий из эластомерных материалов обусловлены их стереохимическими характеристиками: высокой гибкостью молекулярных цепей, слабым межмолекулярным взаимодействием, гетерогенной структурой и относительно прочной, но редкой трехмерной сеткой. За счет этого материалы на основе эластомеров способны проявлять хорошо заметные упругие и высокоэластические свойства. Поэтому, даже при больших деформациях, достигающих до сотен процентов, эластомеры способны практически полностью возвращаться в исходное состояние [1]. В тоже время, ведутся активные разработки методов улучшения триботехнических характеристик таких как износостойкость эластомерных материалов [2]. Одним из методов их повышения является введение углеродных наноструктур (УНС) в эластомерную матрицу [3-6]. Поскольку эластомерный композит с наполнителем в виде УНТ проявляет ярко выраженные анизотропные свойства, помимо концентрации наполнителя, при создании композита необходимо учитывать и ориентацию УНТ. Таким образом модификация эластомерных композитов УНТ является актуальной практической задачей, решение которой может привести к повышению упруго-прочностных свойств резин, при сохранении высокой технологичности резиновых смесей.

### **Методы**

Все экспериментальные данные получены в лаборатории ВятГУ при комнатной температуре. В работе проведены экспериментальные испытания по определению твердости по методу Шора А в соответствии с ГОСТ 263-75 и ГОСТ 20418-75 с применением твердомера ТШ-А (рис. 1а). Определение свойств для каждого типа резины реализовывали по нескольким режимам испытаний, проводимых на разрывной машине Sumadzu, серии AG-X по стандартной методике (рис. 1б).



а)



б)

Рисунок 1 – Испытательные установки ТМ-2 (а) и Sumadzu (б)

Ориентацию углеродных нанотрубок проводили на этапе изготовления невулканизированной смеси. При пропускании смеси через валки в тонком слое возникает сдвиговое течение, градиент которого вызывает выравнивание длинных осей УНТ вдоль поля сдвига. Это приводит к их ориентации в тонком слое смеси. Следует отметить, что ориентация УНТ изготовленного таким образом композита, носит не строгий характер.

### Результаты и обсуждение

Твердость резин характеризуют сопротивлением испытуемого образца материала вдавливанию в него инденторов (наконечников) различной формы и размеров. Показатель твердости зависит от большого числа факторов: продолжительности действия нагрузки, жесткости опоры под образцом, размеров и формы индентора, силы трения между поверхностями индентора и образца, формы образца, температуры испытаний. Поэтому определение показателя твердости следует проводить в строго регламентированных условиях. Значение твердости зависит от типа каучука, входящего в состав резиновой смеси, дозировок вулканизирующей группы, режимов вулканизации и других факторов. Введение в резиновую смесь активных ускорителей группы тиазолов, тиурамов, сульфенамидов и увеличение их дозировок повышает степень вулканизации резин, следовательно, и их твердость. Активные наполнители (N220, N330) также повышают твердость резин до определенного максимального значения. Введение пластификаторов сопровождается снижением твердости. Для большинства синтетических каучуков увеличение продолжительности вулканизации приводит к возрастанию твердости, для натурального каучука с ростом продолжительности вулканизации твердость возрастает до оптимального значения, а затем начинает уменьшаться. По значению твердости резины можно разделить на несколько групп:

- 1) Малой твердости (предел твердости по Шору А 35-50);
- 2) Средней твердости (предел твердости по Шору А 50-70);
- 3) Повышенной твердости (предел твердости по Шору А 70-90).



Сущность метода заключается в измерении сопротивления резины погружению в нее индентора. Результаты испытаний для двух типов резин при различной ориентации волокон углеродных нанотрубок представлены на рис.2.

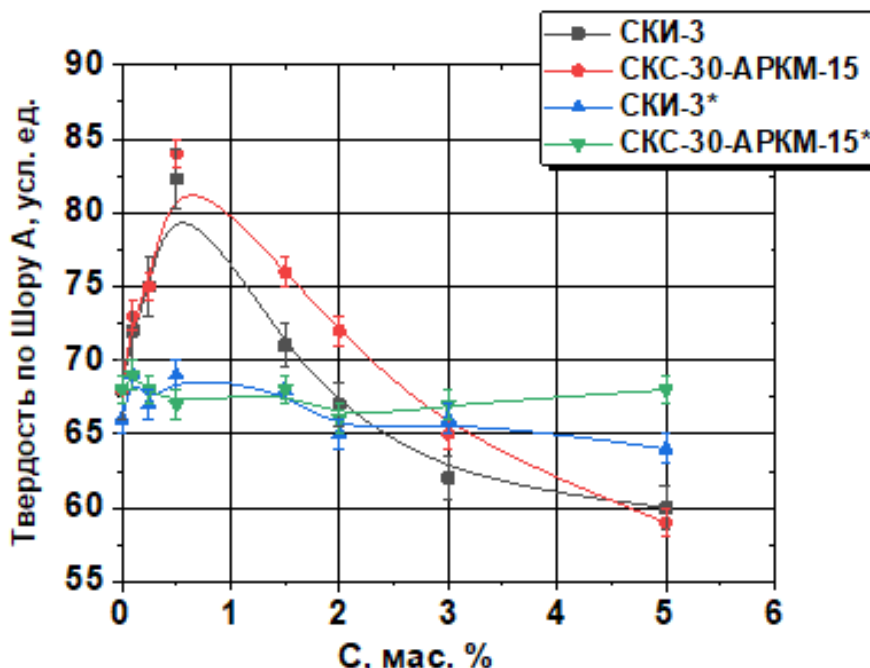


Рисунок 2 - Зависимость твердости эластомеров от концентрации для СИИ-3 с расположением УНТ параллельно направлению вдавливания индентору, СИИ-3\* с расположением УНТ перпендикулярно направлению вдавливания индентору. Испытания проведены при температуре 22 °С

Также были проведены тесты на растяжение до 100%. Результаты испытаний на прочность и деформацию в зависимости от концентрации для разной ориентации углеродных нанотрубок представлены на рис. 3 и 4.

Сравнивая полученные показатели условной прочностные можно отметить тенденцию к росту их при 100% удлинении и концентрации 0,5 мас. %. Это характеризует повышение густоты сетки и плотности сшивки макромолекулы каучука. Следует отметить, что наиболее сбалансированными упруго-прочностными свойствами по степени усиления обладают образцы резины СКС-30-АРКМ-15 с МУНТ. Их степень усиления при концентрации 0,5 мас. % выше чем у контрольного образца. Заметим, что ориентация УНТ в эластомерной матрице существенно влияет на физико-механические характеристики полученных композитов.

### Заключение

Анализ экспериментальных данных позволил определить оптимальную массовую концентрацию углеродных нанотрубок в эластомерном композите, которая составила 0,5%. Показано, что помимо концентрации на физико-механические характеристики существенное влияние оказывает ориентация УНТ в эластомерной матрице, позволяя улучшать упруго-прочностные и триботехнические характеристики.

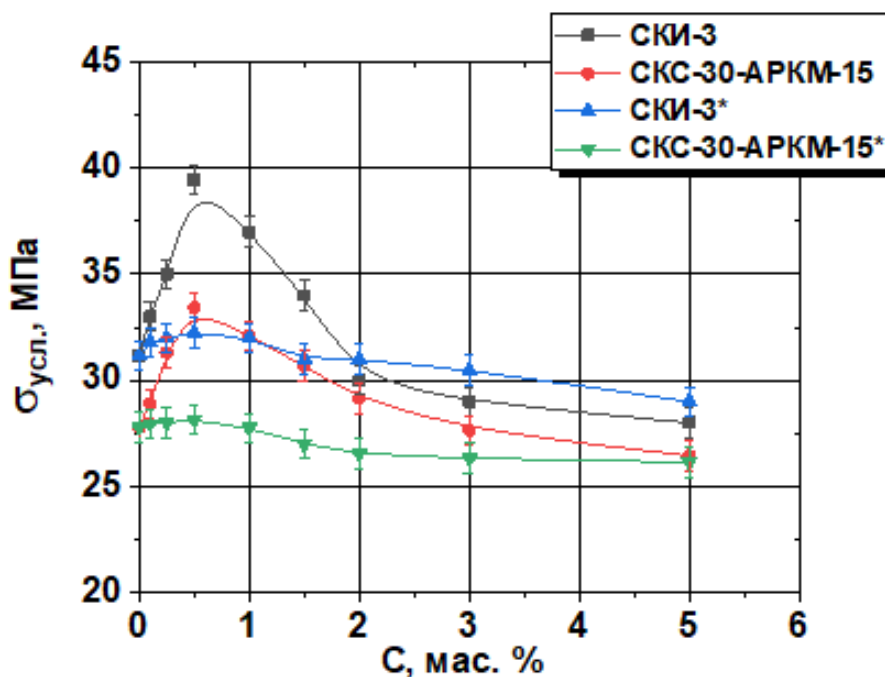


Рисунок 3 - Зависимость условной прочности от концентрации для SKI-3 с расположением УНТ параллельно направлению одноосного растяжения, SKI-3\* с расположением УНТ перпендикулярно направлению одноосного растяжения. Испытания проведены при температуре 22 °С

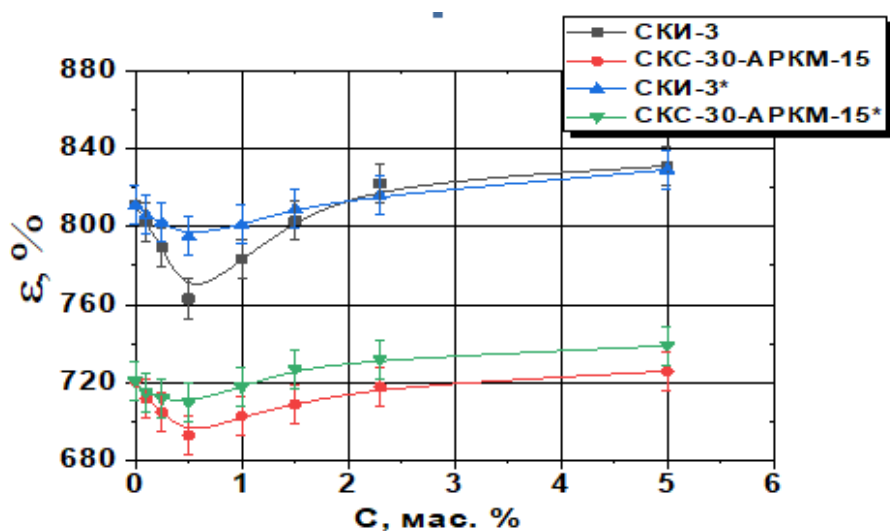


Рисунок 4 - Зависимость относительного удлинения от концентрации для SKI-3 с расположением УНТ параллельно направлению одноосного растяжения, SKI-3\* с расположением УНТ перпендикулярно направлению одноосного растяжения. Испытания проведены при температуре 22 °С

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. В.М. Сутягин, Л.И. Бондалетова Химия и физика полимеров. Томск: ТПУ, 2003. 90 с.
2. Sangwichien C, Sumanatrakool P, Patarapaiboolchai O. Effect of filler loading on curing characteristics and mechanical properties of thermoplastic vulcanizate. Chiang Mai J. Sci. 2008; 35(1): 141-149.

3. Mujkanović A, Vasiljević L, Ostojić G. Non-black fillers for elastomers. TMT 2009: 13th International Research/Expert Conference “Trends in the Development of Machinery and Associated Technology”, TMT 2009, 16 – 21 October 2009, Hammamet, Tunisia: 2009. p.865–868.
4. Vinod VS, Varghese S, Kuriakose B. Degradation behaviour of natural rubber-aluminium powder composites: effect of heat, ozone and high energy radiation. *Polymer Degradation and Stability*. 2002; 75(3): 405-412. DOI: 10.1016/S0141-3910(01)00228-2
5. Kailashiya J, Singha N, Singh KS, Agrawal V, Dash D. Graphene oxide-based biosensor for detection of platelet-derived microparticles: A potential tool for thrombus risk identification. *Biosensors and Bioelectronics*. 2015; 65: 274-280. DOI: 10.1016/j.bios.2014.10.056.
6. Chen Y, Peng Z, Kong LX, Huang MF, Li PW. Natural rubber nanocomposites reinforced with nano silica. *Polymer Engineering and Science*. 2008; 48(9): 1674-1677. DOI:10.1002/pen.20997.

Д.А. Сафронов, В.В. Мишин  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Санкт-Петербург, Россия, gwagen0@gmail.com

## **ОЦЕНКА УРОВНЯ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ИСПЫТАНИЯХ НА ТЕРМИЧЕСКУЮ УСТАЛОСТЬ В ОБРАЗЦАХ КОРСЕТНОЙ ФОРМЫ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ МЕТОДОМ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ИЗ ТИТАНОВОЙ МЕТАЛЛОПОРОШКОВОЙ КОМПОЗИЦИИ МАРКИ ВТ6**

### **Аннотация**

В работе выполнен анализ процесса изготовления цилиндрических и корсетных образцов методом селективного лазерного плавления (SLM), предназначенных для выполнения экспериментальных исследований и оценочных расчётов уровня пластической деформации в полуциклах испытаний на термическую усталость. Рассмотрена методика снятия полей распределения температуры в корсетном образце при нагреве до максимальной температуры цикла испытания. Приведены результаты расчётов уровня пластической деформации в рабочей части корсетного образца из титановой металло-порошковой композиции (МПК) марки ВТ6. Создана конечно-элементная модель испытаний корсетного образца для её дальнейшей верификации исходя из экспериментальных данных.

*Ключевые слова:* аддитивные технологии, термическая усталость, порошковая металлургия, селективное лазерное плавление.

### **Введение**

Применение аддитивных технологий (АТ) при разработке новых изделий в машиностроении позволяет существенно сократить сроки проведения НИОКР и, как следствие, вывод нового продукта на рынок, за счёт выполнения прототипирования, макетирования и оперативной доработки технологичности изготовления сборочных единиц изделия.

Выбор титана в качестве конструкционного материала для изготовления деталей методами АТ, работающих в условиях циклических теплосмен и сложного напряженно-деформированного состояния, обуславливается высокой удельной прочностью, жаропрочностью, а также жаростойкостью при температурах эксплуатации до 500 °С [1]. Технологические сложности, вызванные трудностью механической обработки титановых сплавов, можно снизить за счёт минимальных припусков и шероховатости заготовок деталей, изготовленных с применением АТ.

Для оценки долговечности, т.е. числа рабочих циклов с изменением температуры до начала процесса разрушения, деталей, выполняют лабораторные испытания на стойкость к термической усталости с применением образцов корсетной формы, имитирующих деталь с переходным сечением [2]. Данные испытания играют важную роль, когда габаритные размеры изделия, изготавливаемого методами АТ, позволяют разместить в рабочей зоне установки лишь одну деталь с образцами свидетелями, тем самым исключая возможность проведения методов разрушающего контроля и всесторонних испытаний непосредственно на изделии.

### Методы исследования

Для оценки уровня пластической деформации ( $\varepsilon_{пл}$ ) при испытаниях на термическую усталость были изготовлены образцы корсетной формы, а также образцы для проведения механических испытаний на растяжение.

Для этих целей использовали метод селективного лазерного плавления (Selectivelasermelting, SLM) с направлением построения «Z». Были выращены заготовки под образцы прямоугольной и цилиндрической формы из титановой МПК марки ВТ6, которые прошли совместную вакуумную термическую обработку, без отделения от технологической плиты, по следующему термическому режиму:  $T = (640 \pm 10) \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $t = (3,5 \pm 0,1) \text{ ч.}$ ,  $P_{ост} \leq 3 \cdot 10^{-4} \text{ мм рт. ст.}$  При помощи электроэрозионной обработки образцы были отделены от плиты для дальнейшей прецизионной механической обработки. Внешний вид образца корсетной формы приведен на рисунке 1.

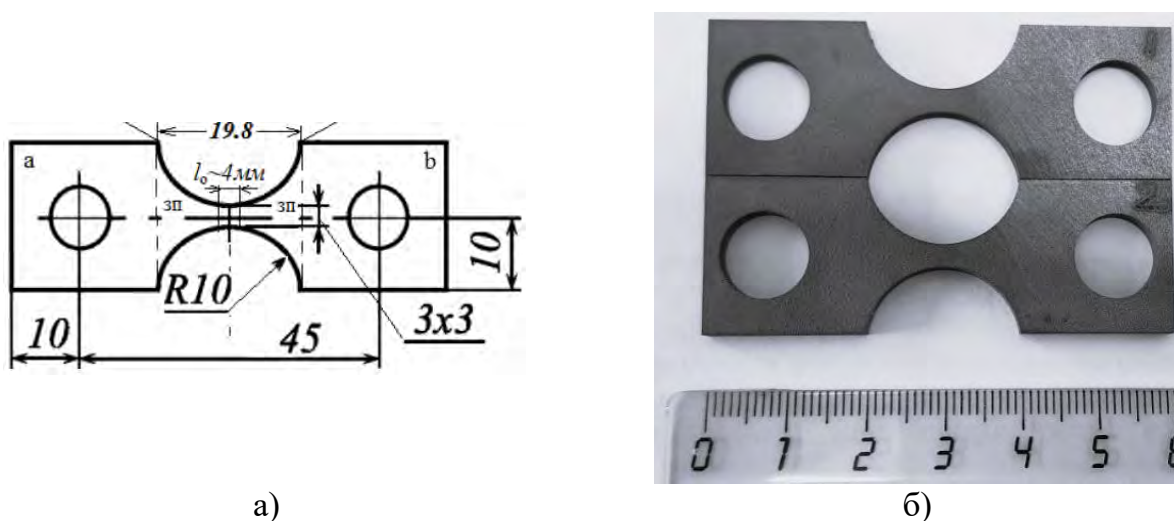


Рисунок 1 – а) эскиз корсетной формы из титановой МПК марки ВТ6;  
б) внешний вид образца корсетной формы из титановой МПК марки ВТ6

Механические испытания серии из трёх цилиндрических образцов, изготовленных совместно с заготовкой для корсетного образца, были выполнены согласно требованиям ГОСТ 1497-84 «МЕТАЛЛЫ. Методы испытаний на растяжение».

Снятие полей распределения температуры по длине рабочей части образцов корсетной формы было выполнено путём фиксации показаний 9 термопар, приваренных при помощи контактной сварки вдоль продольной оси образца с шагом 2 мм. Нагрев осуществляли по показаниям термопары, установленной в центральной зоне образца до температур 100, 200, 300 и 400 °С, соответственно.

Расчёт пластической деформации, возникающей в рабочей части корсетного образца, испытывающего упругое стеснение, за счёт жесткой фиксации в отверстиях заплечиков, при последовательном нагреве до 100, 200, 300 и 400 °С, выполнен по методикам, изложенным в работах [4,5]. Так, величина пластической деформации (1), находится как разность между свободным термическим и упругим удлинением, отнесенная к длине рабочей части корсетного образца, составляющая примерно 4 мм ( $l_0$ ).

$$\varepsilon_{пл} = \frac{\Delta l_{своб} - \Delta l_{упр}}{l_0} \quad (1)$$

Свободное термическое удлинение, в свою очередь, вычисляется как произведение коэффициента линейного термического расширения на интервал изменения температуры в цикле испытания (2).

$$\Delta l_{своб} = 2\alpha_{срi}(T_{срi} - T_{min}) \quad (2)$$

Упругое удлинение образца находится согласно формуле (3):

$$\Delta l_{упр} = \sigma_{0,2} * 2hl * \left(\frac{1}{W_i - E_i}\right) \quad (3)$$

### Результаты и их обсуждение

Результаты механических испытаний цилиндрических образцов приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты механических испытаний на растяжение образцов из титановой МПК марки ВТ-6, изготовленных методом SLM в направлении «Z»

№ образца	Предел прочности $\sigma_b$ , МПа	Предел текучести $\sigma_{0,2}$ , МПа	Относительное удлинение $\delta$ , %	Относительное сужение $\Psi$ , %
1	1111	1135	19,8	42,1
2	1022	1021	15,1	50
3	1281	1211	9,3	35,1
Среднее значение	1138	1122	14,73	42,4

Из данных таблицы 1 следует, что значения механических свойств испытанных образцов различаются между собой. Особенно отличаются значения относительного сужения и удлинения, несмотря на тот факт, что данные образцы были изготовлены вместе, в рамках одного процесса построения, что может быть обусловлено различным расположением в рабочей зоне установки и, как следствие, различающимися условиями обдува инертным газом в процессе выращивания, оказывающим влияние на остаточную пористость и зоны с нерасплавленными частицами порошка.

Согласно данным [1] для образцов из сплава ВТ6, полученных методом литья, гарантируемые механические свойства находятся на уровне:  $\sigma_b = 882$  МПа,  $\sigma_{0,2} = 804$  МПа,  $\delta = 5\%$ . В сравнении с параметрами сплава ВТ6, полученного методом литья, аддитивные образцы демонстрируют более высокие значения относительного удлинения  $\delta$  и относительного сужения  $\Psi$ , что положительно сказывается на эксплуатационных характеристиках изделий.

Поля распределения температур на данном образце, полученные по результатам испытаний, приведены на рисунке 2.

Для выполнения расчёта, согласно методике, изложенной выше, рабочая длина образца ( $l$ ) была разбита на фрагменты длиной 2 мм, непосредственно на которых

осуществляли фиксацию температуры ( $T_i$ ). В рамках каждого из фрагментов (по длине и поперечному сечению) значения параметров  $\sigma_{0,2}$ ,  $E$ ,  $\alpha$  принимались неизменными. При расчёте деформации для максимальной температуры цикла, достигаемой в центральной части корсетного образца, имеющей наименьшее поперечное сечение, подставляли значения параметров для температуры, соответствующей температуре  $i$ -го сегмента, учитывая поля распределения температур вдоль рабочей части корсетного образца. Результаты деформационного расчёта приведены в таблице 3.

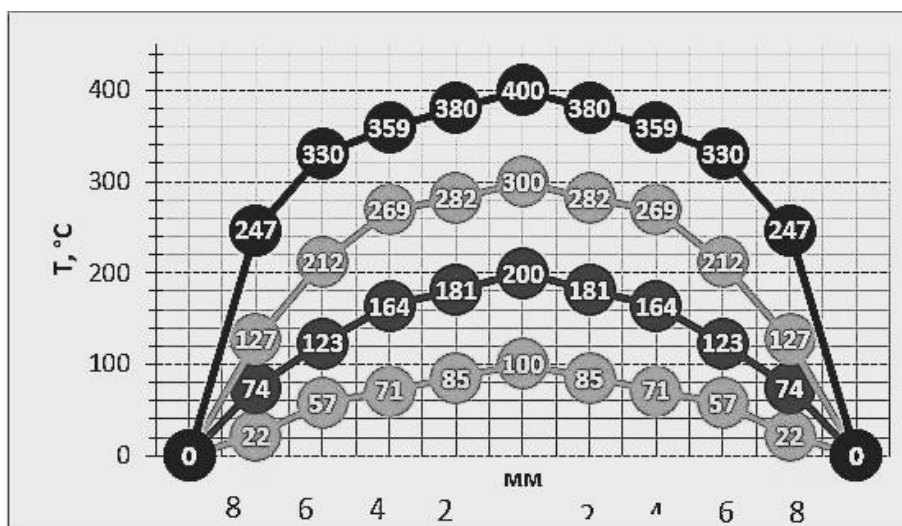


Рисунок 2 – Распределение температур по длине корсетного образца из МПК марки ВТ-6, изготовленного методом SLM при нагреве по различным режимам, полученные по результатам эксперимента

Таблица 3 – Уровень пластической деформации в корсетном образце из титановой МПК марки ВТ6 при достижении максимальной температуры цикла испытания на термическую усталость

Цикл испытания ( $T_{\min} \leftrightarrow T_{\max}$ )	20-100 °C	20-200 °C	20-300 °C	20-400 °C
Значение пластической деформации ( $\epsilon_{пл}$ )	$\epsilon_{пл}=0,23\%$	$\epsilon_{пл}=1,66\%$	$\epsilon_{пл}=2,19\%$	$\epsilon_{пл}=4,24\%$

Из анализа данных, полученных в результате расчёта (таблица 3) следует, что в образце корсетной формы, изготовленном методом SLM, при достижении максимальной температуры полцикла испытания на термическую усталость, близкой к максимальной рабочей температуре сплава ВТ6 (500 °C), развивается существенная пластическая деформация, составляющая  $\epsilon_{пл}=4,24\%$ . Так, согласно данным [5], в никелевом жаропрочном сплаве ЖС32 при максимальной температуре цикла для данного сплава  $\epsilon_{пл}=5,6\%$ .

Исходя из этого, в программу всесторонних испытаний деталей необходимо включать испытания на термическую усталость с применением образцов корсетной формы, изготовленных совместно с деталью. При этом, данные о стойкости корсетных образцов к термической усталости необходимо учитывать при выполнении прочностных расчётов деталей.

Для выполнения наиболее точной оценки уровня деформации и напряжений, возникающих как в детали, так и в образце-имитаторе, необходимо применять моделирование методом конечных элементов (МКМ), которое позволяет установить

как распределение температуры по всей длине модели, так и уровень деформации по всему объему, исключив тем самым условные ограничения при выполнении прочностного расчёта. На данный момент создана конечно-элементная модель испытаний корсетного образца в пакете Deform-3D. Данная модель, после прохождения процедуры верификации относительно экспериментальных данных, позволит выполнить детальную оценку напряженно-деформированного состояния в процессе нагрева образцов и сопоставить полученные данные с результатами данной работы.

### **Выводы**

В результате экспериментальных исследований и расчётов установлено, что в образце корсетной формы, изготовленного методом SLM, уровень пластической деформации достигает  $\varepsilon_{пл}=4,24\%$ , при нагреве до температур, близких к максимальной рабочей температуре сплава, что позволяет рекомендовать применение образцов корсетной формы для оценки уровня пластической деформации в «опасных зонах» реальных изделий, изготовленных методами аддитивных технологий.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Илларионов, А. Г. Технологические и эксплуатационные свойства титановых сплавов: учебное пособие / А. Г. Илларионов, А. А. Попов. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2014. – 137 с.;
2. Выбор методики лабораторных термоциклических испытаний защитных покрытий для лопаток турбин, работающих в условиях термической усталости / С. П. Дегтярева, Д. А. Сафронов, Е. А. Тихомирова, А. А. Живушкин // Климовские чтения - 2021: перспективные направления развития авиадвигателестроения : СБОРНИК СТАТЕЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ, Санкт-Петербург, 26 октября 2021 года. – Санкт-Петербург: ООО "Скифия-принт", 2021. – С. 23-31;
3. Гецов Л. Б., Рыбников А. И., Семенов А. С., Григорьев А.В., Тихомирова Е.А. Сопротивление деформированию и разрушению монокристаллических сплавов при статическом и термоциклическом нагружении. / Надежность и безопасность энергетики. 2012, No18, с.53–62;
4. Серенсен С. В., Котов П. И. Об оценке сопротивления термической усталости по методу варьируемой жесткости нагружения // Заводская лаборатория Серенсен С. В., Котов П. И. Об оценке сопротивления термической усталости по методу варьируемой жесткости нагружения // Заводская лаборатория. – 1962. – Т.28, No10. – С.1233–1238;
5. Дегтярева С. П. Термоциклические испытания с применением образцов корсетной формы - перспективный метод исследования термической усталости изделий / С. П. Дегтярева // Вопросы материаловедения. – 2020. – № 3(103). – С. 61-69.



С.Н. Кутепов, Д.С. Клементьев  
Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого,  
Тула, Россия, [kutepov.sergei@mail.ru](mailto:kutepov.sergei@mail.ru)

## **ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА СТОЙКОСТЬ АРМАТУРНЫХ СТАЛЕЙ К ВОДОРОДНОМУ РАСТРЕСКИВАНИЮ**

### **Аннотация**

В статье проанализировано влияние режимов высокотемпературной термомеханической и термической обработки на сопротивляемость арматурной стали водородному растрескиванию. На основе полученных результатов найдены оптимальные режимы термической обработки сталей, относящихся к классу прочности Ат800 позволяющие повысить стойкость стали к растрескиванию в водородсодержащих средах.

*Ключевые слова:* закалка, отпуск, высокопрочная сталь, водородное растрескивание.

### **Введение**

Выпускаемая в настоящее время металлургической промышленностью термически упрочненная с прокатного нагрева и горячекатаная стержневая арматура класса Ат800, Ат1000 и А800 из малоуглеродистой низколегированной стали в состоянии поставки имеет высокую склонность к растрескиванию в водородсодержащих средах, что резко сокращает эффект от ее применения в промышленных масштабах [1-3]. На длительную прочность таких сталей большое влияние оказывает микроструктура, формируемая в процессе прокатки и последующей термической обработки. Влияние микроструктуры обусловлено свойствами матрицы стали и особенностями строения карбидной фазы. К факторам, влияющим на свойства матрицы можно отнести размер зерна, тип микроструктуры и кристаллической решетки, внутренние структурные напряжения. С точки зрения микроструктуры, чувствительность материала к водородному растрескиванию (ВР) повышается в следующем порядке: нижний бейнит → закаленный и отпущенный мартенсит → перлит или сфероидизированные структуры → мартенсит [4].

Термомеханическое упрочнение стержневой арматуры в потоке мелкосортных станов с прерывистым охлаждением позволяет повысить на 20...30% пластические характеристики и сопротивляемость повторным нагревам при сохранении заданного уровня прочности. Получаемая таким способом арматура признана высокоэффективной продукцией, надежной при использовании в строительных конструкциях [5]. Однако несмотря на то, что такая обработка способствует получению продукции с высокими физико-механическими характеристиками, она не устраняет проблему снижения чувствительности стали к ВР.

Использование дополнительной термической обработки (например, повторного отпуска) позволяет существенно снизить чувствительность стали к растрескиванию. Так по данным работы [6] стойкость стали к коррозионному растрескиванию под напряжением при различных температурах отпуска существенно зависит от ее химического состава и комплекса физико-механических характеристик. Начальное повышение температуры отпуска способствует снижению чувствительности к

растрескиванию; затем по достижении определенной температуры чувствительность несколько возрастает; дальнейшее повышение температуры отпуска приводит к значительному снижению чувствительности к растрескиванию.

В связи с этим, для каждой марки стали необходимо экспериментально подбирать оптимальные режимы термообработки, обеспечивающие высокие значения физико-механических характеристик и минимальную чувствительность к растрескиванию в агрессивных средах.

Цель настоящей работы – исследование влияния режимов термической обработки и температуры отпуска на сопротивляемость высокопрочных арматурных сталей ВР.

## Методы

Для исследования влияния режимов термической обработки и температуры отпуска на стойкость стали против ВР были выбраны стали марок Ст.5, 30ГСТ и 35ГС. Химический состав исследуемых марок сталей приведен в таблице 1.

Таблица 1 – Химический состав исследованных марок сталей

Марка стали	Содержание элементов, % (масс)									
	C	Si	Mn	Cr	S	P	Cu	Ni	As	Ti
Ст.5	0,31	0,12	0,71	0,25	0,020	0,040	0,25	0,25	0,08	–
30ГСТ	0,29	0,90	1,10	–	0,030	0,030	–	–	–	0,370
35ГС	0,34	0,75	1,38	–	0,018	0,020	–	–	–	–

На натуральных образцах ( $l = 400$  мм;  $\varnothing 12$  и  $\varnothing 14$  мм) стержневой арматуры периодического профиля исследовали влияние вида и режимов термической обработки на стойкость стали к ВР. Рабочая часть образца составляла 100 мм. Стойкость стали против ВР оценивали временем до разрушения по результатам испытаний 4-6 образцов на каждую экспериментальную точку графика. Для создания условий эксперимента, максимально приближенных к эксплуатационным, испытания проводили в водном растворе серной кислоты с добавлением роданистого аммония ( $4,5\% \text{H}_2\text{SO}_4 + 2,5\% \text{NH}_4\text{CNS}$ ) при комнатной температуре с катодной поляризацией  $j_K = 60 \text{ A/m}^2$  и рабочих напряжениях  $\sigma_{\text{Э}} = 0,6\sigma_{\text{В}}$ .

## Результаты и их обсуждение

Термообработку образцов стали Ст.5 проводили в электропечах сопротивления. Режимы обработки и механические характеристики приведены в таблице 2. Дополнительная термообработка может повысить прочностные характеристики стали марки Ст.5, но с их повышением резко снижается стойкость против ВР.

Анализ полученных результатов показал, что, наибольшую стойкость к ВР имеет сталь после закалки и отпуска при температуре отпуска  $550...600$  °С. Ее прочность при этом соответствует классу Ат500С. При прочности, соответствующей классу Ат600 (этот уровень получается для стали Ст.5 при режимах обработки № 1 и № 4 (см. табл. 2) стойкость против ВР примерно в 20 раз ниже, а при режимах обработки № 5 и № 6 (класс прочности Ат1000 и Ат1200) происходит дальнейшее снижение стойкости еще во столько же раз. Наименьшую стойкость показывает сталь, отпущенная при температуре  $300...350$  °С. Из приведенных данных следует, что чувствительность стали к ВР, определяется не только структурой и степенью ее

стабилизации, но и уровнем прочности и пластичности. Установлено, что чем ниже прочность и выше пластичность, тем ниже чувствительность стали к ВР.

Таблица 2 – Термическая обработка, механические свойства и стойкость против водородного растрескивания стали марки Ст.5

№ п/п	Марка стали, D (мм)	Режим термообработки	Механические характеристики			Время до разрушения, час при $\sigma_{\text{Э}} = 0,6\sigma_{\text{В}}$
			$\sigma_{\text{В}}$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta_5$ , %	
1	Ст.5, Ø14	ВТМО*	800	610	14	0,25
2		ВТМО + закалка от 900 °С в воду + отпуск при 300 °С	1460	1350	5,7	0,33
3		ВТМО + закалка от 900 °С в воду + отпуск при 350 °С	1180	1100	7,1	0,67
4		ВТМО + закалка от 900 °С в воду + отпуск при 450 °С	868	762	15,1	0,25
5		ВТМО + закалка от 900 °С в воду + отпуск при 550 °С	735	627	16,8	330**
6		ВТМО + закалка от 900 °С в воду + отпуск при 600 °С	610	480	25	330**

Примечание: \* термическое упрочнение с прокатного нагрева; \*\* образец не разрушился.

Для уточнения особенностей изменения стойкости против ВР при различных температурах отпуска проведены дополнительные исследования сталей марок 30ГСТ и 35ГС. Режимы термообработки и механические характеристики сталей приведены в таблице 3. Для определения оптимальных режимов термообработки стали марки 30ГСТ изменяли температуру закалки в пределах 900...1100 °С и температуру отпуска в пределах 350...600 °С с интервалом в 50 °С, а для стали 35ГС изменяли температуру закалки в пределах 850...950 °С и температуру отпуска в пределах 400...550 °С. Для трех партий исследуемых образцов стали марки 30ГСТ были определены следующие режимы термообработки: 1) температура закалки 900 °С, охлаждение в воде + отпуск 350...600 °С; 2) температура закалки 1050 °С, охлаждение в воде + отпуск 350...600 °С; 3) температура закалки 900...1100 °С, охлаждение в воде + отпуск при 500 °С.

Результаты проведенных исследований показали (табл. 3), что термообработкой с электронагрева стали 30ГСТ, можно получить пределы прочности и текучести на уровне классов Ат600 и Ат800, стали 35ГС на уровне Ат600 и Ат1200. При этом ни один из рассмотренных вариантов термообработки не соответствовал классу прочности по относительному удлинению. На основе полученных данных можно утверждать, что низкие характеристики пластичности привели к повышенной чувствительности к ВР.

Такие результаты приводят к выводу о том, что сопротивляемость структуры хрупкому разрушению играет значительную роль при ВР. Несмотря на это анализ полученных результатов (табл. 3) показывает, что общая тенденция увеличения стойкости к ВР исследованных сталей с увеличением температуры отпуска сохраняется. Из полученных результатов следует, что (см. табл. 3) наибольшую стойкость против ВР имеют образцы, подвергшиеся высокому отпуску. Кроме этого,

следует отметить, что на время до разрушения оказывает влияние не только температура отпуска, но и температура закалки. Так из анализа рисунков 3, 4 видно, что наибольшее время до разрушения для стали 30ГСТ имеет место при  $T_{\text{зак}} = 950 \dots 1000 \text{ } ^\circ\text{C}$  и  $T_{\text{отп}} = 500 \text{ } ^\circ\text{C}$ , а для стали 35ГС при  $T_{\text{зак}} = 900 \text{ } ^\circ\text{C}$  и  $T_{\text{отп}} = 550 \text{ } ^\circ\text{C}$ .

Таблица 3 – Термическая обработка, механические свойства и стойкость против водородного растрескивания сталей марок 30ГСТ и 35ГС

№ п/п	Марка стали, D (мм)	Вид термообработки		Механические характеристики			Время до разрушения, час при $\sigma_{\text{Э}} = 0,6\sigma_{\text{В}}$
		Температура закалка, $^\circ\text{C}$	Температура отпуска, $^\circ\text{C}$	$\sigma_{\text{В}}$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta_5$ , %	
1	30ГСТ, Ø14	1050	350	1100	815	3,6	1,17
2			400	1170	905	3,0	1,60
3			450	860	700	6,0	0,92
4			500	930	800	3,6	1,70
5			550	1000	860	3,0	1,62
6			600	820	680	6,0	3,38
7		900	350	1110	865	2,0	0,75
8			400	1120	905	1,8	1
9			450	1160	920	1,6	1,17
10			500	1010	900	3,0	1,33
11			550	930	765	3,6	1,42
12			600	900	805	3,8	1,5
13		850	500	1010	905	2,6	1,25
14		900		1010	900	3,0	1,5
15		950		1130	920	2,0	2
16		1000		990	820	3,8	2,33
17		1100		960	830	5,4	1,25
18	35ГС, Ø14	850	550	1000	890	3,0	1,08
19		900		910	760	3,5	1,20
20		950	400	1460	1300	2,0	1,42

Исходя из анализа полученных результатов следует что, в качестве оптимального режима, при котором сталь имеет высокие механические характеристики и наименьшую чувствительность к ВР является режим: закалка  $900 \text{ } ^\circ\text{C}$  с охлаждением в воде + отпуск при  $500 \text{ } ^\circ\text{C}$ .

Для определения сравнительной стойкости исследуемых сталей в растворах электролитов, вызывающих наводороживание после термообработки при оптимальных режимах провели их испытание на длительную прочность при трех уровнях растягивающего напряжения  $\sigma_{\text{Э}} = (0,8; 0,7; 0,4)\sigma_{\text{В}}$ . Диаметр испытываемых образцов составил Ø14 мм. Механические свойства и стойкость против ВР сталей после термообработки приведены в таблице 4.

Из анализа полученных результатов (табл. 4) видно, что наибольшей стойкостью против ВР при всех уровнях приложенных напряжений обладает сталь 30ГСТ. Анализ данных приведенных в таблице 3 показывает, что оптимальные режимы термообработки обеспечивают практически одинаковый уровень прочности исследуемых сталей.

Таблица 4 –Механические свойства сталей Ст.5, 30ГСТ и 35ГС при оптимальных режимах термообработки

№ п/п	Марка стали	Механические характеристики			Время до разрушения, час при $\sigma_{\text{Э}}$		
		$\sigma_{\text{В}}$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta_5$ , %	$0,8\sigma_{\text{В}}$	$0,7\sigma_{\text{В}}$	$0,4\sigma_{\text{В}}$
1	Ст.5	1060	980	1,5	2,83	20	33,58
2	30ГСТ	1020	930	2,8	1,67	7,17	8,75
3	35ГС	1100	1000	2,2	1,37	8,33	14,17

Исходя из приведенных результатов видно, что при использовании закалки с отпуском или закалки с двойным отпуском можно получить комплекс высоких механических и коррозионных свойств. Так, например, при термообработке стали 35ГС по режиму №5 ее прочностные свойства полностью соответствуют классу Ат800 и имеет сопротивляемость ВР примерно на два порядка выше, чем при традиционной термической обработке. Из этого следует, что, применяя подобные режимы термообработки на сталях других марок можно также повысить их стойкость против ВР.

### Заключение

По результатам проведенных исследований определена стойкость арматурных сталей марок Ст. 5; 30ГСТ; 35ГС против водородного растрескивания и определены оптимальные режимы их термической обработки.

Показано, что повышение стойкости при указанных режимах термической обработки достигается за счет получения более равновесной и мелкодисперсной микроструктуры, фазовых и структурных составляющих.

На основе корреляционно-регрессионного и кластерного анализов предложена концепция цифровой классификации титановых сплавов, которая позволяет определить класс сплава в зависимости от эквивалентов по алюминию и молибдену с использованием разработанного пакета прикладных программ.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сергеев, Н. Н. Водородное охрупчивание и растрескивание высокопрочной арматурной стали: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.16.01 / Сергеев Николай Николаевич. Тула, 1975. 27 с.
2. Кустов, Б.А. О природе разрушений высокопрочной термически упроченной арматурной стали / Б.А. Кустов, Н.В. Пушница., Е.Д. Демченко, А.Г. Клепиков, И.Л. Федорова // Сталь. - 1994. - № 6. - С. 69-74.
3. Черненко, В.Т. Водородное охрупчивание высокопрочной низкоуглеродистой кремнемарганцовистой арматурной стали / В.Т. Черненко, О.Г. Сидоренко, И.П. Федорова, В.А. Миронов, Е.М. Демченко // Сталь. - 1988. - № 6. - С. 85-89.
4. Lynch, S.P. Chapter 2: Hydrogen embrittlement (HE) phenomena and mechanisms / S.P. Lynch // Stress Corrosion Cracking. WoodheadPublishingLimited, 2011. - P. 90-130.
5. Барадынцева, Е.П. Влияние водорода на пластические свойства арматурного проката / Е.П. Барадынцева, Н.А. Глазунова, С.В. Стефанович, О.В. Роговцова // Литье и металлургия. - 2013. - № 3S (72). - С. 179-183.
6. Ажогин, Ф.Ф. Коррозионное растрескивание и защита высокопрочных сталей Ф.Ф. Ажогин. - М.: Металлургия, 1974. - 256 с.

С.С.Кустов<sup>1</sup>, С.С.Михалев<sup>1</sup>, Ю.Б. Егорова<sup>1</sup>, А.В. Челпанов<sup>1</sup>, Л.В.Давыденко<sup>2</sup>  
<sup>1</sup>Московский авиационный институт, Москва, Россия, [mati\\_dekanat14@mail.ru](mailto:mati_dekanat14@mail.ru)  
<sup>2</sup>Московский политехнический университет, Москва, Россия

## РАЗРАБОТКА ЦИФРОВОЙ КЛАССИФИКАЦИИ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ЭКВИВАЛЕНТОВ ПО АЛЮМИНИЮ И МОЛИБДЕНУ

### Аннотация

В работе изложены современные представления о традиционных и перспективных видах классификации титановых сплавов по фазовому составу в отожженном состоянии. На основе кластерного анализа проведено сопоставление химического состава сплавов по эквивалентам легирующих элементов и примесей по алюминию и молибдену. Предложена концепция цифровой классификации на основе корреляционно-регрессионного и кластерного анализов.

*Ключевые слова:* титановые сплавы, классификация, фазовый и химический состав, кластерный анализ, регрессионный анализ

### Введение

В последние годы активно развивается такое перспективное направление в науке о материалах, как информационное материаловедение. В частности, оно связано с прогнозированием свойств, оптимизацией состава существующих сплавов и моделированием новых материалов с заданными физико-механическими свойствами на основе информационных технологий.

Создание новых материалов традиционными способами требует проведения фундаментальных научных исследований, связанных с изучением влияния состава, структуры, режимов обработки давлением, термической обработки и других технологических операций на конечные свойства полуфабриката или изделия. Вместе с тем объем научных сведений, накопленных к настоящему времени, позволяет перейти на новый уровень проведения исследований — информационный или цифровой.

Применительно к титановым сплавам под цифровой классификацией может пониматься, по нашему мнению, результат реализации компьютерных программ, основанных на современных методах статистического анализа зависимостей типа «химический состав – фазовый состав – класс сплава», «химический состав – фазовый состав – свойства – класс сплава» и т.п. Одним из возможных методов для разработки компьютерных программ является комплексное исследование, основанное на корреляционном, регрессионном и кластерном анализе.

В настоящее время наиболее распространена классификация по фазовому составу в отожженном состоянии [1-4], которая включает в себя:

1.  $\alpha$ -сплавы, структура которых представлена  $\alpha$ -фазой.
2. Псевдо  $\alpha$ -сплавы, структура которых представлена  $\alpha$ -фазой и небольшим количеством  $\beta$ -фазы (не более 5 %) или интерметаллидов.
3.  $\alpha+\beta$ -сплавы, структура которых представлена  $\alpha$ - и  $\beta$ -фазами (5-50%  $\beta$ -фазы); сплавы этого типа также могут содержать небольшое количество интерметаллидов.
4. Сплавы переходного класса, которые по структуре и протекающим в них превращениям занимают промежуточное положение между  $\alpha+\beta$ - и псевдо  $\beta$ -

сплавами. В отожженном состоянии сплавы переходного класса содержат 50-60%  $\beta$ -фазы.

5. Псевдо  $\beta$ -сплавы со структурой, представленной в отожженном состоянии  $\beta$ -фазой (>65-70%) и небольшим количеством  $\alpha$ -фазы.

6.  $\beta$ -сплавы, структура которых представлена термодинамически стабильной  $\beta$ -фазой.

Для интегральной количественной характеристики сплавов по химическому и фазовому составу были введены понятия коэффициента  $\beta$ -стабилизации  $k_\beta$  и эквивалента молибдену  $[Mo]_{\text{экв}}^{\text{cmp}}$  [1-3]:

$$[Mo]_{\text{экв}}^{\text{cmp}} = \%Mo + \%Ta / 4,5 + \%Nb/3,3 + \%W/2 + \%V/1,4 + \%Cr/0,6 + \%Mn/0,6 + \%Fe/0,4 + \%Ni/0,8, \quad (1)$$

$$k_\beta = [Mo]_{\text{экв}}^{\text{cmp}} / 11. \quad (2)$$

Эквивалент по молибдену и коэффициент  $\beta$ -стабилизации характеризуют близость сплава ко второй критической концентрации  $\beta$ -стабилизаторов, начиная с которой при закалке из  $\beta$ -области подавляется мартенситное превращение и фиксируется метастабильная  $\beta$ -фаза (с  $\omega$ -состоянием внутри нее):

$$k_\beta = \frac{C_{\beta i}}{C_{i \text{кр}}} \quad (3)$$

где  $C_{\beta i}$  – содержание  $\beta$ -стабилизатора в сплаве,  $C_{i \text{кр}}$  – вторая критическая концентрация  $\beta$ -стабилизатора. Вторая критическая концентрация в перерасчете на коэффициент  $\beta$ -стабилизации приблизительно равна 1,0, а эквивалент по молибдену ~ 11%.

Коэффициент  $\beta$ -стабилизации и эквивалент по молибдену дают лишь приближенную оценку  $\beta$ -стабилизации титановых сплавов, так как не учитывают влияние  $\alpha$ -стабилизаторов и нейтральных упрочнителей. Для этого было введено понятие об эквиваленте по алюминию, который характеризует возможность образования  $\alpha_2$ -фазы и термическую стабильность сплавов [1-3]:

$$[Al]_{\text{экв}}^{\text{cmp}} = \%Al + \%Sn/3 + \%Zr/6 + 10[\%O + \%C + 2\%N], \quad (4)$$

Приведенная выше классификация титановых сплавов по фазовому составу не позволяет однозначно определить класс сплава в зависимости от эквивалентов по алюминию и молибдену. Это связано с тем, что алюминий и нейтральные упрочнители в больших концентрациях стабилизируют  $\beta$ -фазу и повышают ее количество, а при  $[Al]_{\text{экв}}^{\text{cmp}} \approx 2,0 \div 6,0\%$  наблюдается сдвиг фазовых границ классов в сторону больших концентраций  $\beta$ -стабилизаторов [5-7].

Цель работы состояла в создании пакета прикладных программ для цифровой классификации титановых сплавов по фазовому составу в зависимости от эквивалентов по алюминию и молибдену. Для этого необходимо было статистически обосновать границы, разделяющие разные классы титановых сплавов и разработать

методы идентификации класса сплава в зависимости от эквивалентов по алюминию и молибдену.

### Методы

Были обобщены литературные данные по химическому и фазовому составу промышленных отечественных и зарубежных сплавов. В качестве литературных источников были использованы отечественные справочники и монографии [1, 8-11], а также уникальное по объему собранной информации американское издание [12]. Для расчета эквивалентов по алюминию и молибдену по формулам (1) и (4) использовали средний марочный состав 140 сплавов. Статистический анализ (корреляционно-регрессионный и кластерный) проводили с помощью пакета прикладных программ Statistica компании StatSoft. Исследуемыми факторами послужили: структурные эквиваленты по алюминию и молибдену, количество (объемная доля)  $\alpha$ - и  $\beta$ -фаз в отожженном состоянии, класс сплава в кодированном виде: 1 –  $\alpha$ -сплавы, 2 – псевдо  $\alpha$ -сплавы, 3 –  $\alpha+\beta$ -сплавы, 4 –  $\alpha+\beta$ -сплавы переходного класса, 5 – псевдо  $\beta$ -сплавы, 6 –  $\beta$ -сплавы.

Для разработки пакета прикладных программ использован язык программирования C++, фреймворк Qt, IDEQtCreator 6.0.2, для отладки расчетных модулей среда MicrosoftVisualStudio 2019.

### Результаты и обсуждение

Для структурирования исходных данных на первом этапе был использован метод кластерного анализа, который предназначен для разбиения множества объектов (сплавов) на заданное число кластеров на основании классификационных признаков (эквивалентов по алюминию и молибдену и количества  $\beta$ -фазы). На этой основе была проведена сортировка сплавов по классам и уточнены интервалы изменения эквивалентов по алюминию и молибдену в зависимости от номера кластера (табл. 1).

Таблица 1 - Классификация титановых сплавов по фазовому составу в отожженном состоянии на основе кластерного анализа

Номер кластера Класс сплава	Количество $\beta$ -фазы, %, после отжига	$[Mo]_{\text{экв}}^{\text{стр}}, \%$	$[Al]_{\text{экв}}^{\text{стр}}, \%$
1. $\alpha$ -сплавы	<1	~0,3	~1,0÷9,0
		<1,3	~1,0÷4,0
2. Псевдо $\alpha$ -сплавы	<5	~1,0 - 2,5	~1,0÷6,0
		~0,5÷1,0	~6,0÷10,0
3. $\alpha+\beta$ -сплавы	5-50	~2,5-9,0	~1,0÷9,0
4. Переходные сплавы	50-60	~8,0-10,0	~4,0÷7,0
		~10,0-13,0	~1,0÷6,0
5. Псевдо $\beta$ -сплавы	$\geq 60 \div 70$	~12,0-30,0	~1,0÷6,0
6. $\beta$ -сплавы	100	>30	~1,0÷6,0

На основе проведенного кластерного и регрессионного анализа были статистически обоснованы границы, разделяющие разные классы титановых сплавов, и разработан пакет прикладных программ «Титановые сплавы: цифровая классификация», позволяющий определить класс сплава по эквивалентам с учетом граничных условий, приведенных в табл. 2.



На рис. 1 визуализированы результаты программирования (цифровой классификации) в виде классификационной диаграммы титановых сплавов в координатах «эквивалент по алюминию – эквивалент по молибдену» со статистически подтвержденными границами раздела областей существования  $\alpha$ , псевдо  $\alpha$ -,  $\alpha+\beta$ -сплавов и псевдо  $\beta$ -сплавов.

Таблица 2 - Фазовые границы, разделяющие разные классы титановых сплавов

№	Фазовые границы	Регрессионная модель	Коэффициент корреляции	S*, % по массе
1	$\alpha$ / псевдо $\alpha$	$[Mo]_{\text{экв}}^{\text{cmp}} = 1,0 + 0,315 [Al]_{\text{экв}}^{\text{cmp}} - 0,047 ([Al]_{\text{экв}}^{\text{cmp}})^2$	0,98	0,30
2	псевдо $\alpha$ / $\alpha+\beta$	$[Mo]_{\text{экв}}^{\text{cmp}} = 2,5 + 0,108 [Al]_{\text{экв}}^{\text{cmp}} - 0,015 ([Al]_{\text{экв}}^{\text{cmp}})^2$	0,99	0,50
3	$\alpha+\beta$ / переходный	$[Mo]_{\text{экв}}^{\text{cmp}} = 8,0 + 0,427 [Al]_{\text{экв}}^{\text{cmp}} - 0,053 ([Al]_{\text{экв}}^{\text{cmp}})^2$	0,97	0,50
4	Переходный / псевдо $\beta$	$[Mo]_{\text{экв}}^{\text{cmp}} = 12,0 + 0,427 [Al]_{\text{экв}}^{\text{cmp}} - 0,053 ([Al]_{\text{экв}}^{\text{cmp}})^2$	0,97	0,55
5	Псевдо $\beta$ / $\beta$	$[Mo]_{\text{экв}}^{\text{cmp}} = 30,0 + 0,475 [Al]_{\text{экв}}^{\text{cmp}} - 0,063 ([Al]_{\text{экв}}^{\text{cmp}})^2$	0,97	0,60

Примечание: \* - статистическая ошибка модели.

Верхняя граница, равная  $[Al]_{\text{экв}}^{\text{cmp}}=9\%$ , соответствует условию образования  $\alpha_2$ -фазы. Из рис. 1 следует, что эквивалент по алюминию в промышленных титановых сплавах изменяется от 1 до 9%. При более высоких значениях возможно образование алюминида титана ( $\alpha_2$ -фазы), что приводит к падению пластичности и термической стабильности при температурах эксплуатации.

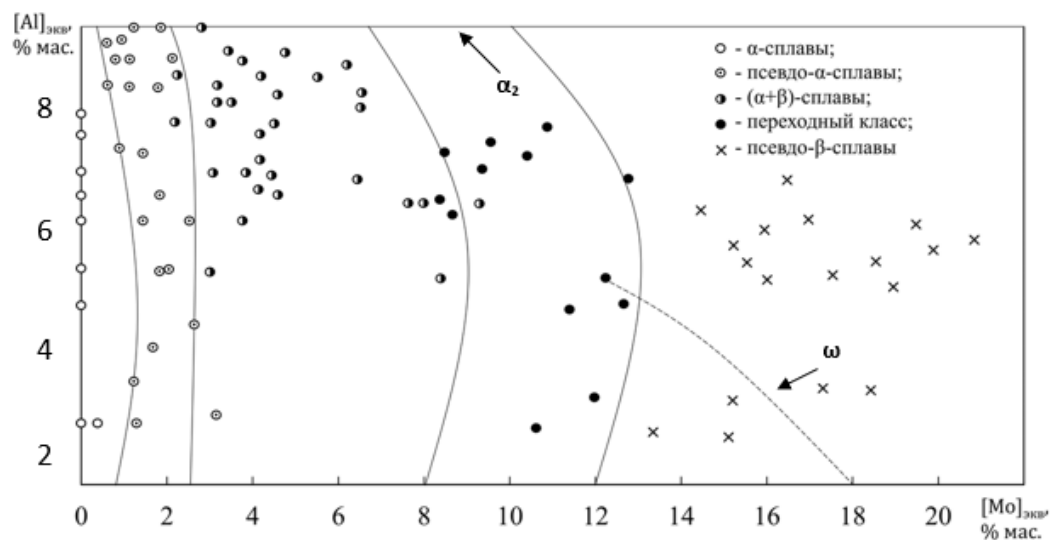


Рисунок 1 – Классификационная диаграмма титановых сплавов в координатах «эквивалент по алюминию – эквивалент по молибдену»:

$\alpha_2$  – линия, свыше которой наблюдается выделение алюминида титана,

$\omega$  – линия, свыше которой подавляется выделение  $\omega$ -фазы

На рис. 1 приведены также фигуративные точки промышленных зарубежных и отечественных сплавов, плотность расположения которых свидетельствует о том, что наибольшее число разработанных сплавов относится к жаропрочным псевдо  $\alpha$ - и  $\alpha+\beta$ -классам с разбросом эквивалентов  $[Al]_{\text{экв}}^{\text{cmp}}=6-9\%$  и  $[Mo]_{\text{экв}}^{\text{cmp}}=1-5\%$ . При этом для  $\alpha+\beta$ - и псевдо  $\beta$ -сплавов наблюдается тенденция к снижению эквивалента по алюминию с увеличением их эквивалента по молибдену.

### Заключение

На основе корреляционно-регрессионного и кластерного анализов предложена концепция цифровой классификации титановых сплавов, которая позволяет определить класс сплава в зависимости от эквивалентов по алюминию и молибдену с использованием разработанного пакета прикладных программ.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ильин, А.А. Титановые сплавы. Состав, структура, свойства. Справочник / А.А. Ильин, Б.А. Колачев, И.С. Полькин. – М.: ВИЛС - МАТИ, 2009.- 520 с.
2. Белов, С.П. Металловедение титана и его сплавов / С.П. Белов, М.Я. Брун, С.Г. Глазунов и др.; под общей редакцией С.Г. Глазунова, Б.А. Колачева. – М.: Металлургия, 1992. - 352 с.
3. Колачев, Б.А. Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов. 4-е изд / Б.А. Колачев, В.И. Елагин, В.А. Ливанов. – М.: МИСИС, 2005. – 432 с.
4. Ильин, А.А. Различные виды классификации отечественных титановых сплавов / А.А. Ильин, Ю.Б. Егорова, С.В. Скворцова, А.М. Мамонов, Н.А. Ночовная, Л.В. Давыденко // Титан. - 2012. - №2 (36). - С.11-18.
5. Воздвиженский, В.М. О форме границ фазовых областей и положение титановых сплавов на квалификационной диаграмме / В.М. Воздвиженский, Б.А. Колачев, М.В. Воздвиженская, Д.В. Рынденков // Металлы. – 2002. - №3. -С.29 - 34.
6. Воздвиженский, В.М. Структурная диаграмма титановых сплавов в отожженном состоянии / В.М. Воздвиженский, Б.А. Колачев, М.В. Воздвиженская // Известия ВУЗов. Цв. Metallургия. – 2003. - № 2. -С. 32 – 38.
7. Колачев, Б.А. Ti-Al-Mo как основа диаграммы фазового состава отожженных титановых сплавов / Б.А. Колачев, А.А. Ильин, Д.В. Рынденков // Известия ВУЗов. Цв. Metallургия. – 2005. - № 6. -С. 56 – 61.
8. Авиационные материалы. Справ. в 9 т. / под общ. ред. А.Т.Туманова. Т.5 Магниево-титановые сплавы. М.: ОНТИ, 1973. - 560 с.
9. Авиационные материалы: Справочник в 12 т. / под общ. ред. Е.Н. Каблова. Т.6 Титановые сплавы. М.: ВИАМ, 2010. - 96 с.
10. Фридляндер, И.Н. Машиностроение. Энциклопедия. Т. 2-3. Цветные металлы и сплавы / И.Н. Фридляндер, О.Г. Сенаторова, О.Е. Осинцев и др.- М.: Машиностроение, 2001, раздел 5. - 585-586 с.
11. У, Цвиккер. Титаниево-алюминиевые сплавы / У. Цвиккер. - М.: Metallургия, 1979. – 512 с.
12. Boyer, R. Materials Properties Handbook. Titanium Alloys, / ed. by R. Boyer, G. Welsch, E.W. Collings - OH, USA, ASM International, Materials Park, 1994. - 1176 p.

## ВЛИЯНИЕ ОКСИДОВ КРЕМНИЯ И АЛЮМИНИЯ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА КЕРАМИКИ НА ОСНОВЕ НАНОПОРОШКОВ ДИОКСИДА ЦИРКОНИЯ

### Аннотация

Исследовано влияние легирования оксидами кремния и алюминия на процесс структурообразования керамики на основе стабилизированного иттрием диоксида циркония. Методами РФА, внутреннего трения, четырехточечного изгиба и электронной микроскопии показано, что в порошковой системе  $ZrO_2 + 3 \text{ мол.}\% Y_2O_3 + n \text{ вес.}\% SiO_2 + 2 \text{ вес.}\% Al_2O_3$  ( $n=3, 5, 7, 9$ ) наблюдается уменьшение размера ОКР до 26 нм. Установлено, что в керамике на основе этих нанопорошков наблюдается образование новой фазы в виде ортосиликата циркония ( $ZrSiO_4$ ). Количество новой фазы увеличивается с ростом количества оксида кремния  $SiO_2$  в исходных порошках. Показано, что присутствие в керамике фазы  $ZrSiO_4$  приводит к значительному улучшению физико-механических характеристик по сравнению с исходным составом YSZ.

*Ключевые слова:* керамика, диоксид циркония, структура, свойства, нанопорошки.

### Введение

Одним из наиболее перспективных керамических материалов является стабилизированный иттрием  $ZrO_2$  (YSZ). Преимуществами данного типа керамики являются его высокие трибологические и прочностные характеристики как при комнатных [1], так и при высоких [2] (около  $1000^\circ C$ ) температурах. Материалы данного состава обладают ионной проводимостью при температурах выше  $600^\circ C$ , что позволяет использовать их в качестве SOFC элементов [3]. Также, для диоксид циркониевой керамики характерна высокая степень биологической совместимости, что реализовано в виде керамических имплантатов для стоматологии и хирургической травматологии [4].

Модификация структуры керамики YSZ путем изменения параметров синтеза к настоящему времени изучена широко. Известно, что предварительное уплотнение при различных температурах и давлениях, воздействующих на исходное сырье при получении керамики, позволяет синтезировать различную зёрненную структуру в керамике, в том числе и наноразмерную [5]. Использование технологии «горячего прессования» даёт возможность получать прозрачную керамику для специальных оптических линз с высокой термостойкостью и твердостью [6].

Однако наиболее распространенным способом улучшения физико-механических свойств такой керамики является её легирование. Химическая модификация YSZ на стадии синтеза нанопорошка способствует изменению структуры конечного консолидированного материала. Например, в работе [7] указано, что небольшие добавки  $TiO_2$  способствуют уплотнению керамики YSZ из-за ее высокой реакционной способности. Роль оксид гафния в процессе структурообразования данного типа керамики рассмотрена в работе [8] – все

исходные компоненты образуют устойчивый твёрдый раствор, что приводит в итоге к получению гомогенной плотной и высокопрочной керамики. Влияние оксида алюминия на структуру и свойства керамики на основе YSZ исследовано в работах [9,10]. Ввиду структурных особенностей материалов, при легировании  $\text{Al}_2\text{O}_3$  матрицы из диоксида циркония происходит образование композитной структуры типа ATZ.

Целью настоящего исследования является изучение процесса структурообразования керамики на основе нанопорошковой системы YSZ-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

### Материалы и методы

Для синтеза исследуемых нанопорошков, на основе которых была получена керамика, был применён метод обратного химического осаждения. Нанопорошки состава YSZ, легированные 3,5,7,9 вес. % SiO<sub>2</sub> и 2 вес. % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (YSZ+n вес. %SiO<sub>2</sub>+2 вес. %Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) получали из растворов солей хлорида циркония ( $\text{ZrOCl}_2 \times 8\text{H}_2\text{O}$ ), хлорида алюминия ( $\text{AlCl}_3 \times 6\text{H}_2\text{O}$ ), кремнефтористоводородной кислоты ( $\text{H}_2\text{SiF}_6$ ) при комнатной температуре с последующей прокалкой при  $T=1000^\circ\text{C}$  в течение 2 часов. Керамические образцы получали путём одноосного формования в стальных пресс-формах с последующим компактированием в условиях высокого гидростатического давления (ВГД) = 400МПа с последующим спеканием на воздухе при  $T=1500^\circ\text{C}$  в течение 1 часа.

Структуру образцов исследовали методом рентгеновской дифракции. Измерения проводились на дифрактометре ДРОН-3 в  $\text{CuK}\alpha$ -излучением. Фазовый состав порошков и керамики, параметры тонкой структуры (величина областей когерентного рассеяния-ОКР)-определяли методом Ритвельда.

Значения плотности и пористости определяли гидростатическим взвешиванием. Величину нормального модуля упругости (модуля Юнга, E) определяли методом составного пьезоэлектрического вибратора. Твердость по Виккерсу определяли на ТП-7П-1 при нагрузке 30 кгс. Прочность исследуемых керамических образцов измеряли на приборе Tinius Olsen H50KT методом четырехточечного изгиба. Изучение структуры поверхности образцов проводили с помощью сканирующей электронной микроскопии на приборе JEOL JSM 6510lv.

### Результаты и обсуждение

Фазовый состав и размеры ОКР исследованных порошковых систем представлены в таблице 1

Таблица 1 –Фазовый состав и размеры ОКР нанопорошковой системы YSZ-SiO<sub>2</sub> - Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

Состав	Фазовый состав, %	ОКР, нм
YSZ	100T(ZrO <sub>2</sub> )	D <sub>t</sub> =31.5
YSZ+3вес. %SiO <sub>2</sub> +2вес. %Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	100T(ZrO <sub>2</sub> ) (s.s)	D <sub>t</sub> =26
YSZ +5вес. %SiO <sub>2</sub> +2вес.%Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	100T(ZrO <sub>2</sub> ) (s.s)	D <sub>t</sub> =26
YSZ +7вес. %SiO <sub>2</sub> +2вес. %Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	100T(ZrO <sub>2</sub> ) (s.s)	D <sub>t</sub> =26
YSZ +9вес. %SiO <sub>2</sub> +2вес.%Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	100T(ZrO <sub>2</sub> ) (s.s)	D <sub>t</sub> =26

Примечание: Т – тетрагональный диоксид циркония; D<sub>t</sub> размер ОКР тетрагональной фазы, s.s. – твёрдый раствор.

Как видно из таблицы 1, все исследованные порошковые системы однофазные и имеют в своём составе 100% Т-ZrO<sub>2</sub>. Также в порошках наблюдается уменьшение величины ОКР до 26 нм (~20%) при дополнительном легировании оксидом

алюминия. Уменьшение размеров ОКР, наблюдаемое в исследованных порошковых системах, вызвано добавкой  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Катионы  $\text{Al}^{3+}$  на этапе синтеза сырья растворяются в решётке  $\text{ZrO}_2$ , тем самым препятствуя его кристаллизации из аморфного состояния.

Типичные дифрактограммы исследованных порошков состава YSZ и YSZ+9вес. % $\text{SiO}_2$ +2вес. % $\text{Al}_2\text{O}_3$ , отожженных при температуре  $1000^\circ\text{C}$ , приведены на рис.1.

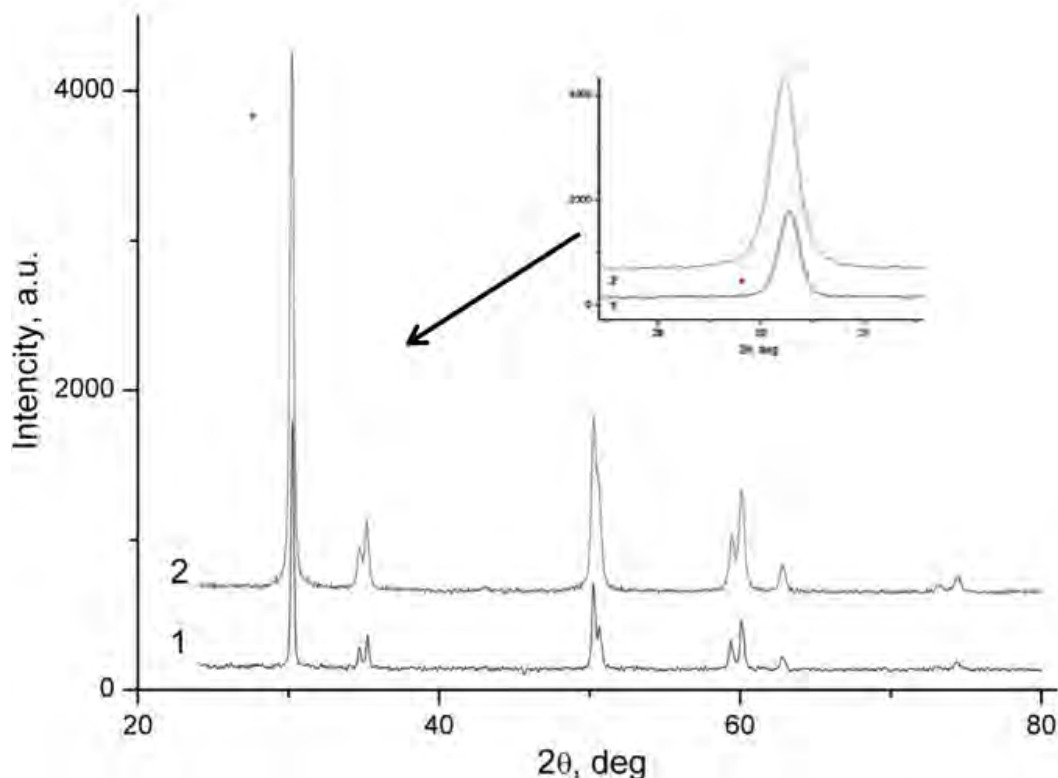


Рисунок 1 – Дифрактограммы исследованных порошковых систем YSZ- $\text{SiO}_2$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ , где 1 - YSZ+9вес. % $\text{SiO}_2$ +2вес. % $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 2 – YSZ

Все легирующие примеси создают твёрдый раствор с диоксидом циркония. Подтверждением этого факта является смещение дифракционных пиков в область больших углов на дифрактограмме при легировании исходных порошков. Смещение пиков в область больших углов указывает на уменьшение параметров решётки  $\text{ZrO}_2$ , что находится в соответствии с правилом Вегарда, поскольку ионный радиус  $\text{Si}^{4+} = 0.39\text{Å}$ ,  $\text{Al}^{3+} = 0.57\text{Å}$ ,  $\text{Zr}^{4+} = 0.82\text{Å}$ .

В керамике, полученной путём спекания вышеуказанных нанопорошков отмечено образование ортосиликата циркония  $\text{ZrSiO}_4$  (Таблица 2). Как видно, основными фазами являются t- $\text{ZrO}_2$  с небольшим количеством m- $\text{ZrO}_2$  (~ 1,5%) и  $\text{ZrSiO}_4$ . Количество  $\text{ZrSiO}_4$  росло с увеличением  $\text{SiO}_2$ .

Таблица 2 – Фазовый состав исследуемой керамической системы.

Состав керамики	Фазовый состав, %
YSZ	100% (t)-YSZ
YSZ+3вес.% $\text{SiO}_2$ +2вес. % $\text{Al}_2\text{O}_3$	96.5 % (t) + 1.5 % (m) + 2.0 % $\text{ZrSiO}_4$
YSZ+5вес.% $\text{SiO}_2$ +2вес. % $\text{Al}_2\text{O}_3$	92.5 % (t) + 1.5 % (m) + 6.0 % $\text{ZrSiO}_4$
YSZ+7вес.% $\text{SiO}_2$ +2вес. % $\text{Al}_2\text{O}_3$	92.0 % (t) + 1.0 % (m) + 7.0 % $\text{ZrSiO}_4$
YSZ+9вес.% $\text{SiO}_2$ +2вес. % $\text{Al}_2\text{O}_3$	91.5 % (t) + 1.0 % (m) + 7.5 % $\text{ZrSiO}_4$

Исследования методом СЭМ подтвердили результаты РФА – на поверхности исследуемой керамики отмечено образование включений циркона (рис.2).

Плотность в исследованной керамике снижалась с ростом количества легирующей примеси от 6,1 до 5,77 г/см<sup>3</sup> в то время, как общая пористость возрастала до 5,43 % (Табл.3). Подобное поведение указанных характеристик связанна с изменением количества ортосиликата циркония в матрице – увеличение доли менее плотной добавки ( $\rho$  (ZrSiO<sub>4</sub>)=4,7 г/см<sup>3</sup>),  $\rho$  (t-ZrO<sub>2</sub>)=6,1 г/см<sup>3</sup>) приводит к снижению плотности материала в целом и росту общей пористости.

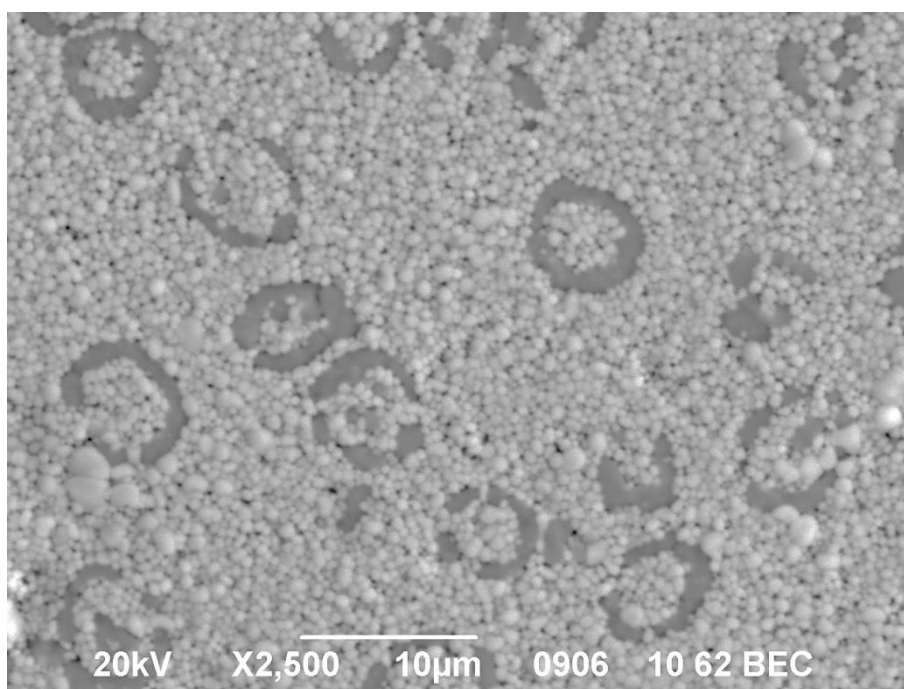


Рисунок 2 –Структура поверхности керамического образца состава YSZ+5вес. % SiO<sub>2</sub>+2вес. %Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

Исследование физико-механических характеристик керамики, показало, что их зависимость от количества легирующей примеси имеет максимум при содержании SiO<sub>2</sub>=5%. При этом важно отметить, что увеличение значений физико-механических характеристик, в среднем составил 25%

Таблица 3–Физико-механические свойства керамики состава YSZ-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

Состав керамика	$\rho$ , g/cm <sup>3</sup>	$\epsilon$ , %	E, GPa	Hv	$\sigma$ , МПа
YSZ	6.1	1,66	188	1021	733
YSZ+3%SiO <sub>2</sub> +2%Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6.07	2,17	220	1077	850
YSZ+5%SiO <sub>2</sub> +2%Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.95	2,46	228	1273	882
YSZ+7%SiO <sub>2</sub> +2%Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.82	4,62	212	1251	821
YSZ+9%SiO <sub>2</sub> +2%Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.77	5,43	208	1106	804

Примечание:  $\rho$  – плотность,  $\epsilon$  – пористость, E – модуль Юнга, Hv – твёрдость по Виккерсу,  $\sigma$  – прочность.

Наличие максимума в зависимости исследованных характеристик от концентрации SiO<sub>2</sub> свидетельствует о наличии взаимобратных процессов в ходе структурообразования керамического композита, а именно эффект разупрочнения,

связанный с увеличением пористости материала, и эффект армирования от включений  $ZrSiO_4$ . Как указывалось ранее, рост пористости обусловлен контактом разноплотных материалов матрицы ( $ZrO_2$ ) и включения ( $ZrSiO_4$ ) в керамическом композите. Эффект упрочнения связан с наличием полей упругих напряжений, создаваемых ортосиликатом циркония. Учитывая, что матрица и включение имеют схожий тип решетки (оба тетрагональные, ОЦТ), а удельные объемы отличаются друг от друга более чем на 29%, можно утверждать, что колонии  $ZrSiO_4$  создают достаточно прочные поля упругих напряжений, которые вносят существенный вклад в упрочнение керамики при концентрации  $SiO_2$  менее 5 %.

### Заключение

Исследовано влияние добавок оксидов кремния и алюминия на структуру и свойства порошков и керамики на основе стабилизированного иттрием диоксида циркония. Установлено, что в порошковой системе YSZ- $SiO_2$ - $Al_2O_3$  наблюдается уменьшение размера ОКР до 26 нм, связанное с влиянием ионов  $Al^{3+}$  на решетку  $ZrO_2$ .

В исследуемой керамике по реакции  $ZrO_2 + SiO_2 = Zr^{4+} [SiO_4]^{4-}$  зафиксировано образование новой фазы в виде ортосиликата циркония –  $ZrSiO_4$ . Количество ортосиликата циркония в керамике росло с увеличением количества оксида кремния в исходных порошках и максимальное его количество составляло 7,5 %. Образование новой фазы привело к снижению плотности и увеличению пористости материала, но повысило его физико-механические характеристики. Отмечено, что при содержании  $ZrSiO_4$  около 6% (YSZ+5мас. % $SiO_2$ +2мас. % $Al_2O_3$ ) свойства керамики превышают свойства исходной керамики YSZ в среднем, на 25% ( $H_v = 1273$ ,  $\sigma = 882$  МПа,  $E = 228$  ГПа). Упрочняющее действие включений ортосиликата циркония связано с полями упругих напряжений, создаваемыми им в матрице диоксида циркония.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Савченко, Н.Л. Трение и износ керамики на основе в условиях высокоскоростного скольжения по стали / Н.Л. Савченко, К.М. Пятова, С.Н. Кульков // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. - 2008. - Т.1. - С.84-89.
2. Xiaorui, R. Mechanical properties of high-temperature-degraded yttria-stabilized zirconia / R. Xiaorui, P. Wei // Acta Materialia. - 2014. -V. 69. -P. 397-406.
3. Atkinson, A. Solid Oxide Fuel Cell Electrolytes / A. Atkinson // Solid Oxide Fuel Cell Lifetime and Reliability. - 2017. - V.2. - P. 19-35.
4. Luciana, M. Application of Kubelka-Munk model on the optical characterization of translucent dental zirconia Schabbach / M. Luciana, C. Bruno // Materials Chemistry and Physics. - 2021. -V. 258. -P. 123-131.
5. Juntavee, N. Effect of sintering process on color parameters of nano-sized yttria partially stabilized tetragonal monolithic zirconia /N. Juntavee, S. Attashu // J. Clin. Exp. Dent. Prosthetic density. - 2018. - V. 10. -P. 794-804.
6. Apurv, D. Transparent tetragonal-cubic zirconia composite ceramics densified by spark plasma sintering and hot isostatic pressing / D. Apurv, K. Byung-Nam, J. Klimke, J. Vleugels // J. Eur. Ceram. Soc. - 2019. - V. 39. - P. 1428-1435.
7. Khaskhoussi, A. Performances and aging stability of new  $Al_2O_3$ - $ZrO_2$ - $TiO_2$  ternary ceramic composites / A. Khaskhoussi, L. Calabrese, J. Bouaziz, E. Proverbio // Materials Chemistry and Physics. - 2020. - V. 243. - P. 620-628.

8. Belichko, D. Influence of hafnium oxide on the structure and properties of powders and ceramics of the YSZ-HfO<sub>2</sub> composition / D. Belichko, T. Konstantinova, A. Maletsky et al. // *Ceramics International*. - 2021. - V. 47. - P. 3142-3148.

9. Trejo-Arroyo, D. Microstructure and mechanical properties of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-YSZ spherical polycrystalline composites / D. Trejo-Arroyo, J. Zárate-Medina, J.M. Alvarado-Orozco, M.E. Contreras-García, M.S. Boldrick, J. Muñoz-Saldaña // *Journal of the European Ceramic Society*. - 2013. - V. 33. - P. 1907-1917.

10. Ganvir, A. Tribological performance assessment of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-YSZ composite coatings deposited by hybrid powder-suspension plasma spraying / A. Ganvir, S.Goel, S.Govindarajan, A.Rajeev Jahagirdar, S.Björklund, U.Klement, S.Joshi // *Surface and Coatings Technology*. - 2021. - V. 409. - P. 126-134.



Д.В. Масайло, А.В. Орлов, А.А. Попович  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Санкт-Петербург, Россия, [dmasaylo@gmail.com](mailto:dmasaylo@gmail.com)

## «IN-SITU» СИНТЕЗ МНОГОКОМПОНЕНТНОГО СПЛАВА НА ОСНОВЕ НИКЕЛЯ ИЗ ЭЛЕМЕНТНЫХ ПОРОШКОВ МЕТОДОМ ПРЯМОГО ЛАЗЕРНОГО ВЫРАЩИВАНИЯ

### Аннотация

В работе исследуется подход к альтернативному способу получения классических жаропрочных сплавов методами лазерной наплавки или прямого лазерного выращивания. Этот метод соответствует концепции развития производства малой серии металлопродукции с экономически целесообразным применением аддитивных технологий. Обсуждаются результаты свойств полученных материалов из элементных порошков и возможные перспективы развития этого способа синтеза сплавов. В работе представлен результат формирования образца из механической смеси порошка Ni/Cr/Fe, по массовому соотношению основных компонентов близкого по составу к сплаву Inconel 600. Полученный многослойный образец был исследован методами оптической и электронной микроскопии. Отслеживалось изменение химического состава по высоте образца с целью определения анизотропии химического состава методом ЭДС. Структура представляет собой крупные удлиненные зерна размером до 1–2 мм, значительно превосходящую высоту одного прохода. Направление роста зерна соответствует направлению формирования образца вдоль оси Z.

*Ключевые слова:* Прямое лазерное выращивание, лазерная наплавка, порошковая металлургия, синтез сплава, стали, жаропрочные сплавы, микроструктура.

### Введение

Внедрение аддитивных технологий из металлических материалов в реальный сектор экономики, возможно, сейчас является одной из первоочередных задач для сохранения темпов роста и перехода на новый технологический уклад. Преимущество от внедрения аддитивных технологий заключается в возможности значительно сократить технологический цикл для получения изделий, в том числе и сложной геометрической формы (в том числе сетчатые и ячеистые конструкции). Установки, работающие по технологии селективного лазерного плавления (СЛП), поставляются как цельная самодостаточная система, позволяющая изготавливать детали из множества материалов по уже отработанным производителем режимам. Стоимость таких машин довольно высока, а максимальные габариты рабочей камеры обычно не превышают 500 мм по каждой из координат (существуют штучные машины с рабочей областью до 800 мм). Существуют альтернативные решения – это установки, работающие по принципу прямой подачи энергии и материала в зону плавления, например – прямое лазерное выращивание (ПЛВ) или лазерная наплавка (ЛН). Это более доступное оборудование, обычно на базе 6-и осевого промышленного роботоманипулятора, что позволяет изготавливать крупные детали практически неограниченных размеров.

Принцип работы ПЛВ заключается в подаче строительного материала (порошка или проволоки) в зону плавления с образованием ванны расплава лазерным лучом и последующей кристаллизацией металла в виде полусферических треков, заданной длины. В качестве исходного материала могут применяться следующие виды порошков: легированные (полученные атомизацией из сплавов), механолегированные, либо элементные. Построение деталей из предварительно легированных сплавов уже достаточно полно изучено в научных работах [1–5]. Изучалось влияния параметров наплавки, технологические свойства исходных порошков, а также физика основных процессов. Способ синтеза сплавов из механолегированных порошков позволяет получать уникальные композиции [6–8]. Сплавы из порошковых элементных смесей не требуют специальных промежуточных технологических операций перед ПЛВ, поэтому, возможно, могут быть самым дешевым сырьем для получения готового изделия. Основным вопросом является степень однородности конечного сплава и стабильность химического состава относительно исходной смеси. Известны работы по ПЛВ материалов из элементных порошков системы Fe-Cr-Ni [9]. Авторы синтезировали сплав с различным содержанием компонентов элементной смеси, из которой изготавливались тонкие стенки. Результаты ЭДС анализа по точкам доказали, что необходима оптимизация размера частиц в готовой смеси чтобы сохранить ее исходный состав и уменьшить разделение предварительно смешанного порошка. Изготовленный гетерогенный и многофункциональный сплав Fe-Cr-Ni обладает как коррозионной стойкостью, так и достаточной вязкостью и пластичностью. В работе [10] обсуждаются критические технические проблемы синтеза сплавов из элементных порошков. Отмечается, что на сегодняшний день существует множество нерешенных вопросов, такие как преодоление энтропии смешения, стабилизация газопорошкового потока для различных металлических порошков и влияние взаимодействия лазера и материала на окончательный состав полученного сплава. Кроме того, необходимо выявить предсказуемую взаимосвязь между первоначальным атомным или массовым и конечным химическим составом. Важно отметить, что активно развивается область исследований по получению высокоэнтропийных сплавов из смеси порошков, так как предварительные легированные сплавы из такого типа материала получить практически невозможно. Уже получены высокоэнтропийные сплавы систем FeCoNiCrCu [11], 6FeNiCoSiCrAlTi [12], TiVCrAlSi [13] и другие.

Возможность синтезировать сплав в процессе выращивания позволяет получать изделия с различными функциональными свойствами в зависимости от пропорции компонентов и не закупать множество различных готовых (легированных) порошковых материалов. Поэтому, можно предположить, что получение сплавов из элементных порошков может представлять не только научный интерес, но и быть экономически эффективным способом производства.

Задачей этой работы являлась оценка качества сплава, полученного в процессе синтеза элементных порошков прямым лазерным выращиванием.

## Методы

В работе были использованы элементные порошки Ni, Fe и Cr в состоянии поставки. Характеристики этих порошков представлены в таблице 1. Порошковая композиция получалась с помощью гравитационного смесителя в течение 4 часов в массовом соотношении 73% Ni, 17% Cr, 10% Fe. Полученная смесь загружалась в порошковый питатель установки ПЛВ. Синтез производился на подложку из стали

марки Ст.3 толщиной 5 мм. Химический состав подложки железо – 97%; углерод 0,22%; никель, медь, хром – каждый не больше 0,3%; марганец 0,65%; кремний 0,17%.

Таблица 1 – Элементные порошки для синтеза сплава Ni-Cr-Fe

Элементный порошок	Гранулометрический состав, мкм	Морфология	Чистота химического состава (мас. %)
Ni	5 - 55		Ni – 99,25% Остальное -0,75%
Cr	5 - 55		Cr – 98,76% Si – 0,22% Остальное - 1,02%
Fe	20-125		Fe – 98,19% Mn – 0,45% Остальное - 1,36%

Синтез сплава и выращивание образца осуществлялось на установке, разработанной в ФГАОУ ВО «СПБПУ». В состав установки входят компоненты:

- иттербиевый волоконный лазер 1070 нм IPG LS-3
- порошковый питатель GTV PF 2/2 с двумя колбами
- наплавочная голова KUKA MWO-1 с трехструйной подачей
- 6-и осевой робот Fanuc M20i

Способ защиты зоны плавления – локальная подача аргона, без заполнения рабочей камеры защитным газом.

Эксперимент заключался в проведении выращивания образцов из элементных порошков методом ПЛВ с целью получения гомогенного сплава и одновременным формообразованием образца. Режимы, по которым осуществлялся процесс представлен в таблице 2. Вначале, была получена серия одиночных треков с изменением количества подводимой энергии за счет варьирования мощности лазера (900, 1200, 1500 и 2000 Вт). Затем были выращены тонкостенные и толстостенные образцы при мощности лазера 1200 и 1500 Вт.

Таблица 2 – Параметры лазерной наплавки для выращивания образцов и из элементных порошков

Параметр наплавки	Значение
Скорость движения	10 мм/с
Подача порошка	15 г/мин
Защитный аргон	12 л/мин
Транспортировочный аргон	6 л/мин
Мощность лазера	900 – 2000 Вт
Высота подъема	0,6 мм
Смещение	50 %
Размер лазерного пятна	3 мм

Из всех полученных образцов были изготовлены шлифы для металлографического анализа. Химическое травление проводилось в растворе 10 мл

$\text{HNO}_3$  и 30 мл  $\text{HCl}$ . Изображения микроструктуры получены на оптическом микроскопе Leica. Химический анализ проводился на СЭМ Tescan Mira 3 с ЭДС анализатором.

### Результаты и обсуждение

Была проанализирована структура одиночных треков на стальной подложке. На образцах после травления (Рис. 1) видна четкая граница подложки и синтезированного сплава, а также зона термического влияния (ЗТВ). На изображениях структуры для мощностей лазера 900–1500 Вт на рисунке 1 (а-в) можно отметить наличие вихревых потоков и турбулентного течения жидкости в ванне расплава разнородных материалов до кристаллизации. При мощности лазера 2000 Вт вихревые потоки на структуре отсутствуют и присутствует направленная кристаллизация характерная для треков однородных сплавов.

Методом ЭДС был определен химический состав треков по площади, который показал наличие диффузии железа из подложки (таблица 3). Так как процесса прямого лазерного выращивания характерно образование ванны расплава, можно предположить, что объем материала расплавленной подложки значительно превышает объем вводимого металла. По этой причине при наплавке одиночного трека из элементных порошков в химическом составе преобладает материал подложки.

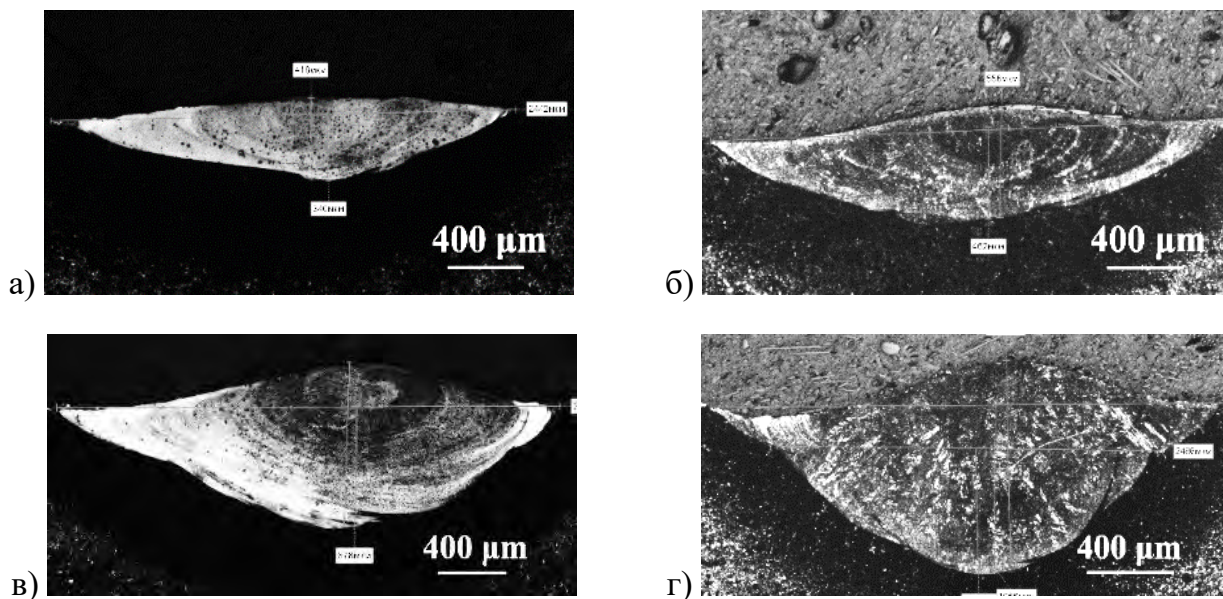


Рисунок 1 – Одиночные треки из порошковой смеси Ni/Cr/Fe, где: а – 900 Вт, б – 1200 Вт, в – 1500 Вт, г – 2000 Вт.

Таблица 3 – Содержание химических элементов в треке в зависимости от мощности лазера

Мощность лазера, Вт	Ni	Cr	Fe
900	3,5	4,9	91,6
1200	2,8	2,5	94,7
1500	6,1	4,6	89,3
2000	2,7	2,7	94,6

Также была выявлена зависимость размера ванны трека (образовавшейся ванны расплава) в зависимости от мощности лазера. Эта зависимость, выраженная в конечном геометрическом размере трека представлена на рисунке 2.

СЭМ изображение с совмещенным на нем непрерывными кривыми химического состава тонкостенного образца, выращенного при мощности 1500 Вт, показано на рисунке 3.

Стенка имеет неровные края и множества выступов по причине слишком малого размера порошка, что привело к их проплавлению по границам стенок и образования сателлитов. Что касается химического состава тонкой стенки, то было установлено градиентное изменение химического состава, которое стабилизировалось при высоте стенки 2 мм, что соответствует примерно 3-м слоям. Таким образом установлено, что происходит значительная диффузия материала подложки в выращиваемый образец. Это необходимо учитывать при построение невысоких образцов, а также нанесение покрытий.

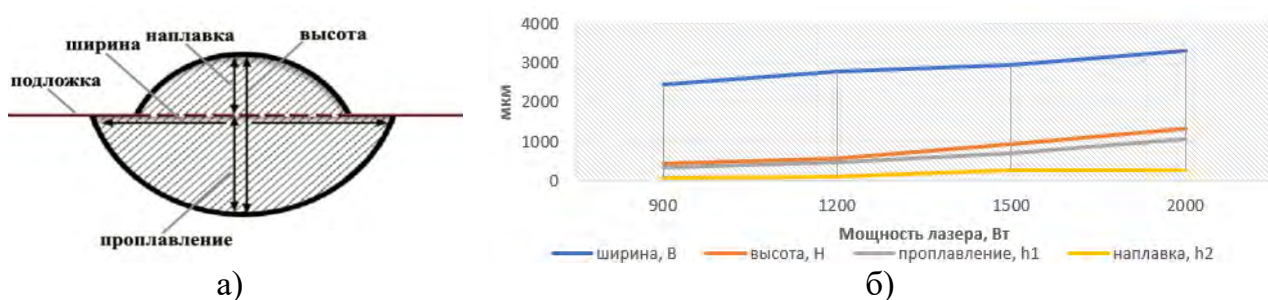


Рисунок 2 – Параметры геометрии трека, где: а – схематическое изображение, б – в зависимости мощности лазера

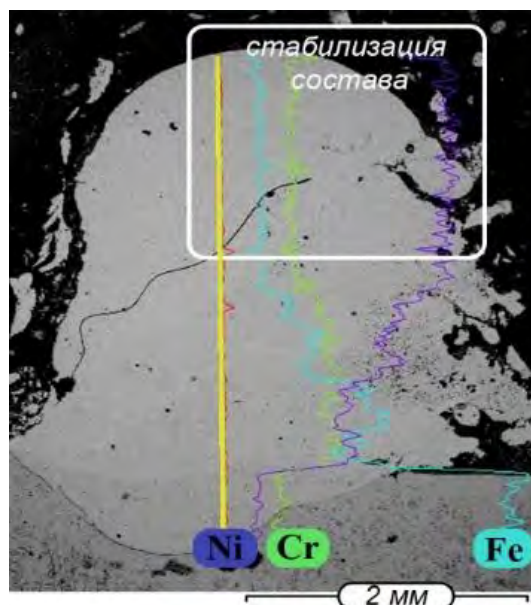


Рисунок 3 – Наплавка тонкой стенки из элементной смеси порошков Ni/Cr/Fe при мощности 1500 Вт.

Далее была изучена структура и химический состав синтезированных толстостенных образцов. В зависимости от мощности лазера структура образца заметно изменялась. При мощности лазера 1200 Вт обнаружена ориентированность зерен преимущественно в направлении роста толстой стенки. При мощности лазера

1500 Вт ориентация зерен приобретает еще более выраженную текстуру с размером ячеек в одном направлении около 2 мм. Это связано с процессами термоциклирования, которая выше температуры рекристаллизации и с последующим направленным охлаждением.

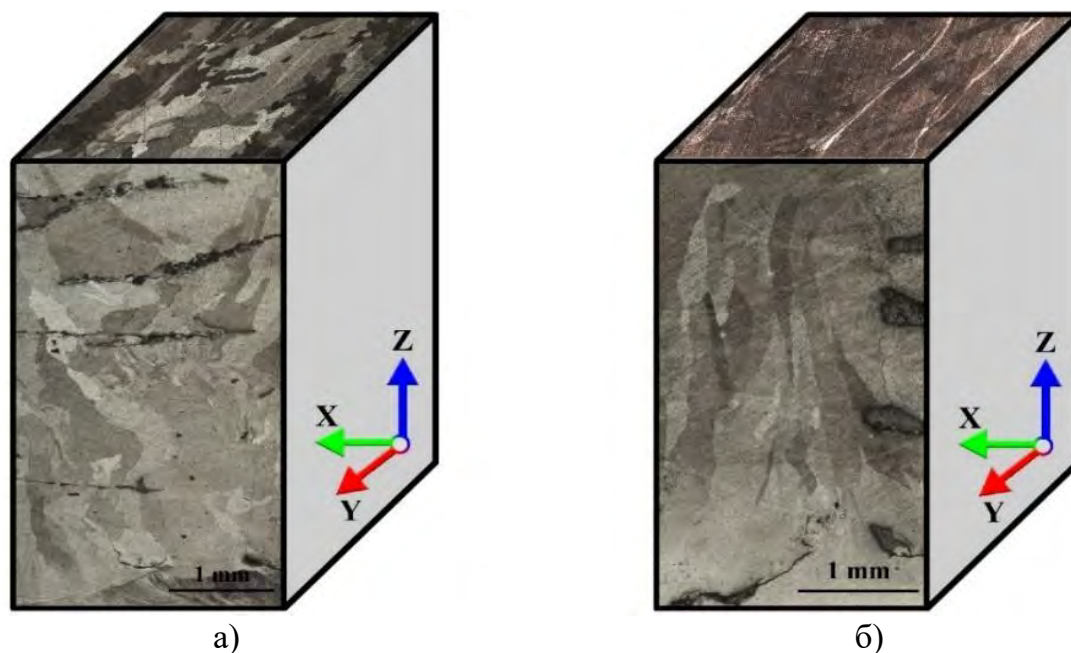


Рисунок 4 – Структура синтезированных толстостенных образцов системы Ni/Cr/Fe, где: а – мощность лазера 1200 Вт, б – мощность лазера 1500 Вт. Новые слои добавлялись в направлении координаты Z

Для контроля изменения химического состава по объему толстостенные образцы были исследованы на ЭДС в трех зонах (рисунок 5). Результаты измерения представлены в таблице 4.

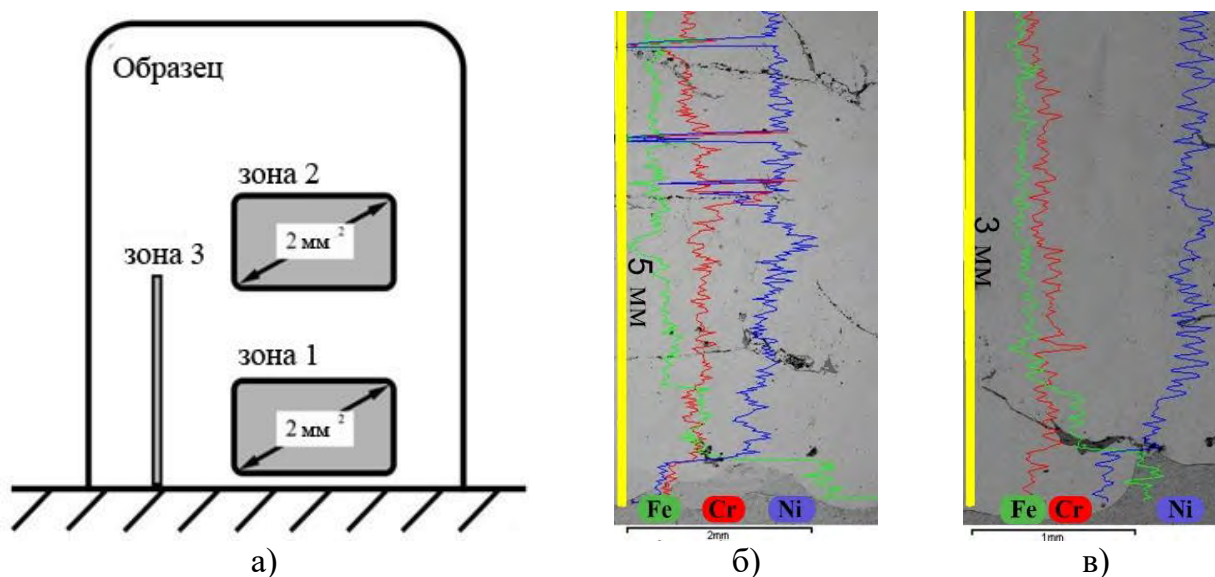


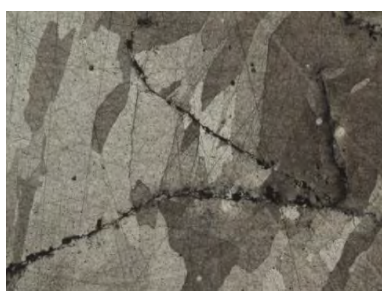
Рисунок 5 – ЭДС анализ в толстостенных образцах, где: а – схема областей измерения химического состава, измерение изменения химического состава в зоне 3 для мощности лазера: б – 1200 Вт и в – 1500 Вт

Таблица 4 – Химический состав образцов из смеси Ni/Cr/Fe для двух мощностей лазера в зонах 1 и 2

1200 Вт				
Элемент	O	Cr	Fe	Ni
Область 1, %	<0,5	18,3	12,0	69,7
Область 2, %	2,8	16,9	8,9	71,4
<b>Среднее, %</b>	<b>1,4</b>	<b>17,6</b>	<b>10,5</b>	<b>70,5</b>
1500 Вт				
Элемент	O	Cr	Fe	Ni
Область 1, %	1,6	13,4	13,1	72,0
Область 2, %	<0,5	11,0	12,4	76,6
<b>Среднее, %</b>	<b>0,8</b>	<b>12,2</b>	<b>12,8</b>	<b>74,3</b>

Нерасплавленных частиц порошка обнаружено не было, но, как можно увидеть на снимках структуры на рисунке 4, в образцах присутствует значительное количество дефектов – межтрековые оксидные включения (рисунок 6). С увеличением мощности лазера содержание хрома в сплаве понизилось на 5% из-за повышения количества оксидных фаз.

#### Оптическое изображение



#### СЭМ



#### ЭДС

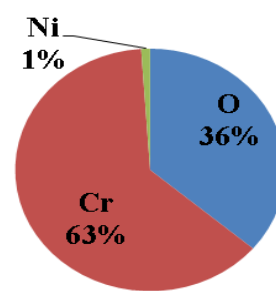


Рисунок 6 – Исследование дефектов в сплаве Ni-Cr-Fe

Комплексное исследование химического состава методом ЭДС толстостенного образца показало нестабильность распределения элементов внутри объема материала. Основана причина этой нестабильности – образование оксидных включений, которые были идентифицированы как оксид хрома. При увеличении мощности лазера с 1200 Вт до 1500 Вт изменился характер распределения оксидных включений. От тонких нитей, распределенных преимущественно вдоль границ треков, оксиды агломерировались между треками во включения эллипсоидальной формы диаметром 0,3–0,5 мм.

#### Заключение

В результате работы были получены следующие основные результаты:

- Метод синтеза из элементных порошков показал высокую диффузию элементов материала подложки в первых 1–2 слоях наплавки, что может значительно изменять химический состав сплава.
- При мощности 1200 Вт весь порошок переплавился и участвовал в образовании сплава

● Повышение мощности лазера с 1200 Вт до 1500 Вт при ПЛВ из элементных порошков изменяет степень ориентации зерен до вытянутых кристаллов длиной 1–2 мм вдоль оси отвода тепла.

● Исключение условий образования оксидных включений, а именно защитная бескислородная камера, а также минимальное содержание кислорода в исходных порошках, позволит осуществлять синтез с образованием гомогенных никелевых сплавов.

● Для определения функциональных свойств материала жаропрочность и жаростойкость необходимо провести дополнительные исследования и сравнить со свойствами предварительно легированных сплавов подобного состава.

### **Благодарность**

Работа выполнена за счет средств фонда РФ (грант №. 19-79-30002).

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. R.M. Mahamood, *Laser Metal Deposition Process of Metals, Alloys, and Composite Materials*, Springer International Publishing, Cham, 2018. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-64985-6>.

2. C. Qiu, G.A. Ravi, C. Dance, A. Ranson, S. Dilworth, M.M. Attallah, Fabrication of large Ti-6Al-4V structures by direct laser deposition, *J. Alloys Compd.* 629 (2015) 351–361. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2014.12.234>.

3. K. Zhang, W. Liu, X. Shang, Research on the processing experiments of laser metal deposition shaping, *Opt. Laser Technol.* 39 (2007) 549–557. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2005.10.009>.

4. N. Shamsaei, A. Yadollahi, L. Bian, S.M. Thompson, An overview of Direct Laser Deposition for additive manufacturing; Part II: Mechanical behavior, process parameter optimization and control, *Addit. Manuf.* 8 (2015) 12–35. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2015.07.002>.

5. S.M. Thompson, L. Bian, N. Shamsaei, A. Yadollahi, An overview of Direct Laser Deposition for additive manufacturing; Part I: Transport phenomena, modeling and diagnostics, *Addit. Manuf.* 8 (2015) 36–62. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2015.07.001>.

6. R. Savinov, Y. Wang, J. Shi, Microstructure and properties of CeO<sub>2</sub>-doped CoCrFeMnNi high entropy alloy fabricated by laser metal deposition, *J. Manuf. Process.* 56 (2020) 1245–1251. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.04.018>.

7. I. Polozov, V. Sufiiarov, A. Kantyukov, N. Razumov, I. Goncharov, T. Makhmutov, A. Silin, A. Kim, K. Starikov, A. Shamshurin, A. Popovich, Microstructure, densification, and mechanical properties of titanium intermetallic alloy manufactured by laser powder bed fusion additive manufacturing with high-temperature preheating using gas atomized and mechanically alloyed plasma spheroidized powders, *Addit. Manuf.* 34 (2020) 101374. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101374>.

8. I. Polozov, V. Popovich, N. Razumov, T. Makhmutov, A. Popovich, Gamma-Titanium Intermetallic Alloy Produced by Selective Laser Melting Using Mechanically Alloyed and Plasma Spheroidized Powders, in: 2020: pp. 375–383. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-36296-6\\_35](https://doi.org/10.1007/978-3-030-36296-6_35).

9. W. Li, L. Yan, X. Chen, J. Zhang, X. Zhang, F. Liou, Directed energy depositing a new Fe-Cr-Ni alloy with gradually changing composition with elemental powder mixes and particle size' effect in fabrication process, *J. Mater. Process. Technol.* 255 (2018) 96–104. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.12.010>.



10. Y. Chen, X. Zhang, M.M. Parvez, F. Liou, A Review on Metallic Alloys Fabrication Using Elemental Powder Blends by Laser Powder Directed Energy Deposition Process, *Materials (Basel)*. 13 (2020) 3562. <https://doi.org/10.3390/ma13163562>.
11. H. Zhang, Y. Pan, Y.Z. He, Synthesis and characterization of FeCoNiCrCu high-entropy alloy coating by laser cladding, *Mater. Des.* 32 (2011) 1910–1915. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.12.001>.
12. H. Zhang, Y. Pan, Y. He, H. Jiao, Microstructure and properties of 6FeNiCoSiCrAlTi high-entropy alloy coating prepared by laser cladding, *Appl. Surf. Sci.* 257 (2011) 2259–2263. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2010.09.084>.
13. C. Huang, Y. Zhang, J. Shen, R. Vilar, Thermal stability and oxidation resistance of laser clad TiVCrAlSi high entropy alloy coatings on Ti-6Al-4V alloy, *Surf. Coatings Technol.* 206 (2011) 1389–1395. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2011.08.063>.

Л.С. Аболмасова, Е.В. Агеев  
Юго-Западный государственный университет, Курск, Россия, lili4695@mail.ru

## МАТЕРИАЛЬНЫЙ БАЛАНС ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОГО ДИСПЕРГИРОВАНИЯ ОТХОДОВ ТВЕРДЫХ СПЛАВОВ ЛАТУНИ МАРКИ ЛС58-3 В ВОДЕ ДИСТИЛЛИРОВАННОЙ

### Аннотация

В работе рассматривается изучение материального баланса процесса электроэрозионного диспергирования свинцовой латуни марки ЛС58-3 в среде с содержанием кислорода. В результате проделанной работы были сделаны результаты, которые могут быть использованы при создании ресурсосберегающих, отличающихся малыми потерями вещества и экономически выгодных процессов переработки металлических сплавов и композиционных материалов.

*Ключевые слова:* материальный баланс, отход, шихта, масса, порошковые материалы, свинцовая латунь, электроэрозионное диспергирование.

### Введение

Материальный баланс (МБ) является неотъемлемой частью любого производственного процесса, направленной на контроль состава продукции и определения потерь при ее изготовлении. Основой для расчета МБ является не что иное, как закон сохранения масс вещества (ЗСМВ).

ЗСМВ, применительно к расчету материального баланса того или иного производственного процесса, обретает достаточно простую формулировку: масса исходных составляющих процесса должна быть равна массе его конечных продуктов процесса. Следовательно, при расчете МБ процесса, в обязательном порядке строго учитывается масса всех исходных составляющих, поступающих в исследуемый процесс (приход) и массу всех компонентов, на выходе (расход).

На рисунке 1 представлена общая схема закона сохранения масс вещества.



Рисунок 1 – Общая схема закона сохранения масс вещества (ЗСМВ)

Однако, в действительности на предприятиях после обработки сырья, независимо от условий, сумма масс итогового и побочного продуктов расходится с

массой исходного материала вследствие неотъемлемого наличия производственных потерь. Таким образом, конструктивные расчеты оборудования, оценку эффективности с экономической точки зрения и, непосредственно, саму целесообразность производственного процесса возможно произвести только при условии определения материальных потоков.

Так как процесс электроэрозионного диспергирования (ЭЭД) свинцовой латуни марки ЛС58-3 на сегодняшний день недостаточно изучен, то составление МБ данного процесса является необходимой и неотъемлемой частью для полноценного проведения дальнейших исследований [1-3].

Целью настоящего исследования является изучение материального баланса процесса электроэрозионного диспергирования свинцовой латуни марки ЛС58-3 в среде с содержанием кислорода.

### **Методы**

Для получения твердосплавных электроэрозионных частиц (шихты) использовалась установка для электроэрозионного диспергирования токопроводящих материалов, разработанная авторами и отходы свинцовой латуни ЛС58-3 [4-7].

Рабочей средой являлась вода дистиллированная. В результате локального воздействия кратковременных электроразрядов между электродами произошло разрушение отходов свинцовой латуни с образованием шихты.

Материальный баланс любого технологического процесса или части его составляется на основании ЗСМВ [2].

$$\sum G_{\text{исх}} = \sum G_{\text{кон}}, \quad (1)$$

где  $\sum G_{\text{исх}}$  – сумма масс исходных материалов;

$\sum G_{\text{кон}}$  – сумма масс конечных продуктов в тех же единицах измерения.

Процесс электроэрозионного диспергирования проводился при различных режимах работы экспериментальной установки [8-10].

В ходе проведения экспериментального исследования, с целью расчета материального баланса, были проделаны следующие операции:

- подготовка лабораторных весов «MASSA K», модель ВК-1500.1 (технические характеристики представлены в таблице 1);
- взвешивание массы прихода (электроды и диспергируемый материал в виде отходов свинцовой латуни ЛС58-3);
- процесс получения шихты методом ЭЭД;
- взвешивание полученных порошковых материалов, электродов и остатка отходов;
- расчет материального баланса.

Для получения твердосплавных электроэрозионных частиц методом электроэрозионного диспергирования использовали отходы свинцовой латуни марки ЛС58-3. Блок-схема получения шихты методом ЭЭД представлена на рис. 2.

### **Результаты и обсуждения**

На основе расчета МБ проведенного экспериментального исследования процесса ЭЭД свинцовой латуни ЛС58-3 была составлена принципиальная схема, представленная на рис. 3.

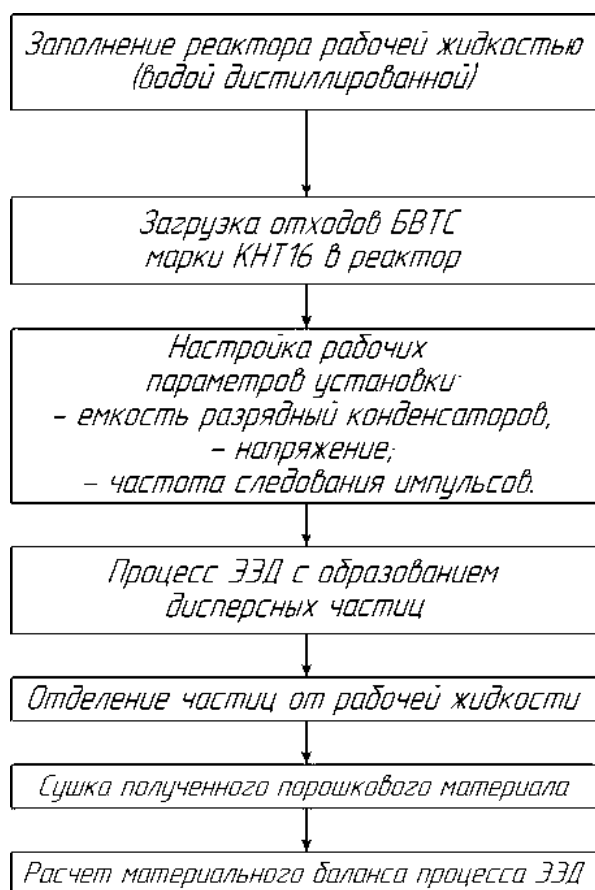


Рисунок 2 – Блок-схема получения порошка методом ЭЭД

Таблица 1 – Технические характеристики лабораторных весов, применявшихся в исследованиях свинцовой латуни ЛС58-3 в расчете МБ

Производитель	«MASSA K»
Модель	ВК-1500.1
Класс точности	Высокий (ГОСТ 24104-2001)
Максимальная масса взвешивания, г	1500
Минимальная масса взвешивания, г	2,5
Дискретность отсчета (при взвешивании от 2,5 г до 500 г включительно), г	0,05
Дискретность отсчета (при взвешивании свыше 500 г до 1500 г включительно), г	0,1
Диапазон рабочих температур	от +15 °С до +30°С
Габаритные размеры Ш×Г×В, мм	180×220×85
Дополнительные режимы работы	1) Подсчет количества образцов по массе 2) Режим процентного взвешивания 3) Расчет суммарной массы образцов 4) Возможность подключения к ПК

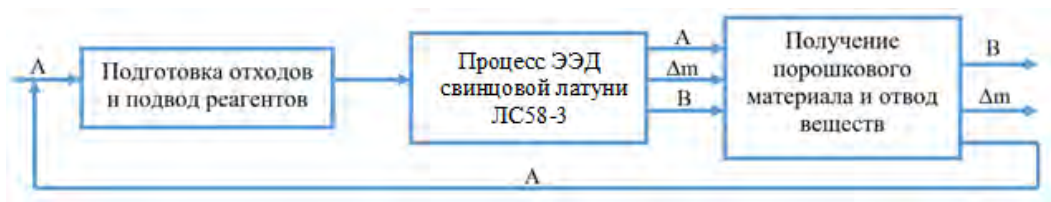


Рисунок 3 – Принципиальная схема проведенного экспериментального исследования процесса ЭЭД; А – реагент (отходы свинцовой латуни ЛС58-3); В – целевой продукт (порошковый материал;  $\Delta m$  – потери)

Основные результаты исследования представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Материальный баланс процесса электроэрозионного диспергирования свинцовой латуни ЛС58-3 в воде дистиллированной

Рабочие параметры установки:		№ опыта		
		1	2	3
емкость разрядных конденсаторов, мкФ;		25,5	25,5	25,5
напряжение, В;		100	150	200
частота следования импульсов, Гц		50	50	50
Приход	Электроды	65,65 г / 10%	65,35 г / 10%	65,1 г / 10%
	Материал	566,1 г / 90%	565,25 г / 90%	563,95 г / 90%
	Итого	631,75 г / 100%	630,6 г / 100%	629,05 г / 100%
Расход	Электроды	5,05 г / 0,8%	4,4 г / 0,7%	5,05 г / 0,8%
	Материал	613,4 г / 97,1%	610,4 г / 96,8%	600,7 г / 95,5%
	Порошковый материал	10,1 г / 1,6%	15,1 г / 2,4%	22,02 г / 3,5%
	Потери	3,1 г / 0,5%	0,63 г / 0,1%	1,25 г / 0,2%
Итого		631,75 г / 100%	630,6 г / 100%	629,05 г / 100%

На рисунке 4 представлена микроструктура экспериментального порошкового материала, полученного методом ЭЭД в кислородсодержащей среде (воде дистиллированной) из отходов свинцовой латуни марки ЛС58-3.

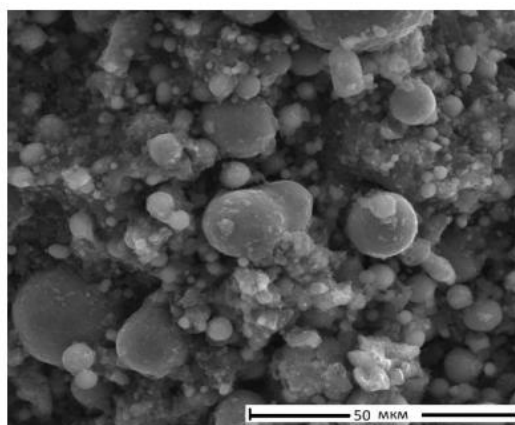


Рисунок 4 – Микроструктура порошкового материала, полученного методом ЭЭД в кислород содержащей среде из отходов свинцовой латуни ЛС58-3

## Заключение

В ходе проведения эксперимента по средствам проведения расчета МБ выявлено следующее:

- сумма прихода равна сумме расхода;
- наибольшие потери материала в проведенных опытах составляют не более 0,5 % от общей массы исследуемых материалов в опыте;
- средние значения потерь составили 0,27% от общей массы материалов.

Полученные результаты могут быть использованы при создании ресурсосберегающих, отличающихся малыми потерями вещества и экономически выгодных процессов переработки металлических сплавов и композиционных материалов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Грошева, Л.П. Основы материального баланса: Методическое пособие / Великий Новгород: НовГУ им. Ярослава Мудрого, 2006. - 14 с.
2. Павлов, К.Ф. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии / Павлов, К.Ф., Романков, П.Г., Носков, А.А. // М: Альянс. - 2013. - 576 с.
3. Михалев, М.Ф. Расчёт и конструирование машин и аппаратов химических производств / Михалев, М.Ф., Третьяков, Н.П., Мильченко, А.И., Зобнин, В.В. // Ленинград: Машиностроение. - 1984. - 301с.
4. Петридис, А.В. Получение порошков из отходов твердых сплавов методом электроэрозионного диспергирования // Ремонт. Восстановление. Модернизация. - 2006. - № 8. - С. 29-35.
5. Новиков, Е.П. Исторические аспекты получения порошков из токопроводящих отходов производства методом электроэрозионного диспергирования // Современные материалы, техника и технологии. - 2016. - № 1 (4). - С. 170-177.
6. Чаплыгин, В.Ю. Методология исследования металлических порошков, полученных электроэрозионным диспергированием // Современные материалы, техника и технологии. - 2016. - № 1 (4). - С. 225-231.
7. Задорожний, Р.Н., Романов, И.В., Шемберев, И.А. Исследование свойств металлических порошков, полученных из отходов твердых сплавов электроэрозионным диспергированием // Труды ГОСНИТИ. - 2018. - Т. 130. - С. 208-213.
8. Агеев, Е.В., Латыпова, Г.Р., Давыдов, А.А., Агеева, Е.В. Проведение рентгеноспектрального микроанализа твердосплавных электроэрозионных порошков // Известия Юго-Западного государственного университета. - 2012. - № 5-2 (44). - С. 099-102.
9. Агеев, Е.В., Семенихин, Б.А., Латыпов, Р.А. Метод получения наноструктурных порошков на основе системы WC-Co и устройство для его осуществления // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. - 2010. - № 5 (283). - С. 39-42.
10. Порошки, полученные электроэрозионным диспергированием отходов твердых сплавов - перспективный материал для восстановления деталей автотракторной техники / Агеев, Е.В., Гадалов, В.Н., Агеева, Е.В., Бобрышев, Р.В. // Известия Юго-Западного государственного университета. - 2012. - № 1-1 (40). - С. 182-189.

Д.П. Ерутин, Е.В. Борисов, А.А. Попович, В.Ш. Суфияров  
Санкт–Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Санкт–Петербург, Россия, [erutin@inbox.ru](mailto:erutin@inbox.ru)

## ИССЛЕДОВАНИЕ АМОРФНОГО И НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО ПОРОШКОВ НА ОСНОВЕ ЖЕЛЕЗА

### Аннотация

В работе рассмотрены физико-технологические и магнитные свойства, фазовый состав и термодинамические характеристики кристаллизации аморфной фазы ферромагнитных порошков на железной основе KUAMET NC1 и KUAMET 6B2. Получены данные о гранулометрическом составе, текучести, насыпной и пикнометрической плотностях порошков, их фазовом составе, температурных интервалах и энтальпиях кристаллизации аморфной фазы, а также данные о форме петли магнитного гистерезиса, значениях коэрцитивной силы и намагниченности насыщения.

*Ключевые слова:* аморфный порошок, аморфная фаза, нанокристаллический порошок, аддитивные технологии.

### Введение

Одним из наиболее актуальных на данный момент направлений использования аддитивных технологий является селективное лазерное плавление объемных аморфных магнитомягких сплавов. Аморфными называют твердые материалы, в которых отсутствует дальний порядок в расположении атомов [1]. Подобное состояние материала достигается при больших скоростях охлаждения из жидкого состояния за счет фиксации атомов в положениях, в которых они находились в расплаве. Аморфный металлический материал (металлическое стекло) не обладает кристаллической решеткой, из-за чего в его атомной структуре отсутствуют дефекты кристаллического строения (вакансии, дислокации и т. д.), являющиеся причиной анизотропии его свойств. Благодаря данным особенностям структуры аморфные сплавы обладают повышенной прочностью, коррозионной стойкостью и электрическим сопротивлением.

В процессе селективного лазерного плавления (далее – СЛП) на металлическую подложку или заранее изготовленную часть изделия наносится слой порошка толщиной 20–60 мкм, проплаваемый затем лазером, после чего новый слой порошка наносится на уже затвердевший слой материала [2,3]. Свойства исходного порошка во многом определяют качество получаемых в процессе СЛП изделий и их конечные свойства. В связи с этим изучение металлических порошков, используемых в дальнейшем для производства изделий селективным лазерным плавлением, является крайне важной исследовательской задачей.

Целью данной работы было исследование физико–технологических и магнитных свойств, фазового состава и характеристик фазовых превращений порошков KUAMETNC1 и KUAMET 6B2.

## Методы

Определение текучести порошков проводили с использованием ISO 4490 «Метод определения текучести металлических порошков с помощью воронки Холла» [4]. Измерения насыпной плотности выполнялись засыпанием порошка в воронку, из которой он вытекал в чашку объема 25 см<sup>3</sup>. После заполнения чашки воронка отодвигалась и излишки порошка выравнивались с помощью шпателя. Насыпная плотность определялась путем взвешивания порошка в чашке в граммах и делении на 25 см<sup>3</sup>. Определение пикнометрической плотности порошков осуществлялось по ГОСТ 22662–77 [5].

Гранулометрический состав порошков определялся методом лазерной дифракции на установке Analysette 22 NanoTec plus (Fritsch, Germany) с общим диапазоном измерений 0,01–2000 мкм.

Внешний вид частиц порошковых материалов изучали с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) Tescan Mira3.

Температурные интервалы фазовых превращений порошков изучали с использованием дифференциального сканирующего калориметра (ДСК) Q2000 (TA Instruments), оснащенного автоматическим пробоотборником, системой охлаждения RCS90 и технологией выравнивания базовой линии T-zero. Исследуемые образцы нагревались в потоке аргона до температуры 1000°C со скоростью нагрева 20°C/мин.

Фазовый состав анализировали с помощью рентгеновского дифрактометра (XRD) Bruker D8 Advance с использованием CuK $\alpha$  (1 1/4 1,5418 Å) облучения.

Измерения зависимостей намагниченности образцов от величины приложенного магнитного поля проводились на вибрационном магнитометре Фонера модели LakeShore VSM 7410 (Lake Shore Cryotronics, Inc. США) при комнатной температуре (24°C) в интервале полей от –18000 до 18000 Эрстед.

## Результаты и обсуждение

Химические составы порошковых материалов представлены в таблице 1.

В порошках KUAMET NC1 и KUAMET 6B2 (рисунок 1., а, б) встречаются вытянутые, а также мелкие частицы, налипшие на более крупные.

Результаты исследования гранулометрического состава порошков представлены в таблице 2.

Результаты исследования физико-технологических свойств металлических порошков представлено в таблице 3.

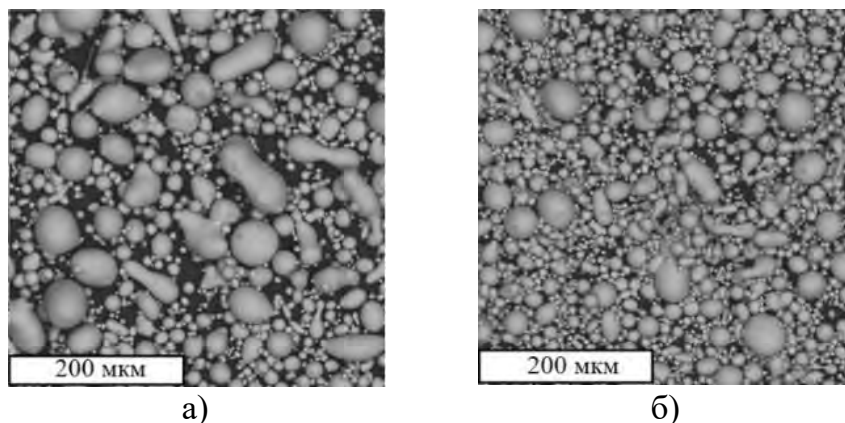


Рисунок 1 – СЭМ – изображения порошков KUAMET NC1 (а) и KUAMET 6B2 (б)



Таблица 1 – Химические составы порошков

Материал	C, %	Si, %	Cr, %	B, %	Cu, %	Nb, %	Fe, %
KUAMET NC1	0,03	7,62	0,02	2,01	1,27	5,64	Ост.
KUAMET 6B2	0,76	6,80	2,52	2,48	–	–	Ост.

Таблица 2 – Распределение частиц по размерам исследуемых порошковых материалов

Материал	d10, мкм	d50, мкм	d90, мкм
KUAMET NC1	11,0	25,3	49,1
KUAMET 6B2	9,5	22,9	44,9

Таблица 3 – Физико–технологические свойства исследуемых порошков

Материал	Текучесть, с/50г	Насыпная плотность, г/см <sup>3</sup>	Пикнометрическая плотность, г/см <sup>3</sup>
KUAMET NC1	не течет	4,170	6,775
KUAMET 6B2	4,6	4,208	6,892

Гранулометрический состав и физико–технологические свойства исследуемых порошков соответствуют практике использования аналогичных порошковых материалов в селективном лазерном плавлении [6, 7].

Фазовый состав порошков был определен методом рентгеноструктурного анализа. Дифрактограммы исследованных порошков представлены на рисунке 2 (а, б).

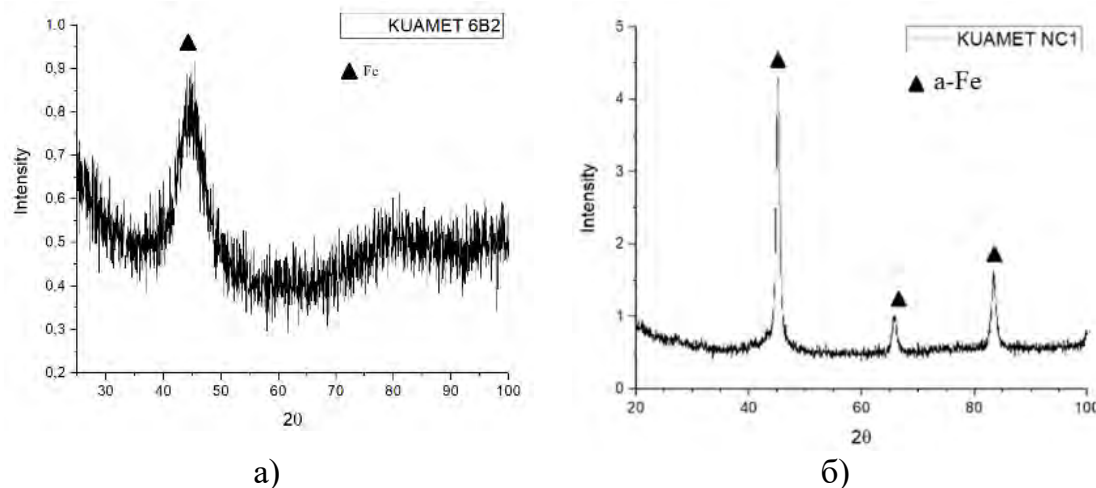


Рисунок 2 – Дифрактограммы порошков KUAMET 6B2 (а) и KUAMETNC1 (б)

Полученные дифрактограммы свидетельствуют о том, что порошок KUAMET 6B2 является рентгеноаморфным, а порошок KUAMETNC1 содержит кристаллы  $\alpha$ -Fe.

На рисунке 3 (а, б) представлены результаты исследования порошковых материалов методом ДСК. На каждой кривой наблюдаются пики, свидетельствующие о фазовых превращениях при нагреве и связанные с кристаллизацией аморфной фазы.

Температурные интервалы кристаллизации аморфной фазы при нагреве и величины энтальпии кристаллизации аморфной фазы представлены в таблице 4. Кристаллизация аморфной фазы каждого из порошков проходит в два этапа, о чем свидетельствуют кривые на рисунке 3 (а, б), каждая из которых характеризуется

двумя пиками, либо одним дуплетным пиком. Данная информация свидетельствует о последовательной кристаллизации двух разных фаз из аморфной матрицы. Температуры начала кристаллизации позволят в дальнейшем определить, какая фаза кристаллизуется в первую очередь, что поможет в случае обнаружения данной фазы в образцах корректировать параметры процесса селективного лазерного плавления таким образом, чтобы температура в зоне термического влияния не превышала температуру начала кристаллизации обнаруженной первичной фазы. При реализации данных мер образование кристаллической фазы будет свидетельствовать о недостаточной скорости охлаждения.

Кривые намагничивания порошков представлены на рисунке 4 (а, б).

Магнитные свойства порошков представлены в таблице 5.

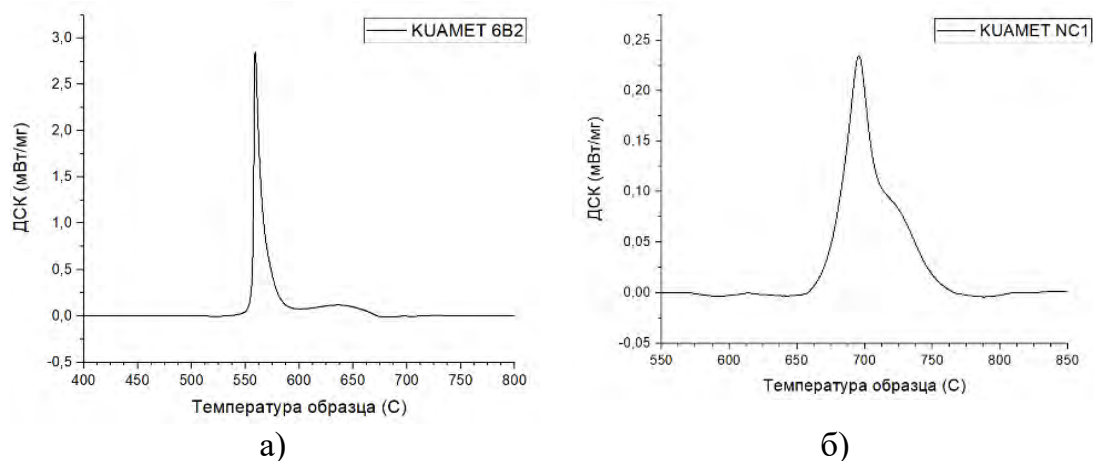


Рисунок 3 – ДСК–кривые нагрева порошков KUAMET 6B2 (а) и KUAMETNC1 (б)

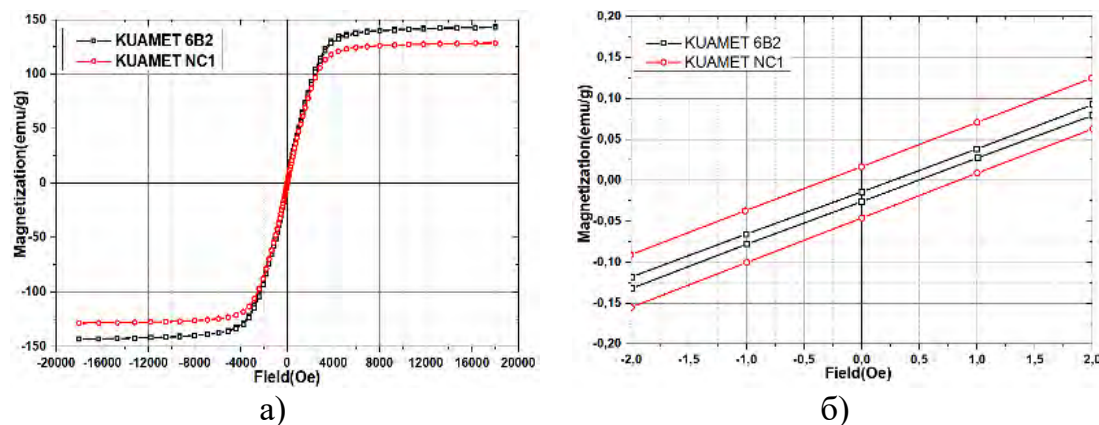


Рисунок 4 – Кривые намагничивания порошков KUAMET NC1 и KUAMET 6B2: а – общий вид кривых намагничивания, б – увеличенная область для оценки коэрцитивной силы

Таблица 4 – Характеристики кристаллизации аморфной фазы в исследованных порошках

Материал	$T_n$ , °C	$T_k$ , °C	$H_a$ , Дж/г
KUAMET NC1	650	790	26,232
KUAMET 6B2	520	680	110,259

Таблица 5 – Магнитные свойства исследованных порошков

Материал	Коэрцитивная сила, Э	Намагниченность насыщения, етu/g
KUAMET NC1	0,50	127
KUAMET 6B2	0,37	144

Оба порошка обладают высоким уровнем магнитомягких свойств, однако порошок KUAMET 6B2 характеризуется меньшим значением коэрцитивной силы и большей намагниченностью насыщения, что связано как с его химическим составом, так и с его полной аморфностью.

### Заключение

Физико-технологические свойства исследованных порошков KUAMETNC1 и KUAMET 6B2 соответствуют практике использования аналогичных порошковых материалов в процессе селективного лазерного плавления. Порошок KUAMETNC1 содержит кристаллы  $\alpha$ -Fe и аморфную фазу, а порошок KUAMET 6B2 полностью аморфен, о чем свидетельствуют данные рентгеноструктурного анализа и дифференциальной сканирующей калориметрии. Кристаллизация аморфной фазы происходит в порошке KUAMETNC1 в интервале температур 650–790 °С, а в порошке KUAMET 6B2 – в интервале температур 520–680 °С. Оба порошка обладают высокими магнитными свойствами, однако порошок KUAMET 6B2 демонстрирует меньшую коэрцитивную силу и большую намагниченность насыщения.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Suzuki, K., Hujimori, H., Hashimoto, K. Amorphous metals. Edited by Masumoto Ts. Trans. from Japan. Moscow: Metallurgy, 1987, 328.
2. Safia, A., Rima, D., Nouredine, F. Effect of the Laser Scan Rate on the Microstructure, Magnetic Properties, and Microhardness of Selective Laser-Melted FeSiB. J. Supercond. Nov. Magn. 2018, 31, 3565-3567.
3. Sufiiarov, V.S.; Popovich, A.A.; Borisov, E.V.; Polozov, I.A. Layer thickness influence on the inconel 718 alloy microstructure and properties under selective laser melting. Tsvetnye Met. 2016, 1, 81-86.
4. DIN EN ISO 4490-2018, Deutsches Institut fur Normung e. V.
5. ГОСТ 22662-77. Порошки металлические. Методы седиментационного анализа [Текст]; введ. 01-01-1979.-Москва: Изд-востандартов, 2001.-8с.
6. Hyo Yun Jung; Su Ji Choi; Konda G. P.; Mihai S.; Sergio S.; Seonghoon Yi; Uta K.; Do Hyang Kim; Ki Buem Kim; Jürgen E. Fabrication of Fe-based bulk metallic glass by selective laser melting: A parameter study. Mater. Des. 2015, 86, 703-708.
7. Shuohong, Gao; Xingchen, Yan; Cheng, Chang; Eric, A.; Pengjiang, He; Min, Liu; Hanlin, Liao; Nouredine F.; Microstructure and magnetic properties of FeSiBCrC soft magnetic alloy manufactured by selective laser melting, Mater. Lett. 2021, 290, 129469.

М.С. Королев, Е.В. Агеев  
Юго-Западный государственный университет, Курск, Россия, [ageev\\_ev@mail.ru](mailto:ageev_ev@mail.ru)

## **ФАЗОВЫЙ СОСТАВ ТВЕРДОСПЛАВНЫХ ПОРОШКОВ, ПОЛУЧЕННЫХ ЭЛЕКТРОДИСПЕРГИРОВАНИЕМ СПЛАВА Т5К10 В КЕРОСИНЕ**

### **Аннотация**

Представлены результаты исследования фазового состава электроэрозионных порошков, полученных из отходов сплава Т5К10 в осветительном керосине. Проведение данного исследования позволит решить проблему рециклинга отходов сплавов Т5К10 и дальнейшее их использование и, тем самым, снизить себестоимость производства конечного продукта.

*Ключевые слова:* отходы твердого сплава Т5К10, электроэрозионное диспергирование, керосин, порошок, фазовый состав.

### **Введение**

В настоящее время одной из основных проблем использования вольфрамсодержащих твердых сплавов является высокая стоимость вольфрама, титана и кобальта. Ввиду высокой температуры плавления твердых сплавов существует проблема их переработки для вторичного использования [1-4]. Одним из перспективных методов их переработки в порошки сферической формы является электроэрозионное диспергирование (ЭЭД) [5-10].

К настоящему времени в современной научно-технической литературе отсутствуют полноценные сведения об использовании диспергированных электроэрозией частиц сплава Т5К10 в качестве шихты для производства вольфрам-титано-кобальтовых сплавов и режущего инструменты из них. Для этих целей требуется проведение комплексных теоретических и экспериментальных исследований.

Целью работы является исследование фазового состава твердосплавных порошков, полученных электродиспергированием отходов сплава Т5К10 в осветительном керосине.

### **Методы**

Электродиспергирование отходов сплава Т5К10 в виде некондиционных пластин осуществляли в керосине осветительном на оригинальной установке (Патент РФ № 2449859) [11-15].

Анализ фазового состава частиц порошка проводили методом рентгеновской дифракции на дифрактометре «Rigaku Ultima IV» (Япония) в излучении  $\text{Cu-K}_\alpha$  (длина волны  $\lambda = 0,154178$  нм). Методика исследования фазового состава представлена в виде блок-схемы на рисунке 1.

### **Результаты и обсуждение**

Дифрактограмма фазового состава частиц твердосплавного порошка, полученного из отходов твердого сплава Т5К10, представлены на рисунке 2.

Анализ дифрактограммы фазового состава твердосплавного порошка, полученного из отходов твердого сплава Т5К10, показал, что наличие в составе

рабочей жидкости (керосин) углерода способствует образованию фаз карбидов, таких как TiC, WC.

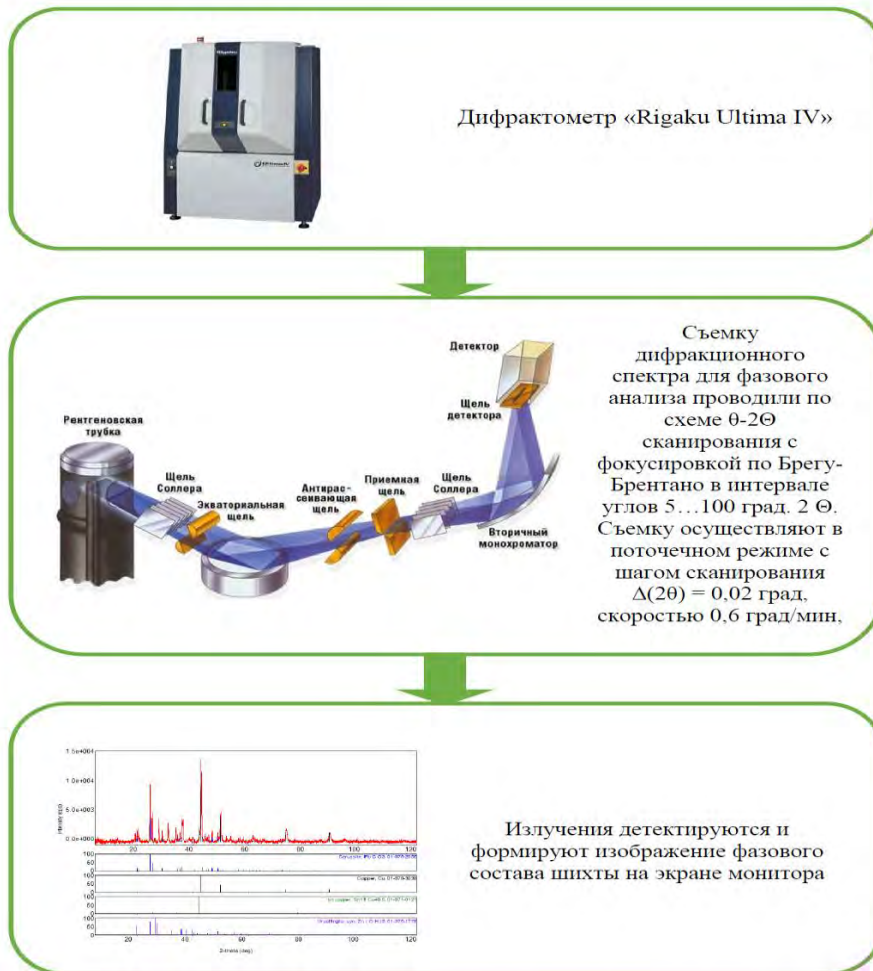


Рисунок 1 – Блок-схема методики исследования фазового состава порошка

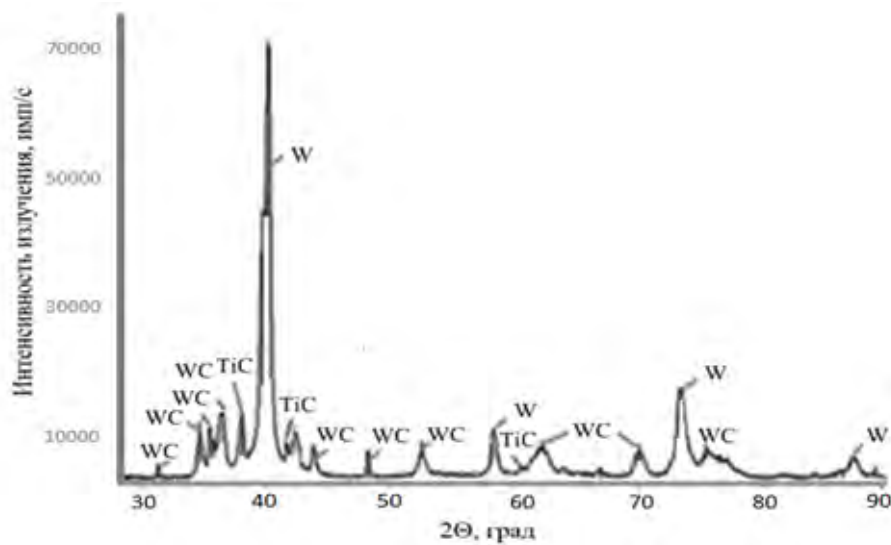


Рисунок 2 – Дифрактограмма фазового состава частиц твердосплавного порошка

## Заключение

Проведение намеченных мероприятий позволит решить проблему переработки отходов вольфрамо-титано-кобальтовых сплавов и повторное их использование при изготовлении режущего инструмента.

## БЛАГОДАРНОСТЬ

\*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-29-00123, <https://rscf.ru/project/22-29-00123/>.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ageeva, E.V. 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, E.A. Vorobiev, A.N. Novikov // Журналнано- электроннофизики. -2015. - Т. 7. - № 4. - С. 04058.
2. Latypov, R.A. Properties of the coatings fabricated by plasma-jet hard-facing by dispersed mechanical engineering wastes / R.A. Latypov, G.R. Latypova, E.V. Ageev, A.Y. Altukhov, E.V. Ageeva // Russian metallurgy (Metally). - 2018. - Т. 2018. - № 6. - С. 573-575.
3. Агеева, Е.В. Изучение формы и элементного состава порошка, полученного из вольфрамсодержащих отходов инструментальных материалов электроэрозионным диспергированием в водной среде / Е.В. Агеева, Е.В. Агеев, В.Ю. Карпенко // Упрочняющие технологии и покрытия. - 2014. - № 4 (112). - С. 14-17.
4. Агеева, Е.В. Морфология и элементный состав медных электроэрозионных порошков, пригодных к спеканию / Е.В. Агеева, Н.М. Хорьякова, Е.В. Агеев // Вестник машиностроения. - 2014. - № 10. - С. 66-68.
5. Латыпов, Р.А. Исследование алюминиевого порошка, полученного методом электроэрозионного диспергирования в дистиллированной воде / Р.А. Латыпов, Е.В. Агеев, Е.В. Агеева, Е.П. Новиков // Все материалы. Энциклопедический справочник. - 2016. - № 4. - С. 19-22.
6. Хорьякова, Н.М. Электроэрозионные медные порошки для гальванических покрытий / Н.М. Хорьякова, Е.В. Агеев, Е.В. Агеева // Упрочняющие технологии и покрытия. - 2014. - № 4 (112). - С. 18-20.
7. Агеев, Е.В. Гранулометрический и фазовый составы порошка, полученного из вольфрамсодержащих отходов инструментальных материалов электроэрозионным диспергированием в керосине / Е.В. Агеев, Е.В. Агеева, Е.А. Воробьев // Упрочняющие технологии и покрытия. - 2014. - № 4 (112). - С. 11-14.
8. Агеева, Е.В. Оценка износостойкости электроискровых покрытий, полученных с использованием электроэрозионных порошков быстрорежущей стали / Е.В. Агеева, Р.А. Латыпов, Е.В. Агеев, А.Ю. Алтухов, В.Ю. Карпенко // Известия высших учебных заведений. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. - 2015. - № 1. - С. 71-76.
9. Агеева, Е.В. Быстрорежущая сталь, диспергированная в керосине / Е.В. Агеева, Е.В. Агеев, Е.А. Воробьев, М.А. Зубарев // Известия Юго-Западного государственного университета. - 2014. - № 5 (56). - С. 21-25.
10. Агеев, Е.В. Исследование микротвердости порошков, полученных электроэрозионным диспергированием твердого сплава / Е.В. Агеев, Б.А. Семенихин, Р.А. Латыпов // Вестник Федерального государственного образовательного

учреждения высшего профессионального образования "Московский государственный агроинженерный университет имени В.П. Горячкина". - 2011. - № 1 (46). - С. 78-80.

11. Латыпов, Р.А. Разработка и исследование твердосплавных изделий из порошков, полученных электроэрозионным диспергированием вольфрамсодержащих отходов / Р.А. Латыпов, Г.Р. Латыпова, Е.В. Агеев, А.А. Давыдов // Международный научный журнал. - 2013. - № 2. - С. 107-112.

12. Латыпов, Р.А. Свойства порошков из отходов твердых сплавов ВК8 и Т15К6, полученных методом электроэрозионного диспергирования / Р.А. Латыпов, А.Б. Коростелев, Е.В. Агеев, Б.А. Семенихин // Все материалы. Энциклопедический справочник. - 2010. - № 7. - С. 2-6.

13. Агеева, Е.В. Исследование формы и морфологии электроэрозионных медных порошков, полученных из отходов / Е.В. Агеева, Н.М. Хорьякова, Е.В. Агеев // Вестник машиностроения. - 2014. - № 8. - С. 73-75.

14. Агеев, Е.В. Исследование гранулометрического состава порошков, полученных электроэрозионным диспергированием твердого сплава и используемых при восстановлении и упрочнении деталей автотракторной техники / Е.В. Агеев, В.Н. Гадалов, В.И. Серебровский, Б.А. Семенихин, Е.В. Агеева, Р.А. Латыпов, Ю.П. Гнездилова // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. - 2010. - № 4. - С. 76-79.

15. Новиков, Е.П. Изучение формы и морфологии порошка, полученного из отходов алюминия методом электроэрозионного диспергирования / Е.П. Новиков, Е.В. Агеева, Д.А. Чумак-Жунь // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. - 2015.- № 4 (17). - С. 13-17.

Е.А. Бобков, Е.В. Агеева  
Юго-Западный государственный университет,  
Курск, Россия, [ageeva-ev@yandex.ru](mailto:ageeva-ev@yandex.ru)

## **РЕНТГЕНСПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ НИКЕЛЬХРОМОВОГО СПЛАВА Х20Н80, СПЕЧЕННОГО ИЗ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННЫХ ПОРОШКОВ, ПОЛУЧЕННЫХ В ВОДЕ**

### **Аннотация**

Представлены результаты изучения элементного состава никельхромового сплава Х20Н80, спеченного из электроэрозионных порошков, полученных в воде. Проведенные исследования позволят определить наиболее рациональную область практического применения новых никельхромовых сплавов.

*Ключевые слова:* отходы жаропрочного сплава Х20Н80, электроэрозионное диспергирование, вода, порошок, элементный состав.

### **Введение**

Один из самых востребованных и широко распространенных сплавов в электротермии является сплав Х20Н80. Данный сплав обладает высокими показателями стойкости при воздействии высоких температур и не изменяет своих физико-химических характеристик в агрессивных средах. Помимо того, данный сплав обладает высоким электросопротивлением, которое этот сплав сохраняет в условиях высоких температур. В своем составе этот сплав содержит дорогостоящие компоненты, такие как хром и никель, поэтому остро стоит проблема вторичного использования данного сплава. Одним из недостаточно изученных способов измельчения металлоотходов в дисперсные частицы является электродиспергирование [1-5], который ранее не использовался для переработки нихромовых сплавов. Для разработки технологических рекомендаций по переработке металлоотходов сплава Х20Н80 электродиспергированием мелкодисперсные частицы с целью их повторного использования требуется проведение металлографических исследований [6-10].

Целью работы являлось изучения элементного состава никельхромового сплава Х20Н80, спеченного из электроэрозионных порошков, полученных в воде.

### **Методы**

Поставленные в работе задачи решались с использованием современного оборудования и взаимодополняющих методов физического материаловедения, в том числе: электродиспергирование металлоотходов осуществляли на экспериментальной установке (Патент РФ № 2449859) [11-15]; сплавление электроэрозионной шихты осуществляли в системе SPS 25-10 «Thermal Technology» (США); механическую обработку образцов сплавов проводили на автоматическом высокоточном настольном отрезном станке «Accutom-5» (Дания) и шлифовально-полировальном станке «LaboPol-5» (Дания);

Элементный состав сплавов исследовали путем проведения рентгеноспектрального микроанализа на энергодисперсионном анализаторе рентгеновского излучения фирмы «EDAX» (Нидерланды), встроенном в растровый



электронный микроскоп «QUANTA 200 3D» (Нидерланды). Блок-схема методики проведения анализа элементного состава сплавов представлена на рисунке 1.



Рисунок 1 – Блок-схема методики рентгеноспектрального микроанализа сплавов

### Результаты и обсуждение

На рисунке 2 представлена спектрограмма элементного состава нихромового сплава.

Анализ элементного состава исследуемых сплавов показал наличие следующих основных элементов: O, Fe, Ni и Cr.

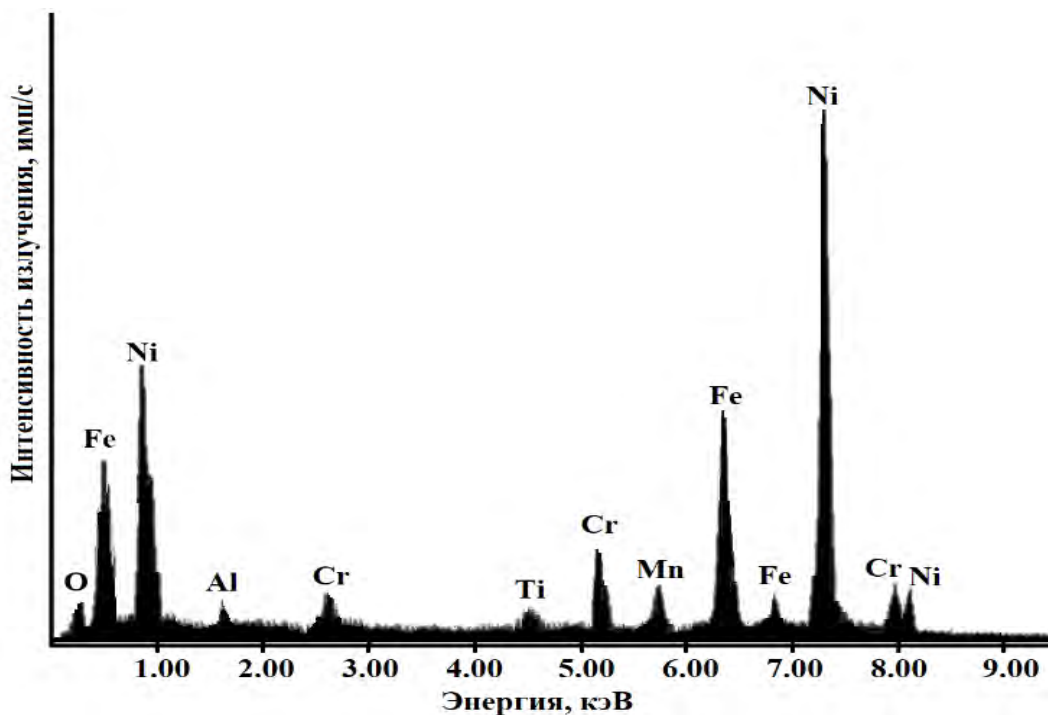


Рисунок 2 – Спектрограмма элементного состава никельхромового сплава

### Заключение

Проведенные исследования позволят определить наиболее рациональную область практического применения новых никельхромовых сплавов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Латыпов, Р.А. Исследование алюминиевого порошка, полученного методом электроэрозионного диспергирования в дистиллированной воде / Р.А. Латыпов, Е.В. Агеев, Е.В. Агеева, Е.П. Новиков // Все материалы. Энциклопедический справочник. - 2016. - № 4. - С. 19-22.
2. Латыпов, Р.А. Разработка и исследование твердосплавных изделий из порошков, полученных электроэрозионным диспергированием вольфрамсодержащих отходов / Р.А. Латыпов, Г.Р. Латыпова, Е.В. Агеев, А.А. Давыдов // Международный научный журнал. - 2013. - № 2. - С. 107-112.
3. Латыпов, Р.А. Свойства порошков из отходов твердых сплавов ВК8 и Т15К6, полученных методом электроэрозионного диспергирования / Р.А. Латыпов, А.Б. Коростелев, Е.В. Агеев, Б.А. Семенихин // Все материалы. Энциклопедический справочник. - 2010. - № 7. - С. 2-6.
4. Latypov, R.A. Properties of the coatings fabricated by plasma-jet hard-facing by dispersed mechanical engineering wastes / R.A. Latypov, G.R. Latypova, E.V. Ageev, A.Y. Altukhov, E.V. Ageeva // Russian metallurgy (Metally). - 2018. - Т. 2018. - № 6. - С. 573-575.
5. Хорьякова, Н.М. Электроэрозионные медные порошки для гальванических покрытий / Н.М. Хорьякова, Е.В. Агеев, Е.В. Агеева // Упрочняющие технологии и покрытия. - 2014. - № 4 (112). - С. 18-20.
6. Новиков, Е.П. Изучение формы и морфологии порошка, полученного из отходов алюминия методом электроэрозионного диспергирования / Е.П. Новиков, Е.В. Агеева, Д.А. Чумак-Жунь // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. - 2015. - № 4 (17). - С. 13-17.

7. Ageeva, E.V. 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, E.A. Vorobiev, A.N. Novikov // Журнал нано- и электронной физики. -2015. - Т. 7. - № 4. - С. 04058.

8. Агеева, Е.В. Морфология и элементный состав медных электроэрозионных порошков, пригодных к спеканию / Е.В. Агеева, Н.М. Хорьякова, Е.В. Агеев // Вестник машиностроения. - 2014. - № 10. - С. 66-68.

9. Агеев, Е.В. Гранулометрический и фазовый составы порошка, полученного из вольфрамсодержащих отходов инструментальных материалов электроэрозионным диспергированием в керосине / Е.В. Агеев, Е.В. Агеева, Е.А. Воробьев // Упрочняющие технологии и покрытия. - 2014. - № 4 (112). - С. 11-14.

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

11. Агеева, Е.В. Быстрорежущая сталь, диспергированная в керосине / Е.В. Агеева, Е.В. Агеев, Е.А. Воробьев, М.А. Зубарев // Известия Юго-Западного государственного университета. - 2014. - № 5 (56). - С. 21-25.

12. Агеев, Е.В. Исследование микротвердости порошков, полученных электроэрозионным диспергированием твердого сплава / Е.В. Агеев, Б.А. Семенихин, Р.А. Латыпов // Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования "Московский государственный агроинженерный университет имени В.П. Горячкина". - 2011. - № 1 (46). - С. 78-80.

13. Агеева, Е.В. Исследование формы и морфологии электроэрозионных медных порошков, полученных из отходов / Е.В. Агеева, Н.М. Хорьякова, Е.В. Агеев // Вестник машиностроения. - 2014. - № 8. - С. 73-75.

14. Агеев, Е.В. Исследование гранулометрического состава порошков, полученных электроэрозионным диспергированием твердого сплава и используемых при восстановлении и упрочнении деталей автотракторной техники / Е.В. Агеев, В.Н. Гадалов, В.И. Серебровский, Б.А. Семенихин, Е.В. Агеева, Р.А. Латыпов, Ю.П. Гнездилова // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. - 2010. - № 4. - С. 76-79.

15. Агеева, Е.В. Изучение формы и элементного состава порошка, полученного из вольфрамсодержащих отходов инструментальных материалов электроэрозионным диспергированием в водной среде / Е.В. Агеева, Е.В. Агеев, В.Ю. Карпенко // Упрочняющие технологии и покрытия. - 2014. - № 4 (112). - С. 14-17.

Е.В. Волокитина, Н.Г. Разумов, А.А. Попович,  
Д.В. Масайло, М.А. Ковалев, В.К. Шевчук  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Санкт-Петербург, Россия, [volokitina1606@gmail.com](mailto:volokitina1606@gmail.com)

## РЕМОНТ И ВОССТАНОВЛЕНИЕ ИЗДЕЛИЙ МЕТОДОМ ПРЯМОГО ЛАЗЕРНОГО ВЫРАЩИВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПОРОШКА ВЫСОКОЭНТРОПИЙНОГО СПЛАВА

### Аннотация

В данной работе представлены результаты исследований возможности восстановления изделий методом прямого лазерного выращивания с использованием порошка высокоэнтропийного сплава (ВЭС). В ходе исследований отработаны режимы получения порошка ВЭС с однофазной ГЦК-решеткой и прямого лазерного выращивания, проведено восстановление прототипа изделия. Нанесенный материал характеризуется твердостью 217,6 HV, меньшей на 22% потерей веса при испытании на анодную растворимость, чем материал изделия.

*Ключевые слова:* высокоэнтропийный сплав, прямое лазерное выращивание, твердое и коррозионностойкое покрытие, восстановление поверхности изделий.

### Введение

В настоящее время аддитивные технологии все больше внедряются в технологические процессы в различных отраслях промышленности. Это происходит за счет ряда преимуществ перед традиционными технологиями нет необходимости изготавливать оснастку под каждое конкретное изделие и использовать дополнительные приспособления для производства. Изготовление изделий проводится по трехмерной САД-модели, существует возможность быстрого внесения изменений в конфигурацию изготавливаемой детали, что влияет на гибкость и универсальность технологии. Оборудование, работающее по принципу прямого лазерного выращивания, в своем составе имеет наплавочную головку, которая обеспечивает фокусировку лазерного луча и газопорошковой струи, порталной системы для перемещения наплавочной головки, шпинделя для вращения изделия. Качество изготавливаемых деталей зависит от технологических параметров процесса, а именно: скорости перемещения наплавочной головки относительно подложки, мощности лазерного излучения, количество подаваемого порошка.

При выборе материала для восстановления изделий стоит отметить относительно новый класс материалов – ВЭС. Активное изучение многокомпонентных сплавов началось с 2004 года с работ Кантора [1] и Йе [2], в которых были описаны исследования многокомпонентных сплавов с содержанием элементов близком к эквиполному, которые были названы «высокоэнтропийными сплавами». Из большого количества полученных с 2004 года сплавов выделялись композиции на основе сплава FeCrMnNiCo [3]. Данный сплав обладает высокой прочностью и пластичностью, особенно при криогенных и комнатных температурах [4, 5]. При низких температурах отмечается высокая степень деформационного упрочнения из-за наноразмерного двойникования, вызванного деформацией. Также существуют работы по изучению влияния увеличения содержания различных

элементов в данной композиции. Увеличение концентраций Co и Cr действительно снижает энергию дефекта упаковки и стабильность ГЦК. Прочность на растяжение или пластичность сплавов с высоким содержанием Co превосходили эквивалентные или богатые Fe неэквивалентные ВЭС системы FeCrMnNiCo [6].

В данной работе для восстановления изделий использовали ВЭС Co-Cr-Fe-NiMn-W<sub>0,25</sub>.

### Методы

В качестве исходных компонентов для синтеза ВЭС использовали элементные порошки: Cr марки ПХ1, W марки ПВТ, Fe марки ПЖВ2, Co марки ПК-1у, Ni марки ПНЭ-2, Mn марки МН997. Механическое легирование (МЛ) ВЭС проводили с использованием атритора Union Process SD-5 при следующих параметрах: скорость вращения ворошителя – 270 об/мин, масса навески – 2кг, соотношение массы шаров к массе порошка – 15:1, продолжительность МЛ – 10, 15, 20 и 25 часов. Порошки, полученные МЛ, сфероидизировали в потоке термической плазмы с использованием установки индукционной плазменной сфероидизации Tekna ТЕК-15. В качестве плазмообразующего газа использовалась аргон-водородная смесь.

Отработка режима наплавки и дальнейшие работы по восстановлению изделий осуществлялась с использованием установки прямого лазерного выращивания Raucham (пр-во КНР) с максимальной мощностью лазера 6 кВт, предназначенная для ремонта и восстановления, а также нанесения покрытий на тела вращения. Наплавка происходила с непрерывным потоком защитного газа аргона непосредственно в зону плавления.

Фазовый состав определяли методом рентгенофазового анализа на установке Brucker D8 Advance в медном K $\alpha$ -излучении ( $\lambda = 0,15418$  нм). Обработку дифракционных данных осуществляли по методу Ритвельда с использованием программы Diffrac Plus Topas фирмы BRUKER.

Структуру и распределение элементов по сечению полученных образцов исследовали с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) Mira 3 Tescan с приставкой EDX для рентгеновского энергодисперсионного микроанализа.

### Результаты и обсуждение

В процессе МЛ ВЭС CoCrFeNiMnW<sub>0,25</sub> в атриторе в течение 15 часов, получен порошок с гомогенным распределением элементов с единичными пластинчатыми включениями вольфрама, хрома, железа толщиной менее 1 мкм, с гранулометрическим составом после МЛ:  $d_{10} = 18.8$  мкм,  $d_{50} = 52.4$  мкм,  $d_{90} = 116.7$  мкм. При дальнейшем увеличении длительности МЛ частицы порошка переизмельчаются, что нежелательно для аддитивного производства, так как мелкие частицы могут создавать облако пыли и забивать сопла.

С помощью СЭМ установлено, что порошки после сфероидизации имеют равномерное распределение химических элементов по сечению. В некоторых частицах присутствуют поры, что может быть связано с выделением растворенных газов или образованием воды в результате восстановления оксидов водородом плазмообразующего газа. При исследовании фазового анализа сплава после плазменной сфероидизации обнаружено, что в результате переплава частиц порошка в потоке плазмы образуется однофазный порошок с ГЦК-решеткой (рисунок 1).

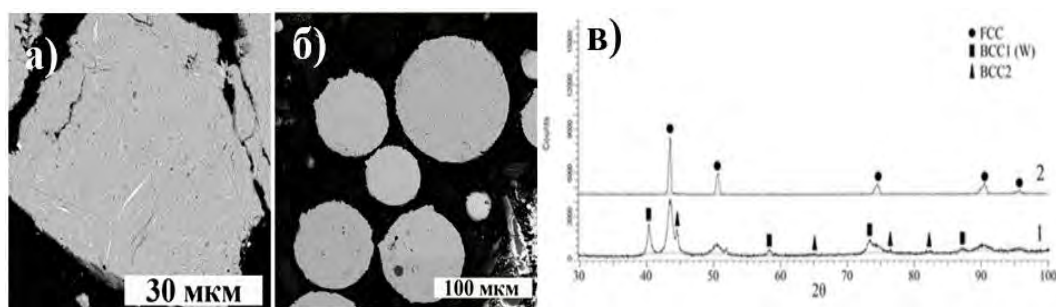


Рисунок 1 – Микроструктура частицы порошка после 15 часов МЛ (а); микроструктура порошка после сфероидизации (б); фазовый состав порошка ВЭС  $\text{CoCrFeNiMnW}_{0.25}$  (в): после МЛ – 1, после сфероидизации – 2

При обработке режима прямого лазерного выращивания варьировались следующие технологические параметры:

- скорость перемещения: 600, 720, 960 мм/с
- мощность лазера: 800, 900, 1000 Вт

Остальные параметры, такие как количество подаваемого порошка, скорость защитного и транспортирующего газа оставались неизменными. На рисунке 2 представлены шлифы в поперечном направлении.

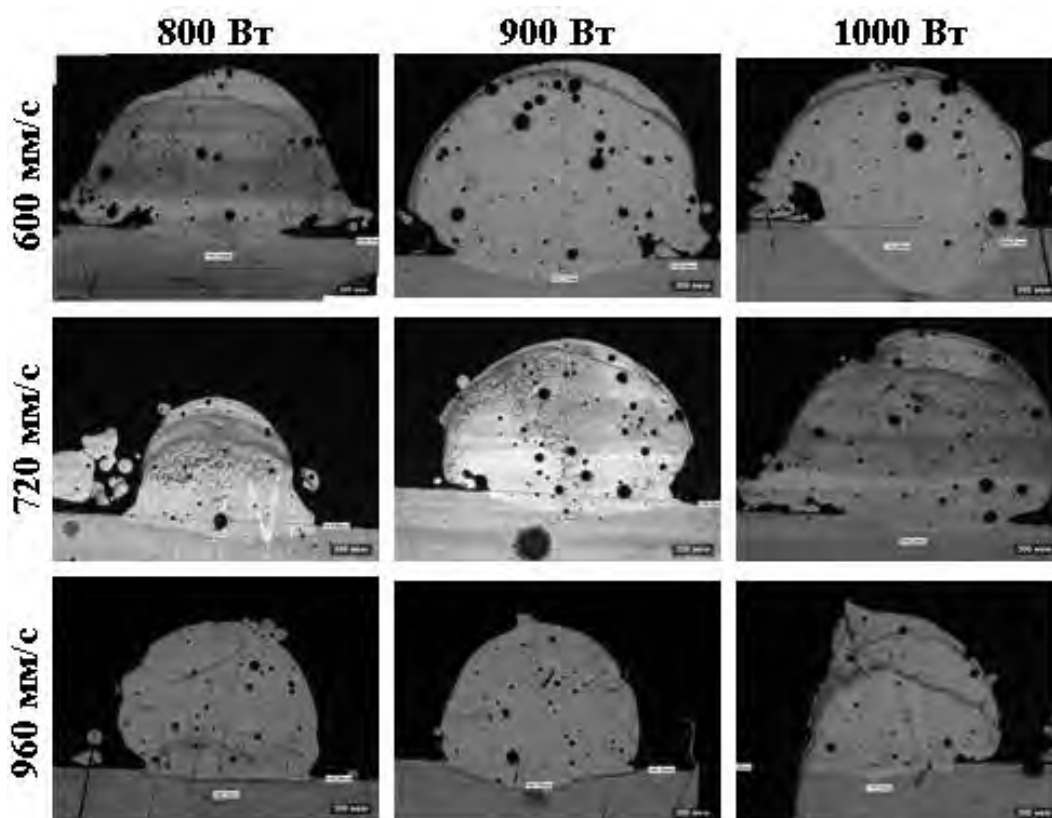


Рисунок 2 – Изображение шлифов в поперечном направлении при различных режимах прямого лазерного выращивания

При обработке режима установлено, что наплавленный ВЭС образует металлическую связь с материалом подложки с образованием зоны диффузионного перемешивания. Оптимальным, с точки зрения пористости и формы трека является режим при скорости перемещения 720 мм/с и мощности лазера 800 Вт.

В качестве прототипа изделия использовалась искусственно поврежденная труба из сплава 12X18H10T диаметром 100 мм (рисунок 3 а).

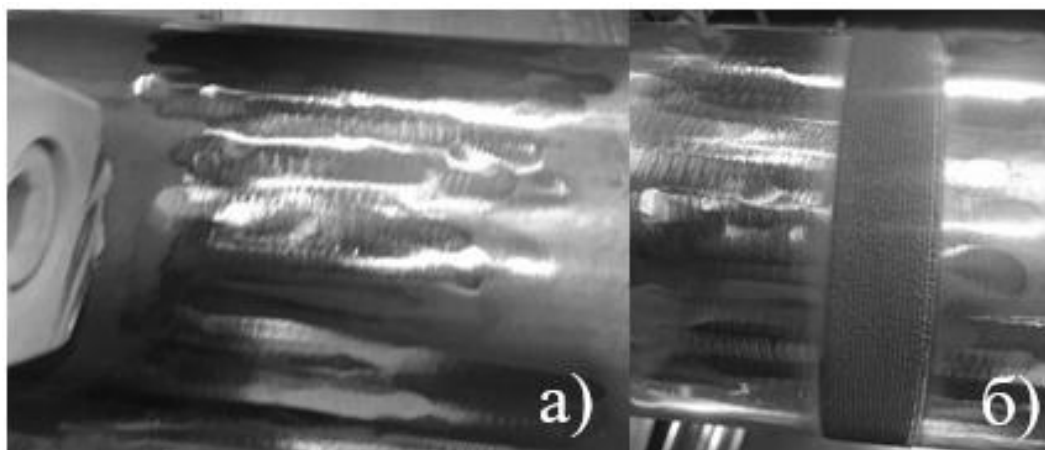


Рисунок 3 – Поверхность трубы: а – с искусственными повреждениями; б - восстановленная использованием порошка ВЭС CoCrFeNiMnW<sub>0.25</sub> поверхность трубы

Испытания на коррозионную стойкость восстановленной части трубы проводились методом определения анодной растворимости материалов в растворе серной кислоты плотностью 1,43 г/см<sup>3</sup>. Испытания проводились с двух сторон трубы. В первой серии испытаний изолировалась часть стальной трубы без покрытия и определялась коррозионная стойкость покрытия с ВЭСом, во второй серии испытаний участок с покрытием изолировался и испытание проводилось на материале стальной трубы. Результаты испытаний представлены в таблице 2.

Таблица 1 – Результаты испытаний на коррозионную стойкость методом определения анодной растворимости ВЭС и материала стальной трубы

ВЭС				
Масса образца, г	Потеря массы, г	Потеря массы, %	Ток, А	Плотность тока, А/см <sup>2</sup>
7,3258	0,0046	0,0628	0.3	0.1
7,3212	0,0071	0,0970	0.6	0.2
7,3141	0,0085	0,1162	0.9	0.3
Труба				
Масса образца, г	Потеря массы, г	Потеря массы, %	Ток, А	Плотность тока, А/см <sup>2</sup>
7,3056	0,0059	0,0808	0.3	0.1
7,2997	0,0091	0,1247	0.6	0.2
7,2906	0,0110	0,1509	0.9	0.3

Выявлено, что потеря массы ВЭСом на 22% ниже, чем материала трубы при плотности тока 0,1 А/см<sup>2</sup>.

Образцы восстановленной трубы, вырезанные в перпендикулярном и продольном направлении, были запрессованы в шлифы для измерения микротвердости. Микротвердость измерялась на микротвердомере Buehler по 10

точкам с нагрузкой 500 г и выдержкой 10 с. Результаты измерения представлены в таблице 2.

Можно отметить, что твердость покрытия превышает твердость трубы на 34%.

Таблица 2 – Результаты измерения микротвердости ВЭСа и трубы

	ВЭС		Труба
	Продольно	Перпендикулярно	
Среднее, HV	217.6	215.6	162.2

### Заключение

Получены порошки ВЭС методом МЛ, характеризующиеся структурой однофазного ГЦК твердого раствора. Отработаны режимы наплавки одиночных и объемных элементов из порошка ВЭС на стальную подложку, установлено, что данные элементы имеют однофазную ГЦК-решетку, однородный химический состав по сечению и металлическую связь с материалом подложки с зоной диффузионного перемешивания. Отмечается в объемных образцах насыщение первого слоя химическими элементами материалом подложки

Исследования коррозионной стойкости показали, что потеря веса ВЭСом на 22% меньше, чем материала трубы при плотности тока  $0,1 \text{ А/см}^2$ . Результаты измерения микротвердости показали, что твердость ВЭС превышает твердость трубы на 34%.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. B. Cantor, I. T. H. Chang, P. Knight, and A. J. B. Vincent, "Microstructural development in equiatomic multicomponent alloys," *Materials Science and Engineering A*, vol. 375–377, no. 1-2 SPEC. ISS., pp. 213-218, Jul. 2004.
2. J. W. Yeh et al., "Nanostructured high-entropy alloys with multiple principal elements: Novel alloy design concepts and outcomes," *Advanced Engineering Materials*, vol. 6, no. 5, pp. 299–303, 2004.
3. Z. Li, S. Zhao, R. O. Ritchie, and M. A. Meyers, "Mechanical properties of high-entropy alloys with emphasis on face-centered cubic alloys," *Progress in Materials Science*, vol. 102, no. March 2018, pp. 296-345, 2019.
4. A. Gali and E. P. George, "Tensile properties of high- and medium-entropy alloys," *Intermetallics (Barking)*, vol. 39, pp. 74-78, 2013.
5. B. Gludovatz, A. Hohenwarter, D. Catoor, E. H. Chang, E. P. George, and R. O. Ritchie, "A fracture-resistant high-entropy alloy for cryogenic applications," *Science (1979)*, vol. 345, no. 6201, pp. 1153-1158, 2014.
6. D. Wei et al., "Novel Co-rich high-performance twinning-induced plasticity (TWIP) and transformation-induced plasticity (TRIP) high-entropy alloys," *Scripta Materialia*, vol. 165, pp. 39-43, May 2019



М.А. Филиппов, В.С. Марин, В.П. Третьяков  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Санкт-Петербург, Россия, [filippov.mic@gmail.com](mailto:filippov.mic@gmail.com)

## ОЦЕНКА ПРЕИМУЩЕСТВ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СВАРКИ

### Аннотация

В работе рассмотрены технико-экономические показатели для оценки различных способов сварки с применением роботов при выполнении однотипных операций сварочного производства. Проведено сравнение эффективности робота и человека для различных методов сварки на примере продукции компании Kawasaki Robotics, а также представлены преимущества автоматизированной сварки относительно человеческого аналога. Показано, что автоматизированная сварка обеспечивает качество и повторяемость сварных швов, более высокую скорость выполнения операций и меньшую стоимость за один час работы.

*Ключевые слова:* промышленный робот, точечная сварка, сварка трением с перемешиванием, дуговая сварка.

### Введение

В настоящее время автоматизация производства является основным трендом развития современной промышленности. При этом особое внимание уделяется внедрению роботов в сварочное производство, применение которых позволяет обеспечить высокое качество сварных соединений, снизить процент брака, избавить человека от монотонного труда [1]. Роботизация сварки позволяет добиться значительной экономии сварочных материалов и электроэнергии, вести производство на меньшей площади, не требуя затрат на охрану труда и на оплату работы сварщиков [2, 3]. Несмотря на очевидные преимущества, основанием для взвешенного решения по замене ручного труда роботом является сравнение не только единовременных вложений, но и стоимость эксплуатации [4]. Для создания конкурентоспособного производства необходимо учитывать в первую очередь функциональные возможности современных роботов. Однако недостаточный объем аналитической информации не позволяет оценить все преимущества замены ручного труда роботизированными комплексами.

### Методы

Для достижения поставленной цели сравнивали показатели современной продукции компаний KUKA и Kawasaki Robotics [5, 6], которые являются одними из мировых лидеров на рынке оборудования для автоматизированного производства. Сравнение функциональных возможностей роботов этих фирм, представленное в таблице 1, показывает более высокие характеристики манипуляторов компании Kawasaki Robotics. Широкий спектр роботов этой фирмы позволяет успешно использовать их для точечной контактной сварки, дуговой сварки плавящимся электродом в защитных газах и сварки трением с перемешиванием.

Точечная сварка – один из ярких примеров того, насколько эффективно может быть применение робота относительно человека при выполнении однотипных операций с высокой точностью и качеством работ.

В силу специфики сварки трением с перемешиванием, человек не может осуществлять её в "полевых условиях", поскольку не существует ручного инструмента для сварки трением металлов. Поэтому здесь можно сравнить сварку трением с перемешиванием, которая производится на специализированных станках и с применением роботов-манипуляторов.

Дуговая сварка – как и контактная сварка, демонстрирует превосходство роботизированного производства, которое обеспечивает высокую скорость и повторяемость качественных сварных швов в любых пространственных положениях при постоянном мониторинге параметров процесса.

Таблица 1 – Функциональные возможности промышленных роботов

№	Оборудование	Вес полезной нагрузки, кг	Радиус действия, мм	Скорость, °/С
1	Оборудование для точечной контактной сварки			
1.1	KUKA KR QUANTEC	120	2700	120
2.1	Kawasaki BX200X	200	3412	125
2	Оборудование для сварки трением с перемешиванием			
1.2	KUKA KR 500 FORTEC	400	2500	90
2.2	KAWASAKI BT200L	400	3400	120
3	Оборудование для дуговой сварки			
3.1	KUKA KR QUANTEC nano ARC	6	1600	360
3.2	KAWASAKI BA006L	6	2000	360

Оценку преимуществ автоматизированной сварки проводили по трем критериям – качество, скорость сварки и стоимость часа работы единицы оборудования.

Работник с аппаратом точечной сварки при должной квалификации не имеет существенных различий по качеству единичной точки сварки с роботом, но сильно теряет в повторяемости характеристик готовых деталей, что является в конечном итоге существенным недостатком.

При соединении точечной сваркой частей передней двери легкового автомобиля (количество точек сварки на двери около 50 штук) человек затрачивает 6,5 минут, а в реальных условиях производства и человеческого фактора до 10...15 минут. Промышленный манипулятор Kawasaki BX200X со сварочной головой Obara со скоростью перемещения 125 °/С затрачивает на перемещение от точки к точке около 0,8 с. Также благодаря своей кинематике робот не имеет проблем с труднодоступными точками – максимальное время подхода к ним около 1 секунды. С учетом сварки среднее время проварки двери составляет 1,5 минуты.

В среднем на квалифицированного сварщика производство должно закладывать с учетом зарплаты, налоговых отчислений, страхования, социального пакета и т.д. от 100 до 150 тыс. рублей. При стоимости робота в районе 4 млн. рублей его окупаемость составит 3 года.

При сварке трением с перемешиванием качество получаемых сварных швов будет зависеть от характеристик установки и от корректности составленной оператором программы. В отличие от ЧПУ станков манипуляторы имеют больше степеней подвижности, что позволяет производить сварку не только горизонтально ориентированных заготовок.

Экспериментальные опыты, проведённые в «Лаборатории лёгких материалов и конструкций» СПбПУ Петра Великого, показали, что при одинаковых технологических параметрах скорость сварки для роботов с установленным на фланце шпинделем и ЧПУ станков требует обеспечения требуемых параметров сварочного цикла и отличается незначительно. В ряде случаев скорость сварки может быть более 0,5 м/мин. Влияние температурно-временных условий на качественное формирование швов отмечено также в работах [7, 8].

Роботизированная сварка трением на данный момент является развивающимся направлением, хотя технологические возможности этого способа ограничены жесткостью закрепления конструкции, более низким удельным усилием на инструмент и нерациональным использованием оборудования, например, при сварке по двум осям. Однако себестоимость роботизированной сварки сопоставима, а в ряде случаев будет ниже по сравнению с применением промышленного оборудования.

При выполнении дуговой сварки работник при должной квалификации почти не проигрывает роботу по качеству сварного шва, но сильно уступает в их повторяемости. Важную роль здесь играет и наличие человеческого фактора. Именно при дуговой сварке робот при просадке напряжения сварочной дуги может изменить настройки сварочного аппарата или адаптировать движение инструмента, что ведет к повышению качества сварного шва. Человек физически не может делать на заготовках абсолютно одинаковые сварные швы, что приводит к различным прочностным характеристикам готовых деталей. В отличие от человека робот способен делать одинаковые сварочные швы в строго заданных местах. Дополнительно он может задавать и придерживаться определённых паттернов сварного шва, которые при необходимости можно менять.

Поскольку линейная скорость сварки определяется требуемыми режимами, то робот не получает здесь значительных преимуществ. Выигрыш по времени у робота получается за счёт точных и скоординированных движений во время сварки и в момент перехода между сварными участками по оптимальной траектории.

Как и в случае с точечной сваркой в долгосрочной перспективе роботизированная сварка является экономически выгоднее. При стоимости робота в районе 5 млн. рублей его окупаемость составит 4 года.

### **Результаты и обсуждение**

При промышленной сварке сравнение человека с роботом показывает, что робототехника гораздо эффективнее и выгоднее человека. Данные об этом представлены в таблице 2. Характеристикой оценки качества сварки является погрешность позиционирования инструмента, определяющая в конечном итоге и повторяемость сварных швов.

Сравнительный анализ параметров сварки показывает, что точечная сварка роботом для конкретных деталей дает погрешность меньше в 50 раз, скорость сварки быстрее в 4,3 раза и стоимость одного часа работы меньше в 2,1 раза. При сварке трением выигрыш роботизированной сварки заключается в более низкой стоимости часа работы (в 1,5 раза). Дуговая сварка с применением манипулятора имеет в 3,7 раза более высокую скорость, в 1,6 раза меньшую стоимость одного часа работы и сходные показатели с точечной сваркой по качеству. Также стоит отметить, что промышленные роботы, указанные в работе, имеют возможность соблюдать меньшую погрешность, но с уменьшением погрешности вырастает время подхода к

определённым точкам. Погрешность позиционирования в 0,1 мм является допустимой погрешностью, позволяющей повысить скорость работы.

Таблица 2 – Оценка параметров сварки

№	Объект исследования	Погрешность позиционирования инструмента	Время сварки или скорость	Стоимость часа работы
1	Точечная контактная сварка (процесс – сварка передней двери автомобиля)			
1.1	Kawasaki BX200X со сварочной головой Obara	0,1 мм	1,5 мин	200 руб
1.2	Аппарат ручной точечной сварки Obara	до 5 мм	6,5 мин	425 руб
2	Сварка трением с перемешиванием			
2.1	Kawasaki ZX 165 U	0,1 мм	0,5 м/мин	400 руб
2.2	Комплекс для сварки трением с ЧПУ	0,01 мм	0,5 м/мин	600 руб
3	Дуговая сварка			
3.1	Kawasaki BA006L со сварочной головкой Kempi	0,1 мм	30 м/час	250 руб
3.2	AuroraPRO OVERMAN 180	до 5 мм	8 м/час	400 руб

В условиях повторяющихся алгоритмов и типовой сварки манипулятор в разы превосходит высококвалифицированного специалиста. Следует отметить, что робот не может обойти человека в умственной работе, требующей человеческого фактора – того самого, из-за чего человек хуже делает однотипную работу. Человек гораздо лучше показывает себя и при выполнении декоративной сварки.

### Заключение

Представленная в данной работе оценка характеристик автоматизированных сварочных процессов показывает, что применение промышленных роботов повышает качественную и экономическую эффективность различных методов сварки при выполнении однотипных операций. Роботизированная сварка выигрывает по трем параметрам, представленным в работе, обеспечивает качество и повторяемость сварных швов, более высокую скорость выполнения операций и меньшую стоимость за один час работы. Внедрение роботов позволит улучшить также эксплуатационные характеристики изделий и расширить номенклатуру деталей, что приведет к росту конкурентоспособности и адаптивности всей производственной системы. Гораздо большей конкурентоспособности будет способствовать и системная автоматизация технологического процесса целиком, так как суммарный прирост эффективности при полной автоматизации производства существенно выше, чем при роботизации отдельной операции.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Комова О.И., Маслов А.Н., Осадченко Н.В. Атомарные функции и построение программного движения сварочного робота // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия: Естественные науки. 2018. № 5 (80). - С. 15-36.
2. Гладков Э.А., Бродягин В.Н., Перковский Р.А. Автоматизация сварочных процессов. - М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014. - 424 с.

3. Овчинников, В.В. Оборудование, механизация и автоматизация сварочных процессов / В.В. Овчинников. - М.: Издательский центр «Академия», 2013. - 256 с.

4. Ленчик И.В., Родионова И.Н., Горохов А.А. Проблемы и перспективы развития сварочного производства в России // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. 2016. № 11-12. - С. 69-72.

5. Промышленные роботы KUKA. - URL: <https://www.kuka.com/ru>. (дата обращения: 28.05.2022). - Текст: электронный.

6. Промышленные роботы Kawasaki. - URL: <https://kawasakirobot.ru/>. (дата обращения: 28.05.2022). - Текст: электронный.

7. Карманов В.В., Каменева А.Л., Карманов В.В. Сварка трением с перемешиванием алюминиевых сплавов: сущность и специфические особенности процесса, особенности структуры сварного шва // Вестник Пермского нац. исслед. политехн. ун-та. Аэрокосмическая техника. 2012. № 32. - С. 67-80.

8. Овчинников В.В., Дриц А.М. Технологические особенности сварки трением с перемешиванием соединений алюминиевых сплавов системы Al-Mg // Научно-технические технологии в машиностроении, № 3, 2019. - С. 7-20.

## КИНЕТИКА ДЕФЕКТОВ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ РЕШЕТКИ ДВУХКОМПОНЕНТНЫХ СПЛАВОВ ПРИ МЕГАПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

### Аннотация

В работе рассмотрена обработка двухкомпонентных сплавов методами мегапластической деформации (МПД). Построен подход неравновесной эволюционной термодинамики (НЭТ) для данных сплавов и мартенситных превращений. На его основе исследуется совместная кинетика структурных дефектов и плотности растворяемого компонента в двухкомпонентных сплавах. Данные расчеты показывают наличие некоторого универсального стационарного состояния, к которому стремятся сплавы в процессе их обработки.

*Ключевые слова:* мегапластическая деформация, фазовые переходы, эволюция структурных дефектов, неравновесная эволюционная термодинамика, стационарное состояние.

### Введение

В настоящее время всё больше привлекают внимание исследования обработки методами МПД многокомпонентных сплавов склонных структурным фазовым превращениям. Неподдельный интерес представляют диффузионные фазовые превращения сложных сплавов и бездиффузионные мартенситные фазовые превращения. Наиболее простыми для исследований являются двухкомпонентные сплавы на основе меди. Особый интерес представляет обработка таких сплавов методами МПД, в частности при пластической деформации кручением (ПДКР).

На примере сплавов CuCo и CuAg [1] эксперименты показывают, что из любой точки фазовых диаграмм при достаточном числе оборотов материал всегда приходит к некоторому единому универсальному стационарному состоянию. Причем если начальная плотность растворенного элемента ниже стационарного значения, то она повышается в процессе МПД, и, наоборот, если концентрация выше стационарного значения, то она понижается.

Задача заключается в том, чтобы на основании экспериментальных данных построить теоретическую модель для описания эволюции дефектов при МПД в случае двухкомпонентного сплава.

### Методы

Для достижения поставленной задачи будем использовать усовершенствованную модель НЭТ. Основная идея данного метода заключается в том, чтобы учесть возможные мартенситные фазовые переходы путем введения во внутреннюю энергию параметра порядка (ПП). Для этого начнем с записи свободной энергии в форме Гинзбурга-Ландау и путем преобразования  $U = F + T \cdot S$  перейдем к внутренней энергии, а далее будем идти по стандартной схеме НЭТ, где плотность

ПП будет эволюционировать так же, как и плотности дефектов. Для диффузионных фазовых переходов будем учитывать неоднородность сплава по всем видам дефектов и ПП.

Искажения кубической решетки при структурных переходах описываются однородными деформациями, записанными в виде линейных комбинаций компонент тензора деформаций  $\varepsilon_{ii}$  [2,3]:

$$\begin{aligned} e_1 &= (\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz})/3, & e_2 &= (\varepsilon_{xx} - \varepsilon_{yy})/\sqrt{2}, \\ e_3 &= (2\varepsilon_{zz} - \varepsilon_{xx} - \varepsilon_{yy})/\sqrt{6}. \end{aligned} \quad (1)$$

Деформация  $e_1$ , соответствующая изменению объема, не нарушает симметрию решетки. Нарушение симметрии происходит за счет деформаций  $e_2$  и  $e_3$ . В таком случае, разложение плотности свободной энергии в несколько упрощенном виде можно записать [3]:

$$f = f_0 + \frac{1}{2}a(e_2^2 + e_3^2) + \frac{1}{3}be_3(e_3^2 - 3e_2^2) + \frac{1}{4}c(e_2^2 + e_3^2)^2. \quad (2)$$

Поскольку термодинамический потенциал содержит кубический член по ПП, то будет иметь место фазовый переход первого рода.

Согласно термодинамической теории Ландау [4] коэффициент  $a$  при второй степени ПП, в окрестности точки  $T_M$ , является линейной функцией вида

$$a = a_0(T - T_M), \quad (3)$$

где  $T_M$  – критическая температура мартенситного фазового перехода,  $a_0$  – некоторая новая постоянная.

Соответствующую плотность энтропии будем искать из выражения

$$s_{OP} = -\frac{\partial f}{\partial T} = -\frac{1}{2}\frac{\partial a}{\partial T}(e_2^2 + e_3^2) - \frac{1}{3}\frac{\partial b}{\partial T}e_3(e_3^2 - 3e_2^2) - \frac{1}{4}\frac{\partial c}{\partial T}(e_2^2 + e_3^2)^2. \quad (4)$$

Следуя теории Ландау, будем предполагать, что коэффициенты  $b$  и  $c$  не зависят от температуры, тогда

$$s_{OP} = -\frac{1}{2}a_0(e_2^2 + e_3^2). \quad (5)$$

Соответствующая плотность внутренней энергии будет иметь вид

$$u_{OP} = f + Ts_{OP} = f_0 - \frac{1}{2}a_0T_M(e_2^2 + e_3^2) + \frac{1}{3}be_3(e_3^2 - 3e_2^2) + \frac{1}{4}c(e_2^2 + e_3^2)^2. \quad (6)$$

В случае стандартной модели НЭТ плотность внутренней энергии  $u$  включает в себя как классические во время МПД дефекты, такие как, границы зерен и дислокации, так и точечные дефекты, например вакансии и межузельные атомы, а также компоненты сплава, соединения или раствора. В такой постановке задачи плотность внутренней энергии дефектной подсистемы будет равна:

$$u_d(h_P, h_D, h_g) = u_0 + \sum_{l=P,D,g} \left( \varphi_{0l}h_l - \frac{1}{2}\varphi_{1l}h_l^2 + \frac{1}{3}\varphi_{2l}h_l^3 - \frac{1}{4}\varphi_{3l}h_l^4 \right) + u_{int}, \quad (7)$$

где  $h_l$  – плотности структурных дефектов, точечных дефектов ( $l = P$ ), дислокаций ( $l = D$ ) и границ зерен ( $l = g$ );  $\varphi_{kl}$  – энергетические коэффициенты

теории. Последнее слагаемое  $u_{int}$  описывает линейные и нелинейные взаимодействия между дефектами различных типов, а также взаимодействие с компонентами сплава.

Тогда плотность внутренней энергии в целом можем записать в виде

$$u(h_P, h_D, h_g, e_2, e_3) = u_d(h_P, h_D, h_g) + u_{OP}(e_2, e_3) + u_{int}, \quad (8)$$

где последний член  $u_{int}$  отвечает за взаимодействие в форме произведений независимых аргументов внутренней энергии, в том числе за взаимодействие между собой и со структурными дефектами.

Таким образом, к стандартной системе эволюционных уравнений НЭТ [5] для структурных дефектов необходимо добавить эволюционные уравнения для ПП:

$$\frac{\partial h_P}{\partial t} = \gamma_P(\varphi_{0P} - \varphi_{1P}h_P + \varphi_{DP}h_D + \varphi_{gP}h_g + \varphi_{OP-P}h_{OP}) + f_P \quad (9)$$

$$\frac{\partial h_D}{\partial t} = \gamma_D(\varphi_{0D} - \varphi_{1D}h_D + \varphi_{PD}h_P + \varphi_{gD}h_g + \varphi_{OP-D}h_{OP}) + f_D \quad (10)$$

$$\frac{\partial h_g}{\partial t} = \gamma_g(\varphi_{0g} - \varphi_{1g}h_g + \varphi_{2g}h_g^2 - \varphi_{3g}h_g^3 + \varphi_{gP}h_P + \varphi_{gD}h_D + \varphi_{OP-g}h_{OP}) + f_g \quad (11)$$

$$\frac{\partial h_{OP}}{\partial t} = \gamma_{OP}(\varphi_{0OP} - \varphi_{1OP}h_{OP} + \varphi_{P-OP}h_P + \varphi_{g-OP}h_g + \varphi_{D-OP}h_D) + f_{OP} \quad (12)$$

Так как нас не интересует многовариантность мартенситной фазы, то в свободной энергии (2) можем принять  $e_2 = 0$ . Тогда будем полагать что здесь и выше  $h_{OP} = e_3$ .

### Результаты и обсуждение

Важной фундаментальной особенностью данной совместной эволюции структурных дефектов и ПП является наличие некоторого универсального стационарного состояния при заданных параметрах модели, к которому стремится система в процессе эволюции.

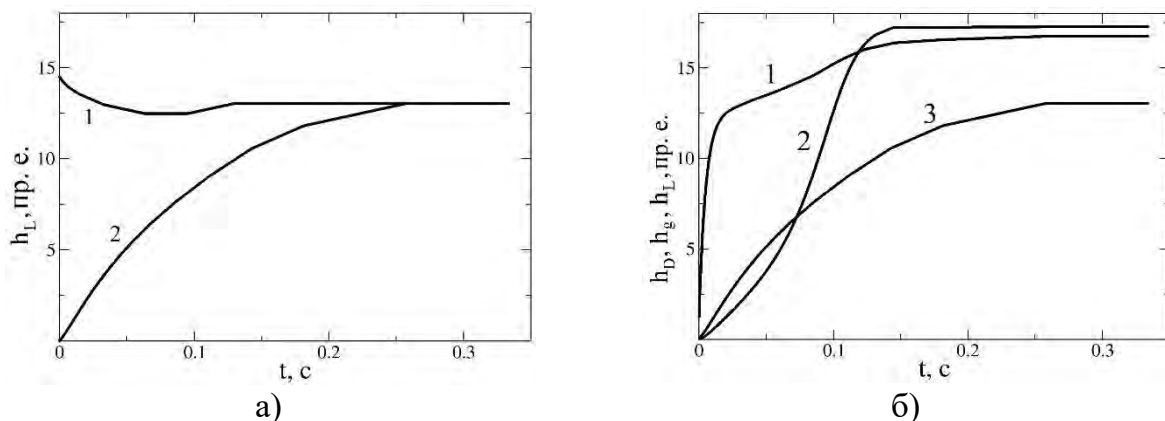


Рисунок 1 – а) Эволюция плотности атомов легирующего компонента в процессе МПД: 1 – начальное значение выше стационарного, 2 – нулевое начальное значение; б) Эволюция плотностей дислокаций (1), границ зерен (2) и легирующего компонента (3) в процессе МПД



Например, если начальная плотность легирующего компонента в сплаве ниже ее стационарного значения, то плотность этого компонента возрастает, если начальная плотность выше, то падает (см. рис. 1).

Необходимо отметить, что кривая 1 на рис. 1, а) при данном соотношении параметров модели вначале опускается ниже стационарного значения и только потом вновь поднимается к стационарному значению. Связано это с тем, что при высокой скорости диффузии растворяемого компонента его плотность успевает подстроиться под текущие значения плотностей других структурных дефектов (дислокаций и границ зерен), которые на начальной стадии МПД низкие. По мере повышения плотности структурных дефектов растет и предел стационарного состояния для растворяемого компонента. В случае низкой скорости диффузии растворяемого компонента кривая 1 будет плавно опускаться к стационарному значению.

Для получения большей схожести с экспериментальными результатами работы [1] введем в качестве начального распределения плотности легирующего компонента некоторую кривую отжига, а выход на стационарное состояние промоделируем из уравнений НЭТ (см. рис. 2).

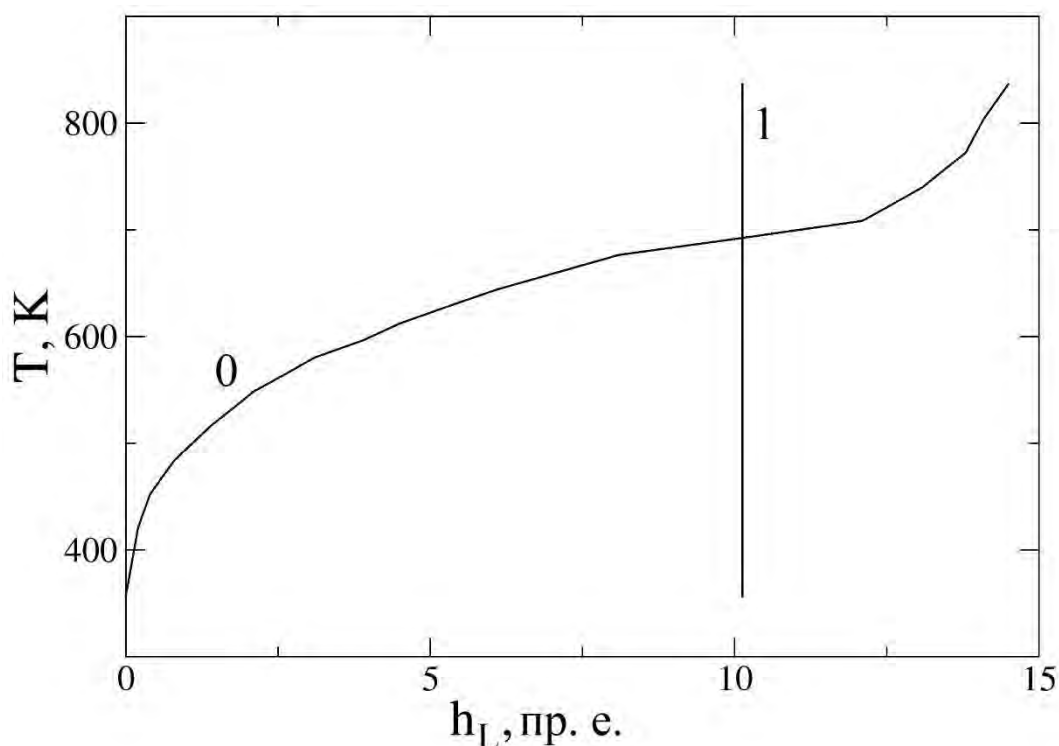


Рисунок 2 – Фазовая диаграмма легирующего компонента  $h_L$  в процессе МПД: 0 – плотность до МПД, 1 – после МПД (стационарное состояние)

### Заключение

В рамках усовершенствованной модели НЭТ, учитывающей возможность структурных мартенситных и диффузионных фазовых переходов, получена система кинетических уравнений для описания эволюции плотностей основных структурных дефектов и ПП в условиях сильной пластической деформации. В ходе компьютерных экспериментов было установлено, что в таких условиях система всегда стремится к универсальному стационарному состоянию.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Straumal, B.B. High pressure torsion of Cu-Ag and Cu-Sn alloys: Limits for solubility and dissolution / B.B. Straumal, A.R. Kilmametov, B. Baretzky, O.A. Kogtenkova, P.B. Straumal, L. Lityńska-Dobrzyńska, R. Chulist, A. Korneva, P. Zieba. // *ActaMater.* - 2020. - V. 195. - P. 184-198.
2. Васильев, А.Н. Ферромагнетики с памятью формы / А.Н. Васильев, В.Д. Бучельников, Т. Такаги, В.В. Ховайло, Э.И. Эстрин. // *Успехи физических наук.* - 2003. - Т. 173. - № 11. - С. 577-608.
3. Fradkin, M.A. External field in the Landau theory of a weakly discontinuous phase transition: Pressure effect in the martensitic transitions / M.A. Fradkin. // *Physical Review B.* - 1994. - V. 50. - № 22. - P. 16326-16339.
4. Изюмов, Ю.А. Фазовые переходы и симметрия кристаллов / Ю.А. Изюмов, В.Н. Сыромятников. - Москва: Наука, 1984. - 248 с.
5. Метлов, Л.С. Бимодальные структуры твердых тел, полученные при мегапластической деформации / Л.С. Метлов, И.Г. Бродова, В.М. Каченко, А.Н. Петрова, И.Г. Ширинкина. // *Физика Металлов и Металловедение.* - 2017. - Т. 118. - № 12. - С. 1331-1338.
6. Метлов, Л.С. Флуктуационные и шумовые эффекты в различных физических системах / Л.С. Метлов. // *Физика и техника высоких давлений.* - 2019. - Т. 29. - № 1. - С. 28-63.
7. Khomenko, A.V. Effect of stochastic processes on structure formation in nanocrystalline materials under severe plastic deformation / A.V. Khomenko, D. Troshchenko, L.S. Metlov. // *Physical Review E.* - 2019. - V. 100. - № 2. - 022110.

Л.В. Коногорова, Н.Д. Оглезнев  
Пермский национальный исследовательский политехнический университет,  
Пермь, Россия

## **РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЯЧЕИСТЫХ СТРУКТУР С РЕГУЛИРУЕМЫМ НАКЛОНОМ И ПЕРЕМЕННЫМ КОЭФФИЦИЕНТОМ ПЕРЕКРЫТИЯ ДЛЯ ПОГЛОЩЕНИЯ ЗВУКА**

### **Аннотация**

В работе рассмотрены прогнозируемые параметры разработки ячеистых структур, предназначенные для поглощения звуковых волн. Целью исследований является оптимизация машиностроительного производства. В результате проделанной работы, установлено, что ячеистые структуры, разработанные при помощи аддитивных технологий, обладают звукопоглощающим эффектом, а варьирование их параметрами и расположением канала приема звуковой волны позволяют увеличить коэффициент звукопоглощения.

*Ключевые слова:* аддитивные технологии, ячеистая структура, коэффициент звукопоглощения.

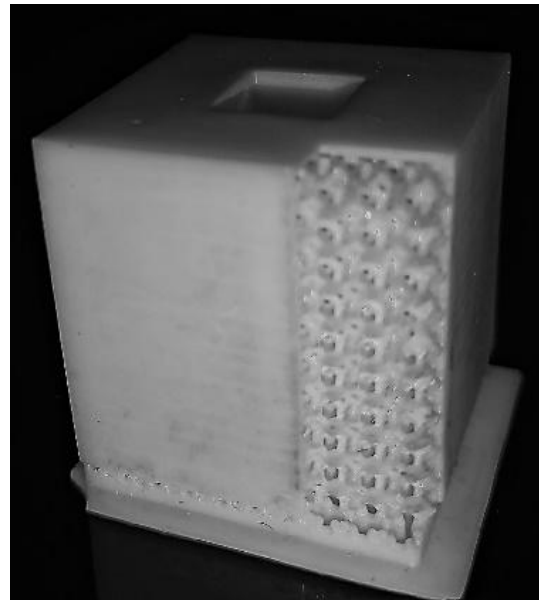
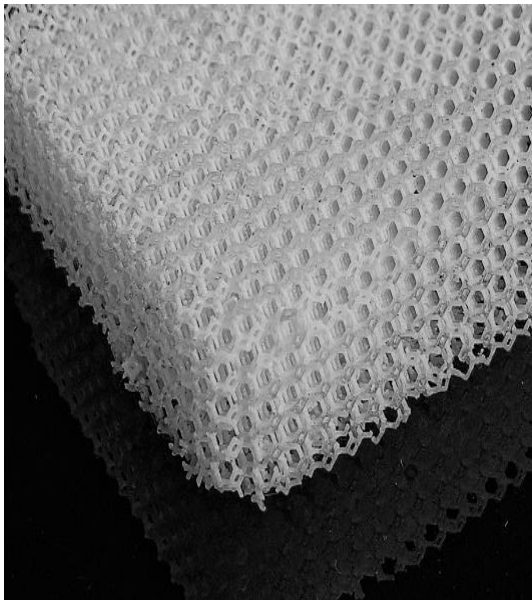
### **Введение**

Работа ответственных изделий зачастую связана с высокими нагрузками, что сопровождается излишним шумом в рамках производства или эксплуатации технических средств. В современном машиностроении в качестве звукопоглощающих панелей часто применяются панели из свинца и полиуретана. Контакт с перечисленными материалами небезопасен, в связи с тем, что он оказывает неблагоприятное воздействие как на окружающую среду, так и на организм человека. Разработанные ячеистые структуры могут состоять из материала, который уступает по весу свинцовой панели, а также являются наиболее экологичными.

В основе конструкции звукопоглощающей ячеистой панели лежит принцип регулирования формы единичной ячейки, а также принцип определенного расположения единичных ячеек относительно друг друга, что в итоге образует их массив. Образцы ячеистых структур выращены с различными параметрами микро и макрогеометрии, а также с различными углами наклона стенок и их толщиной.

Для измерения уровня звука использовался цифровой шумомер, в качестве источника звуковых волн использовался цифровой камертон. Измерение звукопоглощения происходило в оборудованном звукоизоляционным покрытием тоннеле.

В ходе исследований предполагалось, что влияние на коэффициент звукопоглощения оказывает расположение каналов, в которые попадают звуковые волны. Так, ячеистые панели были расположены как перпендикулярно источнику звука, так и вдоль источника звука. Регулирование толщины и геометрии единичной ячейки, при сохранении единого массива и габаритов панели, показало разницу в коэффициенте звукопоглощения в диапазоне 5–7 %.



а)

б)

Рисунок 1 – Выращенные образцы ячеистых структур: а) 1 – сотовая ячеистая структура, б) дендритная ячеистая структура

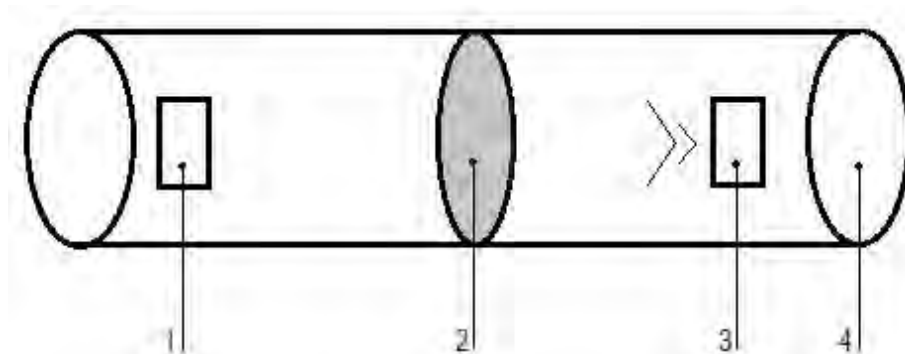


Рисунок 2 – Экспериментальная установка для выявления звукопоглощающих свойств ячеистых структур: 1 – цифровой шумомер, 2 – панель с ячеистой структурой, 3 – цифровой камертон, 4 – тоннель со звукоизоляционным покрытием.

### Методы

Для изготовления ячеистых панелей была применена технология быстрого прототипирования. Печать образцов проводилась на установке Envisiontec Perfactory XEDE, работающей по технологии DLP, из композиционного полимерного материала SI500.

### Результаты и обсуждение

Было выявлено, что параметры внутренней геометрии ячейки, а также геометрия массива ячеек влияет на коэффициент звукопоглощения. Установлено, что ячеистые панели, которые направлены перпендикулярно источнику шума, имеют более высокие звукоизоляционные характеристики, чем панели с каналами, которые ориентированы вдоль источника шума. На основе полученных результатов становится возможным проведение дальнейших исследований в подборе наиболее перспективных материалов для создания ячеистых структур, а также в исследовании параметров варьирования ячеек.

## **Заключение**

Разработка технологии поглощающих шум ячеистых структур позволит повысить точность изготовления перспективных деталей и снизить экономические затраты на их производство, сделать производство более экологичным, что позволит повысить конкурентоспособность продукции Российских машиностроительных предприятий на мировом рынке, а также предотвратит нарушения норм превышения издаваемого шума на предприятиях.

## **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Аношкин А.Н., Захаров А.Г., Городкова Н.А., Чурсин В.А. Расчетно-экспериментальные исследования резонансных многослойных звукопоглощающих конструкций // Вестник ПНИПУ. Механика. - 2015. - №1. - С. 5-20.
2. Осадчий Н.В., Малышев В.А., Шепель В.Т. Построение моделей статической и динамической прочности многослойных конструкций на основе вариационного исчисления // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. - 2019. - №56. - С. 58 - 71.
3. Шульдешов Е.М., Краев И.Д., Образцова Е.П. Материалы для звукопоглощающих конструкций авиационных двигателей (обзор) // Труды ВИАМ. - 2021. - №7 (101). - С. 59-72.
4. Шульдешов Е.М., Краев И.Д., Платонов М.М. Полимерная композиционная звукопоглощающая панель // Труды ВИАМ. - 2017. - №5 (53). - С. 56 – 61.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СТРУКТУРНОГО И МАГНИТНОГО ПАРАМЕТРА ПОРЯДКА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ И ДАВЛЕНИЯХ НА ПРИМЕРЕ СПЛАВА ГЕЙСЛЕРА

### Аннотация

Цель данной работы состоит в теоретическом исследовании термодинамической системы типа сплав Гейслера при помощи феноменологической теории фазовых переходов Ландау, развитие и уточнение теоретической модели явлений происходящих при фазовых переходах в системах данного типа при помощи использования инвариантов 5-го порядка в разложении свободной энергии по степеням параметра порядка.

*Ключевые слова:* сплавы Гейслера, фазовые переходы, инварианты 5-го порядка, тетрагональная сингония, параметр порядка.

### Введение

В связи с быстрым развитием техники и науки в последние годы все больше растет интерес к материалам обладающими различными так называемыми «интеллектуальными» свойствами, например, памятью формы, которые могут изменять несколько своих свойств под действием внешних факторов. В последние десятилетия появился интерес к т.н. сплавам Гейслера в связи с рядом их уникальных свойств к этим свойствам относятся: эффект памяти формы, гигантское магнетосопротивление, эффект магнитной памяти формы. Сплав Гейслера – это тройное интерметаллическое соединение вида  $X_2YZ$  [1,2].

Целью данной работы будет теоретическое исследование систем типа сплавов Гейслера при помощи феноменологической теории фазовых переходов Ландау, развитие и уточнение теоретической модели явлений, происходящих при фазовых переходах в сплавах Гейслера при помощи использования инвариантов 5-го порядка в разложении свободной энергии по степеням параметра порядка.

### Методы

Для решения поставленной проблемы будем использовать феноменологическую теорию фазовых переходов Ландау. Сплавы Гейслера относятся к соединениям кубической симметрии  $O_h$ , которым свойственны как структурные мартенситные переходы в низкосимметричную фазу  $D4h$ , так и магнитные фазовые переходы. Свободную энергию  $\Phi$  удобно представить в виде суммы следующих слагаемых

$$\Phi = \Phi_0 + \Phi_m + \Phi_{sm} + \Phi_{sm} \quad (1)$$

где  $\Phi_{sm}$  – свободная энергия взаимодействия магнитной и структурной подсистемы,  $\Phi_m$  – энергия магнитной подсистемы,  $\Phi_s$  – энергия структурной подсистемы. Причём

параметрами порядка в нашей задаче являются компоненты тензора деформации и компоненты тензора намагниченности. В нашей модели вид слагаемых формулы (1) представляет следующий вид:

$$\frac{1}{2}a(e_2^2 + e_3^2) + \frac{1}{3}be_3(e_2^2 - 3e_2^2) + \frac{1}{4}c(e_2^2 + e_3^2)^2 \quad (2)$$

где  $e_2, e_3$  - линейные комбинации компонент тензора деформации ответственные за переход решетки из кубической фазы в тетрагональную [3,4]:

$$e_2 = \frac{(\varepsilon_{xx} - \varepsilon_{yy})}{\sqrt{2}},$$

$$e_3 = \frac{(2\varepsilon_{zz} - \varepsilon_{xx} - \varepsilon_{yy})}{\sqrt{6}}. \quad (3)$$

где  $\varepsilon_{xx}, \varepsilon_{yy}, \varepsilon_{zz}$  - декартовы компоненты тензора деформации.

$$\Phi_m = \frac{1}{2}\alpha\left(\sum_{i=1}^3 m_i^2\right) + \frac{1}{4}\beta\left(\sum_{i=1}^3 m_i^2\right)^2 + K(m_1^2 m_2^2 + m_1^2 m_3^2 + m_2^2 m_3^2) \quad (4)$$

$$\Phi_{sm} = B_2\left(\frac{e_2}{\sqrt{2}}(m_1^2 - m_2^2) + \frac{e_3}{\sqrt{6}}(3m_3^2 - \left(\sum_{i=1}^3 m_i^2\right))\right) \quad (5)$$

Несмотря на то, что часть свободной энергии  $\Phi_m$  (4) относится к чисто магнитной подсистеме, она все же неявным образом ощущает влияние симметрии структурной подсистемы. Оно заключается в том, что спонтанная намагниченность направлена вдоль одной из диагоналей куба. Это, однако, оправдано в том случае, когда магнитный фазовый переход происходит в аустенитной фазе при ином случае физически очевидно, что намагниченность при магнитном фазовом переходе по-прежнему стремится принять направление вдоль диагонали, но уже искаженной элементарной ячейки. В то же время в смешанной части свободной энергии  $\Phi_{sm}$  (5) отсутствует инвариант, аналогичный третьему слагаемому в  $\Phi_m$  (4), который отвечал бы за это свойство. Его можно дополнительно ввести в виде:

$$\Phi_{sm} = K(m_1^2 m_2^2 \varepsilon_{zz} + m_2^2 m_3^2 \varepsilon_{xx} + m_1^2 m_3^2 \varepsilon_{yy}) \quad (6)$$

Важным отличием этой части смешанной свободной энергии является то, что в (5) магнитный параметр порядка входит во второй степени и влияет на сдвиг температуры  $T_c$ , в то время как (6) содержит четвертую степень магнитного параметра порядка и учитывает изменение направлений самих осей анизотропии. Коэффициент  $K$ , входящий в (4) и (6), может в принципе отличаться по величине, что указывает на различную силу поля анизотропии в высоко и низкосимметричной фазах, но может и совпадать, что выгодно с точки зрения меньшего количества независимых констант модели.

## Результаты и обсуждение

В рамках данной работы при помощи добавочного слагаемого (6) в формулу (1) была получена следующая система уравнений:

$$\begin{aligned}\frac{\partial \Phi_{sm}}{\partial m_1} &= 2Km_1(m_2^2 e_3 \sqrt{\frac{2}{3}} + m_3^2(e_2 \frac{\sqrt{2}}{2} + e_3 \frac{1}{\sqrt{6}})) = 0 \\ \frac{\partial \Phi_{sm}}{\partial m_2} &= 2Km_2(m_1^2 e_3 \sqrt{\frac{2}{3}} + m_3^2(e_2 \frac{\sqrt{2}}{2} - e_3 \frac{1}{\sqrt{6}})) = 0 \\ \frac{\partial \Phi_{sm}}{\partial m_3} &= 2Km_3(m_2^2(e_2 \frac{\sqrt{2}}{2} - e_3 \frac{1}{\sqrt{6}})) + m_1^2 \sqrt{\frac{2}{3}}(e_2 \frac{\sqrt{2}}{2} + e_3 \frac{1}{\sqrt{6}}) = 0\end{aligned}\quad (7)$$

Нетривиальное решение данной системы относительно компонент вектора намагниченности уравнений имеет следующий вид:

$$\begin{aligned}m_1 &= \pm \sqrt{-\left(\frac{e_2 \sqrt{3}}{e_3} \frac{\sqrt{3}}{2} - \frac{1}{2}\right)m_3^2} \\ m_2 &= \pm \sqrt{-\left(\frac{e_2 \sqrt{3}}{e_3} \frac{\sqrt{3}}{2} + \frac{1}{2}\right)m_3^2} \\ m_3 &= \pm \sqrt{t} \quad (t - \text{параметр})\end{aligned}\quad (8)$$

Заметим, что данное решение является единственным что обеспечивается равенством нулю детерминанта системы (7). Рассмотрим случай одностороннего растяжения вдоль какой-либо из осей, например, вдоль оси ОХ. В случае растяжения одностороннего растяжения элементарной ячейки вдоль оси ОХ компоненты  $e_2, e_3$  имеют следующий вид:

$$e_2 = -\frac{e_{xx}}{\sqrt{2}}, \quad e_3 = -\frac{e_{xx}}{\sqrt{6}} \quad (9)$$

подставляя значения из (9) в (8) получаем выражения для координат вектора намагниченности:

$$m_1 = \sqrt{2t} \quad m_2 = \sqrt{t} \quad m_3 = \sqrt{t} \quad (10)$$

откуда из сравнения с компонентами вектора диагонали тетрагональной фазы, очевидно, что при  $e_{xx} = \sqrt{2} - 1$  и при произвольном положительном значении  $\sqrt{t}$  вектор (10) параллелен вектору диагонали параллелепипеда.

### Заключение

В рамках данной работы были при помощи учета инварианта 5-го порядка в разложении свободной энергии системы типа сплав Гейслера теоретически установлено что при выбранной модели свободной энергии соответствующего энергии взаимодействия, вектор намагниченности направлен вдоль главной диагонали параллелепипеда тетрагональной фазы (низко симметричной фазы).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ



1. Tadaki, T. Shape memory alloys / T. Tadaki, K. Otsuka, K. Shimizu // Annual Review of Materials Science. - 1988. - V. 18. - P. 25-45.
2. Бучельников, В. Д. Магнитные сплавы с памятью формы: фазовые переходы и функциональные свойства / В.Д. Бучельников, А.Н.Васильев, В.В.Коледов, С.В. Таскаев, В.В.Ховайло, В.Г. Шавров // Успехи физических наук. - 2006. - Т. 176. - № 8. - С. 900-906.
3. Васильев, А.Н. Ферромагнетики с памятью формы / А.Н. Васильев, В.Д. Бучельников, Т. Такаги, В.В. Ховайло, Э.И. Эстрин. // Успехи физических наук. - 2003. - Т. 173. - № 11. - С. 577-608.
4. Webster, P.J. Magnetic order and phase transition in Ni<sub>2</sub>MnGa / P.J. Webster, K.R.A. Ziebeck, S.L. Town, M.S. Peak // Philosophical Mag. B. - 1984. - V. 49, iss. 3. - P. 295-310.

А.И. Шамшурин, К.А. Стариков, Е.В. Борисов, А.А Попович  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Санкт-Петербург, Россия, [evgenii.borisov@icloud.com](mailto:evgenii.borisov@icloud.com)

## **СИНТЕЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ОБРАЗЦОВ ИЗ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ СЕЛЕКТИВНЫМ ЛАЗЕРНЫМ ПЛАВЛЕНИЕМ**

### **Аннотация**

В работе проведены исследования возможности изготовления биметаллических образцов из жаропрочных никелевых сплавов. Проведены исследования исходного порошкового материала. Проведена оценка размеров и структуры переходного слоя.

*Ключевые слова:* Аддитивные технологии, порошковая металлургия, жаропрочные никелевые сплавы, селективное лазерное плавление

### **Введение**

С появлением аддитивных технологий - передовых технологий на данный момент, у конструкторов появилась возможность в большей степени опираться на опыт эволюции в вопросах оптимизации изделий для совершенствования их технологических и функциональных возможностей [1-4]. Одним из методов оптимизации деталей является использование при изготовлении одной детали нескольких материалов. К примеру, у детали, которая только частично подвергается воздействию высоких температур возможно использование жаростойких материалов только в температурно-нагруженной части. Для формирования остального объёма детали возможно применения менее стойких и в то же время более дешёвых и технологичных материалов. Элементы одного и того же изделия будут иметь различный химический состав и, соответственно, структуру и свойства.

Жаропрочные никелевые сплавы, очень широко используемые в промышленности, в настоящее время активно применяются и в аддитивных технологиях для получения сложнопрофильных деталей и узлов [5-7].

В случае технологии селективного лазерного плавления изменение химического состава возможно только вдоль направления выращивания компактного образца, что связано с технологическими ограничениями данного метода.

Таким образом, целью данной работы являлось исследование возможности формирования биметаллических образцов из никелевых сплавов методом селективного лазерного плавления и исследование их свойств.

### **Методы**

Синтез образцов проводили на установке селективного лазерного плавления AconityMIDI. Изготовление образцов проводили из порошков сплавов ЖС32 и Inconel 718. Средний размер частиц порошков ( $d_{50}$ ) составлял 55,8 и 37,4 мкм соответственно. Изготовление производили с подогревом рабочей платформы до 800°C для уменьшения коробления и дефектов в формируемых образцах.

Изготовление образцов с переменным химическим составом проводили следующим образом.

Исследование структуры проводили при помощи сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) TESCAN Mira 3 LMU при различных увеличениях.

## Результаты и обсуждение

В качестве исходных материалов для синтеза биметаллических образцов использовали никелевые сплавы различного класса. Изображение частиц порошков используемых сплавов представлены на рисунке 1.

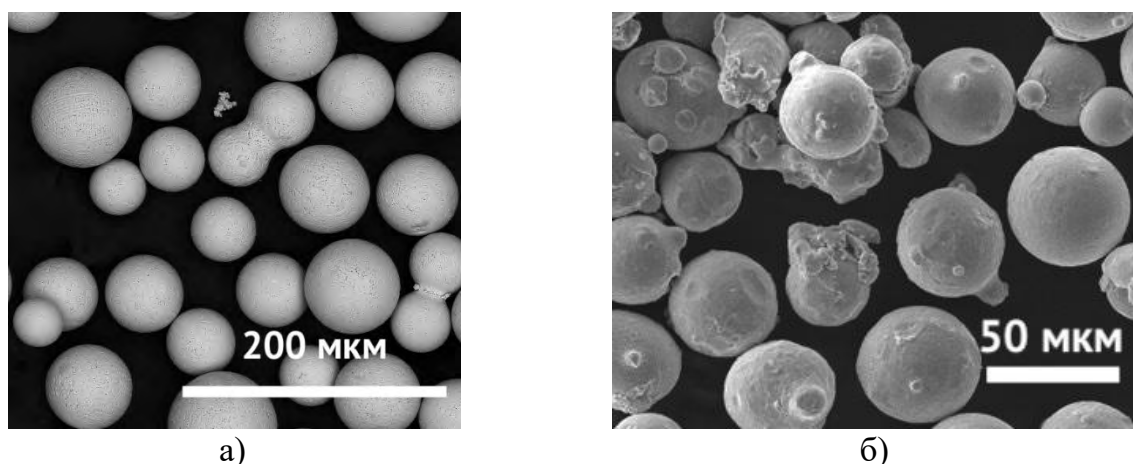


Рисунок 1 – СЭМ-изображения частиц порошков ЖС32 (а) и Inconel 718 (б)

Форма частиц порошка сплава ЖС32 близка к идеальным сферам. Однако имеются «гантелевидные» частицы – сформировавшиеся, по всей видимости, из-за слипания не полностью затвердевших частиц в процессе атомизации. Форма частиц сплава Inconel 718 менее сферичная, близкая к округлой, с множеством наростов – сателлитов. Эти наросты также являются результатом столкновения капель в процессе их затвердевания в атомизаторе. Такие наросты могут влиять на текучесть и насыпную плотность порошка, что в конечном счёте может сказаться на плотности детали.

Далее производилось выращивание образцов с различным химическим составом. Для этого сначала выращивали половину образца, затем меняли материал, и образец доращивали, используя другой порошок. Таким образом удалось избежать взаимного загрязнения порошков другим составом. Общий вид биметаллического образца, изготовленного методом селективного лазерного плавления показан на рисунке 2.

На образце видна граница раздела, отображающая переход от одного сплава к другому.

Микроструктура переходной зоны образца показана на рисунке 3. Для съёмки использовался режим обратноотражённых электронов, поэтому можно оценить взаимное проникновение сплавов. На структуре сплав Inconel 718 выглядит более тёмным, а сплав ЖС32 более светлым. Толщина переходной зоны непостоянна и составляет около 200-300 мкм. Изменение толщины переходного слоя вызвано различным наложением лазерных проходов в слоях. Из-за использования в стратегии лазерного сканирования поворота, ванны расплава накладываются на нижележащие треки не одинаково по площади сечения образца. Поскольку для изготовления образцов использовалась толщина нанесения порошкового слоя 50 мкм, можно сделать вывод, что переход от одного состава к другому происходит на протяжении 4-6 слоёв. Формирование такой зоны способствует большей стойкости материалов к расслаиванию, в отличие от традиционных композиционных материалов, где переход обычно резкий.

Структура переходной зоны при более крупном увеличении показана на рисунке 4.



Рисунок 2 –  
Биметаллический  
образец из сплавов  
ЖС32 и Inconel 718

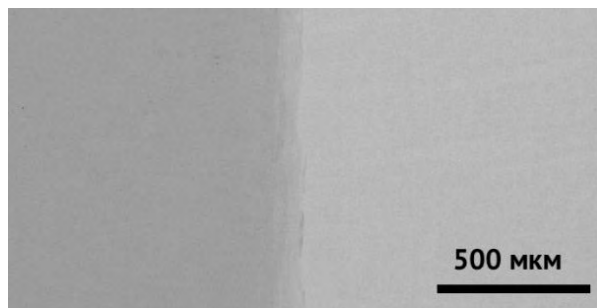


Рисунок 3 – Переходная зона  
биметаллического образца. Слева –  
Inconel 718, справа – ЖС32

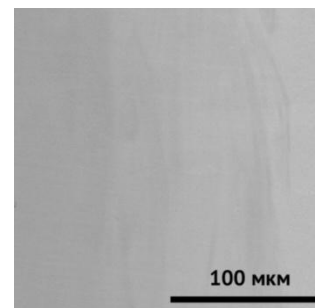


Рисунок 4 -  
Переходная зона  
биметаллического  
образца. Слева –  
Inconel 718, справа –  
ЖС32

На структуре переходной зоны можно различить отдельные ванны расплава. Их структура имеет слоистый вид из более светлых и более темных полос. Причём доля светлых и темных полос меняется в зависимости от расположения слоя в переходном слое. Это говорит о том, что за время существования ванны расплава в жидком виде полная гомогенизация не успевала проходить. В процессе расплавления порошкового слоя и части нижележащего слоя происходило взаимное замешивание за счёт действия конвекции Марангони, однако до полностью равномерного состава не выравнивался.

Такие неравномерности состава могут быть скорректированы за счёт термической обработки, где благодаря диффузии компонентов возможно сделать переход состава более плавным.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект No 197930002).

### **Заключение**

Проведено изготовление биметаллических образцов из никелевых сплавов Inconel 718 и ЖС32. Получено, что толщина переходной зоны составляет около 200-300 мкм. В переходной зоне образца наблюдается неполное перемешивание компонентов, что вызвано малым временем существования ванны расплава.

### **СПИСОКЛИТЕРАТУРЫ**

1. Sufiiarov, V. S., Popovich, A.A., Borisov, E.V., Polozov, I.A. Selective laser melting of heat-resistant ni-based alloy //Non-Ferrous Metals. - 2015. - т. 2015. - №. 1. - с. 32-35.
2. Smelov, V. G., Sotov, A. V., Agapovichev, A. V. Research on the possibility of restoring blades while repairing gas turbine engines parts by selective laser melting //IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. - IOP Publishing, 2016. - Т. 140. - №. 1. - С. 012019.

3. Smelov, V. G. et al. Selective Laser Melting of Metal Powder Of Steel 316L //IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. - IOP Publishing, 2016. - T. 142. - №. 1. - C. 012071.

4. Strößner, J., Terock, M., Glatzel, U. Mechanical and Microstructural Investigation of Nickel-Based Superalloy IN718 Manufactured by Selective Laser Melting (SLM) //Advanced Engineering Materials. - 2015. - T. 17. - №. 8. - C. 1099-1105.

5. Wang, X., Gong, X., Chou, K. Review on powder-bed laser additive manufacturing of Inconel 718 parts //Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture. - 2016. - C. V001T001A053-V001T001A053.

6. Zhang, D. et al. Effect of standard heat treatment on the microstructure and mechanical properties of selective laser melting manufactured Inconel 718 superalloy //Materials Science and Engineering: A. - 2015. - T. 644. - C. 32-40.

7. Popovich, A.A., Sufiiarov, V.S., Polozov, I.A., Borisov E.V. Microstructure and mechanical properties of Inconel 718 produced by SLM and subsequent heat treatment //Key Engineering Materials. - 2015. №651-653, - C. 665-670.

А.М. Грачева, И.А. Полозов, А.А. Попович  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Санкт-Петербург, Россия, gracheva.am@mail.ru

## СЕЛЕКТИВНОЕ ЛАЗЕРНОЕ ПЛАВЛЕНИЕ БИМЕТАЛЛИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА ВТ6/ТИТАНОВЫЙ ОРТО-СПЛАВ

### Аннотация

В работе рассмотрено мультиматериальное аддитивное производство комбинации сплавов ВТ6 и титанового орто-сплава на базе  $Ti_2AlNb$ . Использовался процесс селективного лазерного плавления (СЛП), в котором для изготовления образцов биметаллического материала поочередно использовались порошки сплавов ВТ6 и орто-сплава. Определено влияние параметров процесса СЛП на свойства и структуру полученных биметаллических образцов, проведен анализ структуры и исследование микротвердости переходной зоны. Результат работы показывает, что для избежания образования трещин в материале  $Ti_2AlNb$  необходим высокотемпературный предварительный нагрев подложки, а для получения более однородной структуры и свойства переходной зоны необходим отжиг.

*Ключевые слова:* Селективное лазерное плавление, биметаллический материал, титановый сплав

### Введение

В настоящее время в России и за рубежом активно развивается отрасль авиационной и аэрокосмической промышленности, в связи с этим важным параметром при проектировании становится снижение веса конечного изделия [1]. Титановые сплавы имеют широкое распространение, благодаря высокой прочности, коррозионной стойкости, жаропрочности и легкого веса [2].

Сплавы на основе алюминидов титана востребованы благодаря низкой плотности, высокой удельной прочности и хорошим высокотемпературным свойствам. Однако из-за плохой пластичности при комнатной температуре производство деталей из этих сплавов традиционными методами сильно усложняется [3]. Аддитивное производство упрощает процесс создания высокопроизводительных компонентов сложной геометрии. Актуальность биметаллических соединений объясняется тем, что комбинирование интерметаллидного сплава с высоким уровнем жаропрочности, но низкой пластичностью, и сплава с высоким уровнем пластичности при комнатной температуре, но низкой прочностью при повышенных температурах, позволит получить изделия, локальные свойства которого будут оптимизированы с учетом разных условий работы его различных частей [4]. При этом уже проведены исследования, которые показывают, что получение подобных конструкций диффузионной сваркой или иными схожими методами образует дефекты, хрупкие фазы и остаточные напряжения [5]. Кроме того, данные методы в отличие от аддитивных технологий, накладывают существенные ограничения по геометрии изделий.

## Методы

В данной работе использовали порошок сплава Ti-22Al-23Nb-0.8Mo-0.3Si-0.4C-0.1B-0.2Y (ат. %) полученный технологией EIGA (Electrode Induction Guide Inert Gas Atomization – индукционная плавка электрода с распылением газом) и поставляемый компанией AMSPowders (Китай) и порошок сплава ВТ6 производства LPW с размером частиц в пределах 15–45 мкм. Порошки имеют сферическую форму частиц.

Процесс изготовления образцов проводился на установке AconityMIDI (Aconity GbmH), которая оборудована волоконным лазером с максимальной мощностью 1000 Вт. Изготовление проводилось на молибденовой платформе. Для предотвращения окисления технологическая камера непрерывно заполнялась аргоном высокой чистоты. Сначала изготавливалась первая по высоте половина образца из одного материала, затем совершали замену порошка в установке и продолжали печать. После завершения процесса образцы охлаждались до комнатной температуры.

На основании результатов предыдущих исследований схожих порошков для изготовления образцов были выбраны значения мощности лазера, скорости сканирования, расстояния между проходами лазера, толщины слоя и плотности энергии. Изменяемыми параметрами установили наличие предварительного подогрева подложки и дальнейшее проведение отжига при температуре 1015°C с охлаждением в печи. Так выбрали три режима для процесса СЛП:

1. Производился нагрев подложки до 700°C, после чего производилась печать половины образца, состоящего из орто-сплава. Далее охлаждали заготовку, производили замену порошка в установке и без подогрева продолжали печать сплавом ВТ6.

2. Без предварительного подогрева печатали половину образца, состоящего из ВТ6, далее производили замену порошка и нагрев платформы и заготовки до 700°C и продолжали печать из порошка орто-сплава.

3. Аналогичен второму варианту, но после изготовления образца проводился отжиг при температуре 1015°C в течение 90 минут с последующим охлаждением в печи.

После изготовления образцы были срезаны с подложки и отполированы. Микроструктуру изучали с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) Mira 3 LMU (TESCAN). Измерение микротвердости проводились на твердомере Buehler VH1150 при нагрузке 500 г. Для одного образца проводилось не менее семи измерений.

## Результаты и обсуждение

Как видно из рисунка 1 орто-сплаву необходим подогрев, так как без подогрева происходит образование трещин. Со стороны сплава ВТ6, напротив, наблюдается равномерная структура. Образование трещин в орто-сплаве связано с его высокой хрупкостью и возникновением высоких термических напряжений в процессе СЛП, вызванных периодическими быстрыми циклами нагрева и охлаждения материала. Таким образом, без предварительного подогрева подложки возникающие термические напряжения приводит к образованию трещин в части образца из орто-сплава. В случае применения предварительного подогрева подложки до 700 °C в процессе СЛП трещины в образце не образуются благодаря пониженному уровню термических напряжений.

На рисунке 2 показано изменение состава в переходной зоне для образца, изготовленного с подогревом платформы 700 °С. Наблюдается резкое ступенчатое снижение содержания Nb и рост V у границы переходной зоны.

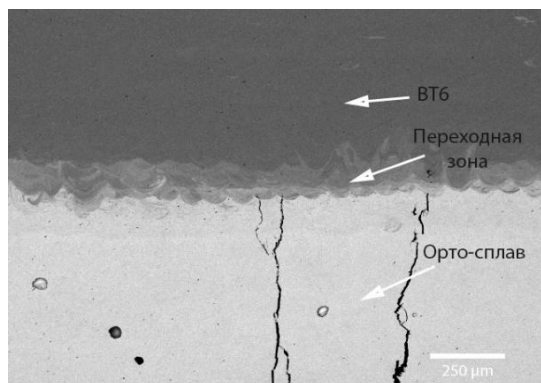


Рисунок 1 – Структура биметаллического образца, изготовленного без подогрева подложки

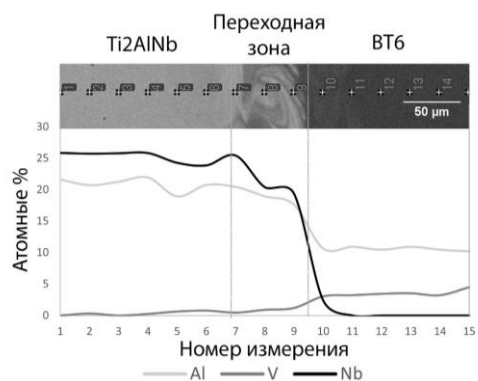


Рисунок 2 – Изменение состава в переходной зоне образца титановый орто-сплав/VT6, изготовленного с подогревом

На рисунке 3 представлено изменение состава в переходной зоне образца титановый орто-сплав/VT6 после термообработки. Видно, что в сравнении с предыдущим графиком (рисунок 2) в переходной зоне происходит достаточно плавное изменение состава. Содержание V увеличивается равномерно в пределах переходной зоны. Это связано с диффузией элементов при отжиге.

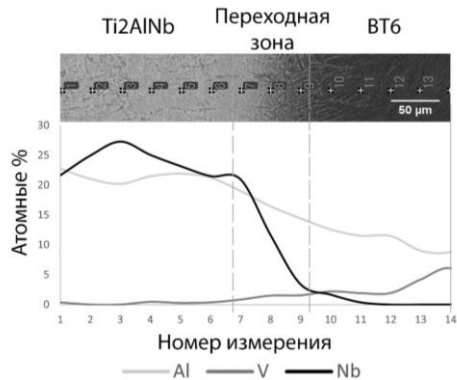


Рисунок 3 – Изменение состава в переходной зоне образца титанового орто-сплав/VT6 после термообработки

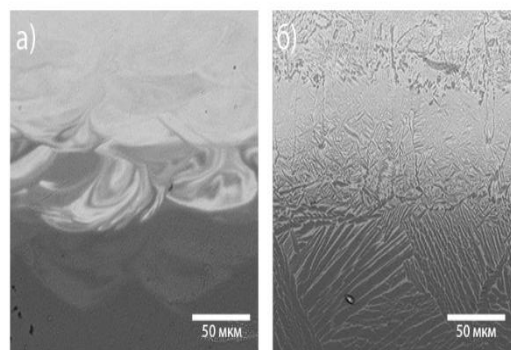


Рисунок 4 – Микроструктуры образцов а) без отжига; б) с отжигом

Микроструктура и фазовый состав представлены на рисунке 4. На образце без термообработки микроструктура VT6 - α'-мартенсит, а у Ti<sub>2</sub>AlNb-сплава – орто-фаза, при этом отчетливо видны ванны расплава в переходной зоне. Толщина переходной зоны составляет ориентировочно 40–50 мкм, что сопоставимо с толщиной порошкового слоя, применяемого в процессе СЛП. После отжига со стороны VT6 α'-мартенсит распадается на α- и β-фазы, образуя при этом пластинчатую структуру, а состав переходной зоны становится более равномерным. Часть, состоящая из орто-сплава, после отжига имеет структуру из β/V2-фазы и орто (Ti<sub>2</sub>AlNb) фазы.

На графике (рисунок 5) приведено исследование микротвердости, где точки, соответствующие нулевой координате, являются показателями микротвердости в



переходной зоне. Распределение всех измерений приведено в порядке от ВТ6 к ортосплаву.

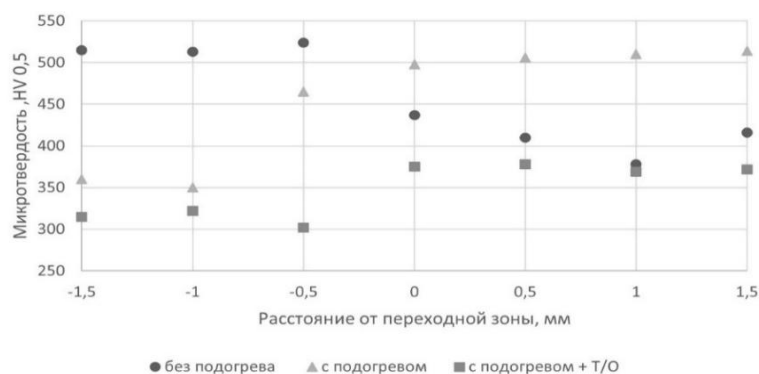


Рисунок 5 – Исследование микротвердости

### Заключение

В данной работе рассмотрены режимы для получения биметаллического материала ВТ6/титановый орто-сплав процессом СЛП. Микроструктура, фазовый состав и механические свойства были значительно изменены путем предварительного подогрева платформы и последующей термообработки. Таким образом при отжиге мы получили более равномерную структуру переходной зоны, а при отсутствии отжига наблюдались явные ванны расплава. Также наблюдалось более плавное изменение состава элементов в переходной зоне при термообработке, что достигается за счет диффузии. Таким образом получение комбинированных деталей из биметаллического материала орто-сплав/ВТ6 возможно с помощью метода СЛП, при этом для предотвращения образования дефектов в части орто-сплава в виде трещин необходимо применение высокотемпературного подогрева платформы.

### БЛАГОДАРНОСТЬ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект No 19-79-30002).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Yantao, Liu Microstructure and mechanical properties of TA15-Ti2AlNb bimetallic structures by laser additive manufacturing / Liu Yantao, Zhang Yongzhong. - Текст : непосредственный // Materials Science and Engineering: A. - 2020. - № 795.
2. J. Kumpfert, Intermetallic Alloys Based on Orthorhombic Titanium Aluminide, Adv. Eng. Mater. 3 (2001) 851. doi:10.1002/1527-2648(200111)3:11<851::AID-ADEM851>3.0.CO;2-G.
3. Microstructure controlling by heat treatment and complex processing for Ti2AlNb based alloys / J. Peng, Y. Mao, S. Li, X. Sun. - // Materials Science and Engineering: A. - 2001. - № 299. - С. 75-80.
4. Singh, R.; Kumar, R.; Farina, I.; Colangelo, F.; Feo, L.; Fraternali, F. Multi-Material Additive Manufacturing of Sustainable Innovative Materials and Structures. Polymers 2019, 11, 62.
5. Zhan-Qi Liu, Xiao-Ou Zhu, Gui-Li Yin & Qi Zho (2022) Direct bonding of bimetallic structure from Ti6Al4V to Ti48Al2Cr2Nb alloy by laser additive manufacturing, Materials Science and Technology, 38:1, 39 - 44, DOI: [10.1080/02670836.2021.2023287](https://doi.org/10.1080/02670836.2021.2023287)

А.М. Грачева, И.А. Полозов, А.А. Попович  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Санкт-Петербург, Россия, gracheva.am@mail.ru

## ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ СПЛАВА НА ОСНОВЕ ОРТОРОМБИЧЕСКОГО АЛЮМИНИДА ТИТАНА

### Аннотация

В работе рассмотрен порошок Ti - 22 Al- 23 Nb- 0.8 Mo- 0.3 Si- 0.4 C-0.1 B- 0.2Y (ат. %) и методика получения из него образцов интерметаллида титана, используя для изготовления процесс селективного лазерного плавления (СЛП) с высокотемпературным подогревом подложки. Определено влияние параметров процесса селективного лазерного плавления на свойства и структуру полученных образцов, проведен анализ структуры и исследование микротвердости. Результат работы показывает, что для избежания образования трещин в материале необходим высокотемпературный предварительный нагрев подложки, температура подогрева оказывает существенное влияние на структурно-фазовое состояние образцов, при этом микролегирование существенно не повлияло на конечную микроструктуру.

*Ключевые слова:* микроструктура; алюминид титана; селективное лазерное плавление.

### Введение

Интерметаллические сплавы на основе алюминид титана представляют большой интерес для авиационной и аэрокосмической промышленности в связи с их высокой удельной прочностью, жаростойкостью и возможностью заменять более тяжелые сплавы [1]. Орторомбические сплавы на основе Ti<sub>2</sub>AlNb (O-фаза) имеют улучшенные свойства по сравнению с Ti<sub>3</sub>Al и TiAl [2-3]. Традиционные методы производства являются дорогостоящими и усложняются своей многостадийностью [4]. Аддитивные технологии позволяют получать изделия сложной геометрии с улучшенными свойствами [5].

В данной работе представлен сплав на основе Ti<sub>2</sub>AlNb с заданным химическим составом для использования в процессе СЛП с высокотемпературным предварительным нагревом подложки. Основываясь на экспериментальных данных и литературе, в качестве объекта исследования был использован атомизированный порошок орто-сплава с добавлением дополнительных легирующих элементов. Mo и Si добавляют для повышения стойкости к окислению и сопротивления ползучести [6]. Небольшое количество Si и C увеличивает рабочие температуры, повышает прочность и сопротивление ползучести [7]. Бор добавляется для измельчения первичных зерен β-фазы при кристаллизации, таким образом приводя к повышению пластичности [8]. Добавление Y предполагало образование тугоплавких соединений с кислородом и азотом, что должно привести к замедлению процесса диффузии, уменьшению размера зерен, а также рафинированию сплава.

### Методы

В данной работе использовали порошок Ti - 22 Al - 23 Nb- 0.8 Mo- 0.3 Si- 0.4 C- 0.1 B- 0.2 Y (ат. %) полученный технологией EIGA (Electrode Induction Guide Inert

Gas Atomization – индукционная плавка электрода с распылением газом) и поставляемый компанией AMSPowders (Китай). Размер частиц порошка от 14 до 62 мкм. Предварительно сплав был микролегирован углеродом, бором и иттрием.

На рисунке 1 видно, что в основном частицы порошка имеют сферическую форму и дендритную микроструктуру, характерную для газового распыления.

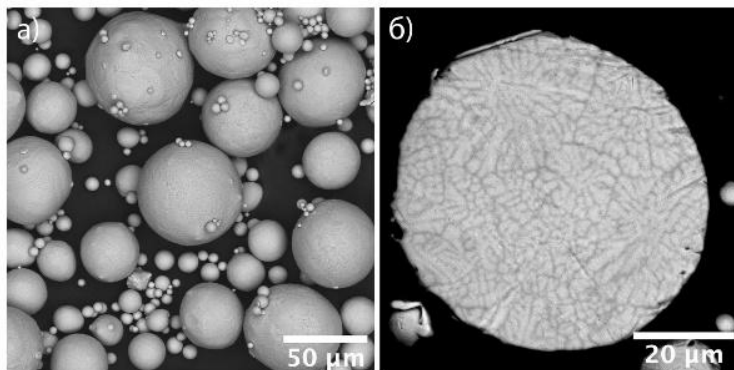


Рисунок 1 – СЭМ-изображение порошка:  
а) морфология поверхности; б) поперечное сечение

Для изготовления образцов использовали установку AconityMIDI (Aconity GbmH). Система оснащена волоконным лазером с максимальной мощностью 1000 Вт. Диаметр луча был установлен около 80 мкм. Изготовленные образцы имели кубическую форму со сторонами 10 мм. Изготовление проводилось на подложке Ti-6Al-4V, которая находилась на молибденовой платформе, предварительно разогретой до заданной температуры. Технологическая камера непрерывно заполнялась аргоном высокой чистоты. После завершения процесса платформа и образцы охлаждались до комнатной температуры со скоростью охлаждения примерно 5 °С/мин.

Таблица 1 – Комбинации параметров процесса СЛП, использованные для изготовления образцов

#	Мощность лазера, Вт	Скорость сканирования, мм/с	Расстояние между проходами лазера, мкм	Толщина слоя, мкм	Плотность энергии, Дж/мм <sup>3</sup>	Температура предварительного нагрева платформы, °С
1	140	500	100	30	93	300, 700, 850
2	140	600	100	30	78	
3	140	700	100	30	67	
4	140	800	100	30	58	
5	140	900	100	30	52	
6	140	600	120	30	65	
7	140	700	120	30	56	
8	140	800	120	30	49	

На основании результатов предыдущих исследований схожего порошка для изготовления образцов были выбраны значения мощности лазера, скорости сканирования, расстояния между проходами лазера и толщины слоя. Плотность энергии стала переменным фактором для исследования влияния параметров процесса

СЛП. Температура предварительного нагрева платформы составляла 300, 700 и 850°C.

После изготовления образцы были срезаны с подложки и отполированы. Оценка микроструктуры проводилась с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) Mira 3 LMU (TESCAN). Измерение микротвердости проводилось на твердомере Buehler VH1150 при нагрузке 500 г. Для одного образца проводилось не менее пяти измерений для определения среднего значения микротвердости.

### Результаты и обсуждение

На рисунке 2 показано влияние температуры предварительного нагрева подложки во время процесса печати на количество трещин в образце.

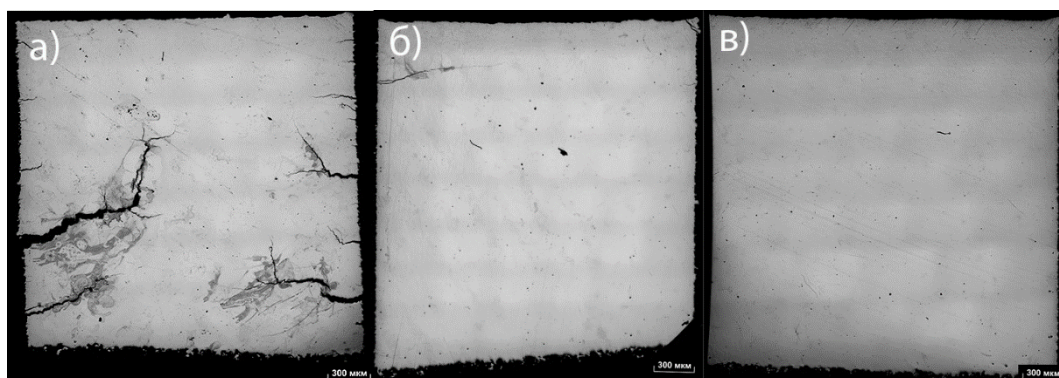


Рисунок 2 – Полированные образцы (оптический микроскоп): а) сильное растрескивание при 300 °С; б) небольшие трещины при 700°С; в) отсутствие растрескивания при температуре 850°С предварительного нагрева платформы

Видно, что использование низкой температуры предварительного нагрева подложки (300 °С) привело к образованию трещин с боковых поверхностей протяженностью до нескольких миллиметров. Из-за высоких термических напряжений во время лазерного спекания порошков и хрупкости сплава  $Ti_2AlNb$  произошло растрескивание образца, это показывает, что температура предварительного нагрева до 300 °С является недостаточной. При повышении температуры до 700 °С в основном образцы были без трещин или заметны редкие небольшие поверхностные трещины. Дальнейшее повышение температуры предварительного нагрева подложки до температуры 850 °С предотвратило образование трещин.

Из рисунка 3 видно, что образцы с относительной плотностью  $99,9 \pm 0,1\%$  были изготовлены при плотности энергии 49 Дж/мм<sup>3</sup> и температуре предварительного нагрева подложки 850 °С. Повышение плотности энергии приводит к увеличению пористости, образованию сферических пор.

Микроструктура и фазовый состав представлены на рисунке 4 для образцов, изготовленных при различных температурах предварительного нагрева подложки. При 300 °С была получена однофазная микроструктура из  $\beta/V_2$  фазы, что связано с характерными для процесса СЛП высокими скоростями охлаждения при кристаллизации, что препятствует формированию вторичных фаз. Увеличение температуры подогрева до 700 °С приводит к образованию структуры из однородной О-фазы. Если рассматривать микроструктуру материала, изготовленного при подогреве 850°С, то она состоит из двух фаз  $V_2+O$ , где О-фаза выглядит как

игольчатые включения. Объемная доля О-фазы значительно уменьшилась, по сравнению с образцом, изготовленным при 700 °С.

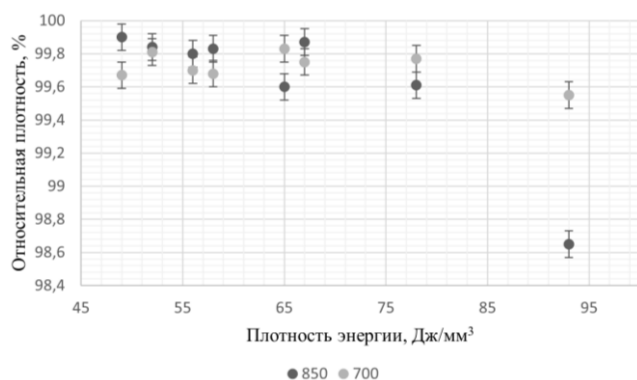


Рисунок 3 – Влияние плотности энергии и предварительного нагрева подложки на относительную плотность образцов

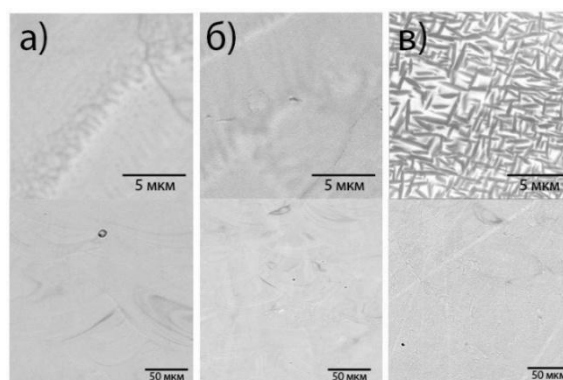


Рисунок 4 – Микроструктуры образцов, изготовленных при предварительном нагреве подложки а) 300 °С; б) 700 °С; в) 850 °С. При разном увеличении

Из таблицы 2 видно, что наибольший показатель микротвердости наблюдается у образца, температура предварительного нагрева подложки которого была 700 °С, что вызвано следствием рассмотренной выше микроструктуры, которая характеризуется наибольшей долей интерметаллидной О-фазы. В случае 850 °С показатель микротвердости выше, чем у 300 °С, но ниже, чем у 750 °С. Это обусловлено наличием В2+О, из-за чего повышается пластичность в отличие от чистой О-фазы.

Таблица 2 – Микротвердость при различной температуре предварительного нагрева платформы

#	Температура предварительного нагрева платформы, °С	Плотность энергии, Дж/мм <sup>3</sup>	Средняя микротвёрдость, HV 0,5
1	300	58	366
2	700	58	492
3	850	58	406

### Заключение

Рассмотренные и выбранные в данной работе режимы для процесса СЛП и варианты предварительного высокотемпературного подогрева платформы позволяют получать минимальное количество внутренних дефектов, следовательно, влиять на относительную плотность получаемых изделий. Микроструктура, фазовый состав и механические свойства орторомбического титанового сплава были значительно изменены путем выбора разной температуры предварительного нагрева платформы. Таким образом при нагреве до 300°С мы получили микроструктуру, состоящую из β/В2 фазы, при повышении температуры до 700°С происходило формирование О-фазы, а при 850°С - В2+О. Наибольшая относительная плотность 99,9±0,1% была достигнута при плотности энергии 49 Дж/мм<sup>3</sup> и температуре предварительного нагрева подложки 850°С.

## БЛАГОДАРНОСТЬ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 18-13-00111, <https://rscf.ru/project/18-13-00111/>

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. J. Kumpfert, Intermetallic Alloys Based on Orthorhombic Titanium Aluminide, *Adv. Eng. Mater.* 3 (2001) 851. doi:10.1002/1527-2648(200111)3:11<851::AID-ADEM851>3.0.CO;2-G.
2. Sadi, F. A. On the B2→O phase transformation in Ti–Al–Nb alloys / F. A. Sadi, C. Servant. - // *Materials Science and Engineering: A*. - 2003. - № 346. - С. 19-28.
3. Деформируемый интерметаллидный титановый орто-сплав, легированный иттрием. Часть 2. Исследование влияния термической обработки на микроструктуру и механические свойства катаной плиты / Е. Б. Алексеев, Н. А. Ночовная, А. В. Новак, П. В. Панин. - Текст : непосредственный // *ТРУДЫ ВИАМ*. - 2018. - № 12. - С. 37-45.
4. Microstructure controlling by heat treatment and complex processing for Ti<sub>2</sub>AlNb based alloys / J. Peng, Y. Mao, S. Li, X. Sun. - // *Materials Science and Engineering: A*. - 2001. - № 299. - С. 75-80.
5. Additive Manufacturing of Metallic Materials: A Review / Y. Zhang, L. Wu, X. Guo [и др.]. - // *Journal of Materials Engineering and Performance*. - 2018. - № 27. - С. 1-13.
6. Y. HE, R. HU, W. LUO, T. HE, Y. LAI, Y. DU, X. LIU, Microstructural evolution and creep deformation behavior of novel Ti–22Al–25Nb–1Mo–1V–1Zr–0.2Si (at.%) orthorhombic alloy, *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*. 29 (2019) 313–321. doi:10.1016/S1003-6326(19)64941-1.
7. D. Wimler, J. Lindemann, M. Reith, A. Kirchner, M. Allen, W.G. Vargas, M. Franke, B. Klöden, T. Weißgärber, V. Güther, M. Schloffer, H. Clemens, S. Mayer, Designing advanced intermetallic titanium aluminide alloys for additive manufacturing, *Intermetallics*. 131 (2021) 107109. doi:10.1016/j.intermet.2021.107109.
8. J. Zhu, A. Kamiya, T. Yamada, W. Shi, K. Naganuma, Influence of boron addition on microstructure and mechanical properties of dental cast titanium alloys, *Mater. Sci. Eng. A*. 339 (2003) 53–62. doi:10.1016/S0921-5093(02)00102-8.

В.С. Петрович, В.Г. Теплухин, М.В. Новоселов, А.И. Попов  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Санкт-Петербург, Россия, [vovka1234514@mail.ru](mailto:vovka1234514@mail.ru)

## ПРИМЕНЕНИЕ СТРУЙНОЙ ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МЕТАЛЛОГРАФИЧЕСКИХ ОБРАЗЦОВ

### Аннотация

В работе рассмотрена возможность обработки поверхности образцов электролитической плазменной струей с целью последующего проведения металлографических исследований. Показана применимость струйной электролитно-плазменной обработки для получения микрошлифов без применения абразивного воздействия. Отмечены параметры технологического процесса, регулирование которых позволяет определять режим обработки для конкретных материалов и различного начального уровня поверхности.

*Ключевые слова:* поверхность, шероховатость, электролитно-плазменная обработка, металлографический шлиф.

### Введение

Оптическая металлография в настоящее время остается одним из основных методов изучения микроструктуры металлических материалов.

Для приготовления металлографического шлифа с использованием абразивных материалов используется три основных этапа.

Первый этап – последовательное ортогональное шлифование на абразивных материалах разной зернистости. Второй этап полирование шлифа перемещением его по поверхности ворсистых материалах (войлок, фетр, сукно) с добавлением эмульсии, содержащей микроабразивные частицы. На третьем этапе проводится выявление структуры с использованием различных способов металлографического травления [1]. На поверхности образца в этом случае создаются механические напряжения.

Во многих областях техники не заменимы материалы, обладающие гранцентрированной кубической (ГЦК) кристаллической решеткой матрицы. Аустенитные стали и сплавы немагнитны, не подвержены хладноломкости, а при соответствующем легировании обладают высокой коррозионной стойкостью. Известно, что в большинстве сталей этого класса содержание аустенитообразующих элементов недостаточно для получения стабильной ГЦК-структуры, но за счет высокого общего содержания легирующих элементов происходит значительное снижение температуры начала мартенситного превращения вплоть до его полного подавления [2]. Однако под действием напряжений возможно превращение аустенита в мартенсит. Это приводит к упрочнению поверхностного слоя при эксплуатации (ударное и абразивное воздействие на элементы дробильно-размольного оборудования, крестовины рельсов, зубья ковшей экскаваторов и др.). Сталь Гадфильда 110Г13Л по-прежнему широко применяется несмотря на существенные сложности и ограничения в ее использовании. Отмечается, что с точки зрения эксплуатационных свойств стали с менее стабильной аустенитной структурой могли бы обладать некоторыми преимуществами [3, 4]. В высшей школе машиностроения СПбПУ проводится работа по определению режимов термической обработки

износостойких нержавеющей сталей, приводящих к получению метастабильной аустенитной структуры при обеспечении высоких механических свойств [5, 6].

Мартенситное превращение под действием напряжений в поверхностном слое, создавая положительный эффект в отношении износостойкости, коренным образом искажает представление о структуре в объеме металла при применении традиционного абразивного шлифования образцов. Одним из способов, позволяющих удалить с поверхности слой материала при высокой исходной шероховатости поверхности  $Ra > 25$ , является струйная электролитно-плазменная обработка. Данный вид обработки позволяет получать полированные поверхности с параметром шероховатости  $Ra \geq 0,034$ . Однако опыт использования струйной размерной и суперфинишной обработки для изготовления металлографических шлифов в литературе не встречается. Целью настоящей работы являлось определение принципиальной возможности использования электролитно-плазменной обработки для приготовления металлографических шлифов без использования абразивных материалов. Ставилась задача подбора регулируемых параметров, таких как напряжение, межэлектродный промежуток и состав электролита.

### Оборудование и материалы

Исследование проводилось на образцах диаметром 36 мм и высотой 30 мм из стали 95X18 (ГОСТ 5949-2018) после закалки с температуры 1190 °С с содержанием метастабильного аустенита около 96% [6].

Применялась опытно экспериментальная установка (рис.1) с бесступенчатой регулировкой напряжения и полым катодом [7]. В качестве регулируемых параметров использовались напряжение  $UВ$ , величина межэлектродного промежутка  $H$ , мм и состав электролита.



а)



б)

Рисунок 1 – Установка для электролитно-плазменной обработки поверхности: а) внешний вид установки; б) электрод-инструмент



В качестве контролируемого параметра с помощью профилометра TR-200 определялся параметр шероховатости поверхности Ra, мкм.

В качестве электролита для размерной обработки исследовался раствор 10-% раствор NaCl в водопроводной воде и для суперфинишной обработки 0,03-% Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> + 0,02 % H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> в водопроводной воде.

В данном исследовании ставилась задача предварительной оценки возможности применения и целесообразности дальнейшего изучения электролитно-плазменной обработки в целях получения образцов без деформации поверхностных слоев для металлографического анализа.

## Результаты и обсуждение

Результаты проведенных измерений приведены в таблице 1.

Таблица 1- Результаты измерений.

№	Напряжение U, В	Сила тока I, А	Подача, мм/мин	Межэлектродный промежуток, мм	Ra, мкм	Состав электролита
1	275	4,8	210	3-3,5	3,2	10-% раствор NaCl в воде
2	160	5,2	210	3-3,5	3,3	10-% раствор NaCl в воде
3	115	6,5-7	210	2	3,6	10-% раствор NaCl в воде
4	115	6	158	2	3,9	10-% раствор NaCl в воде
5	200	3,6	144	5-5,5	5,1	10-% раствор NaCl в воде
6	330	3,7	144	12	6,1	10-% раствор NaCl в воде
7	300	2,5-3	180	7	0,2	0,03-% Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> + +0,02-% H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> в воде

Измерения шероховатости поверхности металлографических шлифов из учебной коллекции лаборатории показали, что в зависимости от состава материала и степени химического воздействия при травлении изучаемая величина изменялась от 0,5 до 0,015 мкм. Известно [1], что в качестве «последнего» (наиболее тонкого) шлифующего материала перед полировкой при традиционном способе приготовления шлифов может использоваться бумага или ткань с абразивными частицами размером 4 – 8 мкм.

Таким образом, по характеристикам шероховатости бездеформационная подготовка шлифов при электролитно-плазменной обработке соответствует аналогичной по задачам традиционной обработке после шлифования и после травления.

В рассмотренном диапазоне параметров наибольшее влияние на шероховатость поверхности оказывает состав электролита и величина межэлектродного промежутка.

На рисунке 2 представлено состояние поверхности непосредственно при электролитно-плазменной обработке поверхности при различных режимах.

На рисунке 2а представлен исходный вид образца после термической обработки, которой предшествовала отрезка ленточной механической пилой.

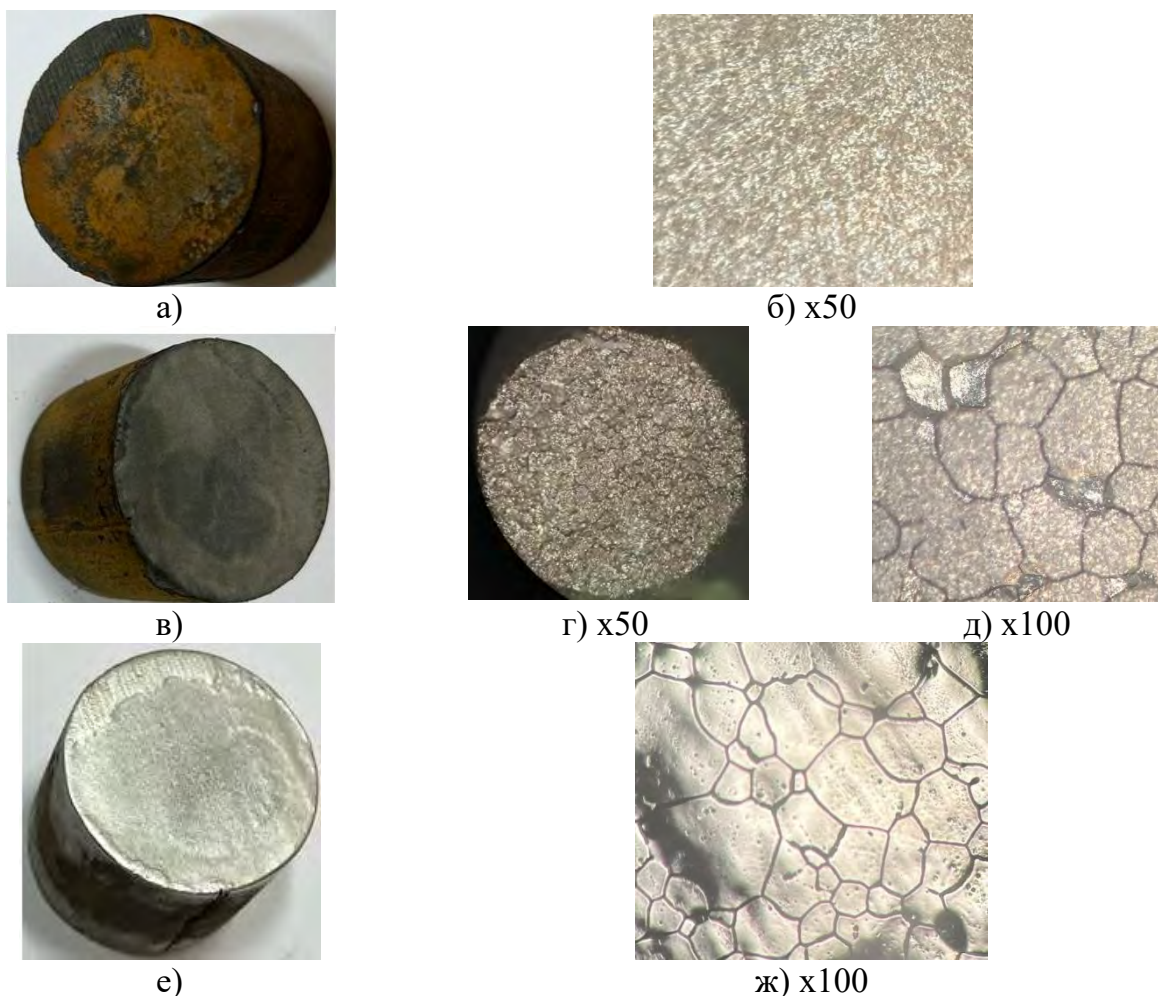


Рисунок 2 – Внешний вид и микроструктура образца после электролитно-плазменного полирования: а) вид исходного образца; б) вид микроструктуры после обработки по режимам 1-4; в), г), д) вид и микроструктура образца после обработки по режимам 5-6; е) вид и микроструктура образца после обработки по режиму 7 (полирование)

Видно, что при электролитно-плазменной обработке образца одновременно с выравниванием поверхности происходит травление, состоящее в селективном растворении различных структурных составляющих (рис.2 б). Первоначально происходит выявление светлых карбидных частиц при сохранении следов механической обработки. Затем (рис. 2 г,д) может происходить избыточное травление, проявляющееся в интенсивном растворении межфазных границ и приводящее практически к выкрашиванию частиц карбидов и даже кристаллов твердого раствора матрицы. Это видно и по показателям шероховатости поверхности. Подобный процесс может наблюдаться при любом способе металлографического травления. Но при электролитно-плазменной обработке процесс идет наиболее интенсивно.

Полирование по режиму 7 (рис. 2 ж) приводит к выявлению нерастворенных карбидов и зерна аустенита.

### **Заключение**

Проведенные исследования показали возможность использования электролитно-плазменной обработки для приготовления металлографических

шлифов, избегая пластической деформации поверхности. Показано, что одновременно с процессами шлифования и полировки происходит травление поверхности.

Необходимо создание экспериментальной установки аналогично [8, 9, 10] для электролитно-плазменной обработки шлифов и проведение более тщательного исследования по подбору параметров обработки, предпочтительно на материалах с хорошо изученной зависимостью микроструктуры от состава и термической обработки.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Герасимова Л.П. Практическая металлография / Л.П. Герасимова, Ю.П. Гук. - Москва, 2017.
2. Теплухин Г.Н. Материаловедение. Металлические материалы: учеб. пособие / Г.Н. Теплухин, В.Г. Теплухин, И.И. Теплухина. - 2-е изд., испр. – СПб. : ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2022. - 170 с.
3. Мулякко, Н.М. Анализ эксплуатационной стойкости отливок из стали 110Г13Л / Н.М. Мулякко // Известия Челябинского научного центра. - 2001. - вып. 4 (13). - С. 28-30
4. Счастливец В.М. О роли остаточного аустенита в структуре легированных сталей и влиянии на него внешних воздействий. / В.М. Счастливец, Ю.В. Калетина, Е.А. Фокина, А.Ю. Калетин. // Физика металлов и материаловедение. - 2014. - том 115, №9. - С. 962-976
5. Теплухин, В.Г. О поверхностной закалке стали 95Х18 для использования в деталях горного и металлургического оборудования / В.Г. Теплухин, В.П.Третьяков, И.И. Козарь // Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: труды XVII Международной научно-практической конференции IPDME-2020, Санкт-Петербург, 23 апреля 2020г. - С. 260-263
6. Теплухин В.Г. Экспресс-методика определения количества остаточного аустенита / В.Г. Теплухин, И.В. Лопатко, В.Н. Кудрявцев, В.С. Кобчиков, Гао Пань, В.С. Петрович, А.Ю. Стогов, Н.В. Лобанов // Модели и методы развития технологий машиностроения в условиях цифровизации экономики России. - Санкт-Петербург, 2022, С. 131-136
7. Исследование процессов съема металла при электролитической струйной прошивке отверстий в нержавеющей сталях / Попов А.И., Радкевич М.М., Теплухин В.Г. и др. // Современное машиностроение : Наука и образование. - 2021. - № 10. - С. 657-674.
8. Любомудров С.А. Многопараметрический автоматизированный стенд для исследования обрабатываемости труднообрабатываемых сплавов / Любомудров С.А., Макарова Т.А., Паневин С.С. // Современное машиностроение: Наука и образование. - 2016. - № 5. С. 954-970.
9. Разработка оборудования получения металлических материалов для аддитивного производства / Ермаков Б.С., Ермаков С.Б., Однблюдов М.А., Теплухин В.Г. // Хладостойкость. Новые технологии для техники и конструкций Севера и Арктики. Труды Всероссийской конференции с международным участием, посвященной 70-летию профессора-механика, д.т.н. А.В. Лыглаева, 2016. - С. 22-29.
10. Попов А.И. Установка для электролитно-плазменной обработки турбинных лопаток. / А.И. Попов, М.М. Радкевич, В.Н. Кудрявцев, С.В. Захаров, И.С. Кузьмичев. // Патент РФ №2623555. 27.06.2017 .

Б.Н. Сабельников, Е.В. Агеева  
Юго-Западный государственный университет,  
Курск, Россия, [sabelnikovboris1@mail.ru](mailto:sabelnikovboris1@mail.ru)

## ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОГО БЕЗВОЛЬФРАМОВОГО ТВЕРДОСПЛАВНОГО ПОРОШКОВОГО МАТЕРИАЛА

### Аннотация

В работе рассмотрен гранулометрический анализ безвольфрамового твердосплавного порошкового материала, полученного электроэрозионным диспергированием отходов в кислородсодержащей рабочей жидкости – воде дистиллированной. В результате проведенной работы можно сделать вывод о пригодности разработанного материала в качестве шихты для производства новых безвольфрамовых твердых сплавов.

*Ключевые слова:* безвольфрамовый твердый сплав, шихта, электроэрозионное диспергирование, гранулометрический анализ.

### Введение

На сегодняшний день безвольфрамовые твердые сплавы (БВТС) нашли достаточно широкое распространение в качестве материала для производства режущего инструмента, самым же распространенным из них является сплав марки КНТ16. Данный сплав обладает очень высокой твердостью и износостойкостью, что затрудняет процесс его переработки и повторного использования. Актуальность рециклинга данного сплава связана с наличием в его составе дорогостоящих легирующих компонентов, таких как Ti, Ni, Mo [1-3].

Одним из наиболее перспективных и промышленно не применяемых методов измельчения любого токопроводящего материала вне зависимости от его твердости и других свойств является метод электроэрозионного диспергирования (ЭЭД). Однако состав, структура и свойства, диспергированных электроэрозией частиц сплава КНТ16, практически не изучены, что существенно ограничивает возможность применения данных материалов в качестве шихты для получения новых безвольфрамовых твердых сплавов [4-7].

### Методы

Для достижения поставленной цели использовали современные методики исследования и оборудование. Материал для исследования получали методом электроэрозионного диспергирования отходов безвольфрамового твердого сплава (отработанных токарных и фрезерных пластин) в кислородсодержащей рабочей жидкости (вода дистиллированная). Схема процесса диспергирования представлена на рисунке 1.

Далее полученный материал подвергся исследованию гранулометрического состава с применением лазерного анализатора размеров частиц «Analysette 22 NanoТес», внешний вид которого представлен на рисунке 2.

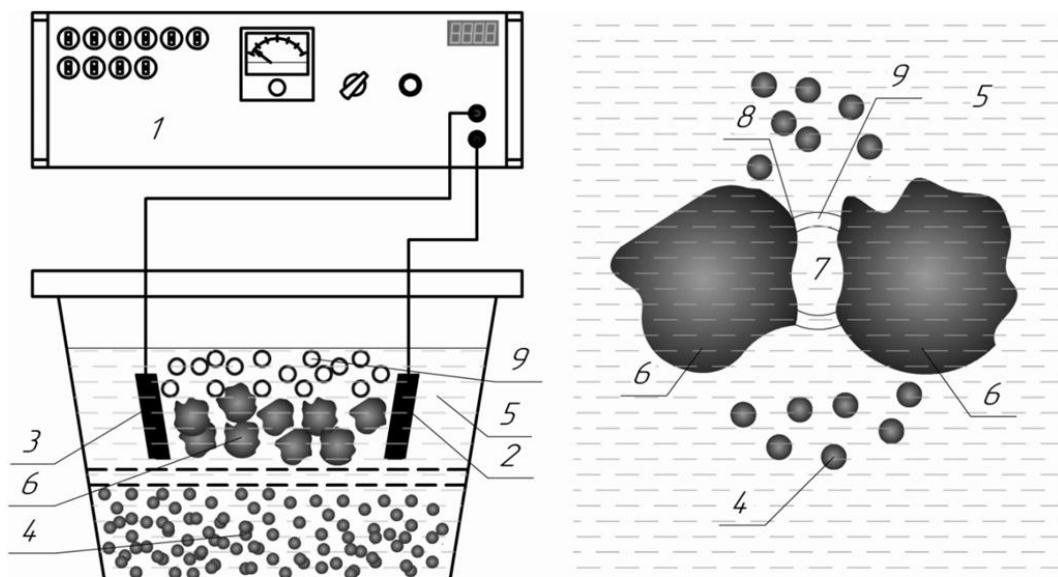


Рисунок 1 – Схема процесса электроэрозионного диспергирования: 1 – генератор импульсов; 2, 3 – электроды; 4 – капли расплавленного материала; 5 – рабочая жидкость; 6 – диспергируемый материал; 7 – канал разряда; 8 – точка разряда, 9 – газовый пузырь



Рисунок 2 – Внешний вид лазерного анализатора размеров частиц «Analysette 22 NanoTec»

### Результаты и обсуждение

Результаты исследования гранулометрического состава частиц безвольфрамового твердого сплава марки КНТ16, полученных методом электроэрозии в воде дистиллированной, представлены на рисунке 3.

Экспериментально установлено, что частицы, полученные из отходов БВТС марки КНТ16, имеют размер частиц от 0,372 мкм до 65,6 мкм. Показано, что средний размер частиц, полученных в воде дистиллированной, составляет 41,63 мкм, что отвечает размерным требованиям шихты для производства безвольфрамовых твердых сплавов, которые находятся в диапазоне от 40 мкм до 60 мкм.

### Заключение

Разработанная технология переработки отходов безвольфрамовых твердых сплавов позволяет получать частицы с размером, удовлетворяющим требованиям к

размеру шихты для производства новых сплавов, который находится в диапазоне от 40 мкм до 60 мкм.

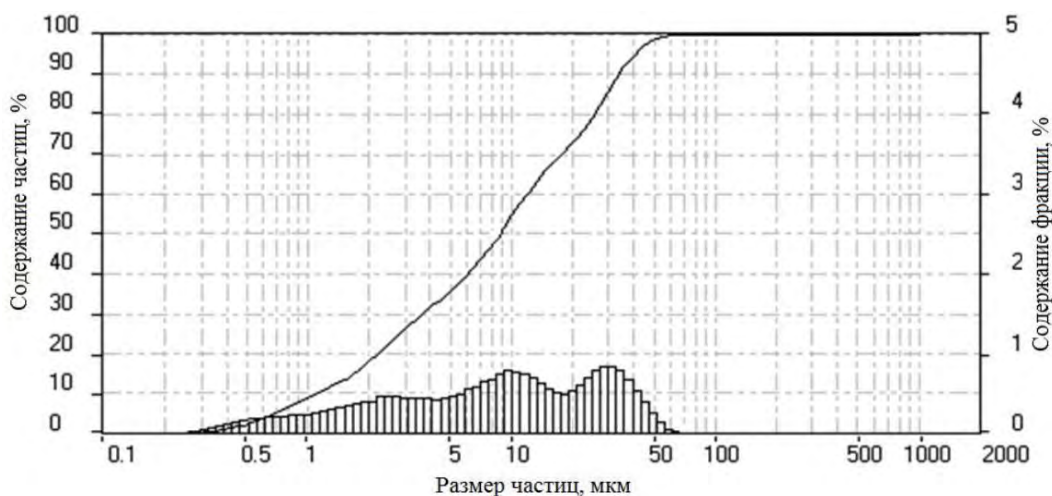


Рисунок 3 – Интегральная кривая и гистограмма распределения частиц по размерам

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агеев, Е.В. Проведение рентгеноспектрального микроанализа твердосплавных электроэрозионных порошков / Агеев Е.В., Латыпова Г.Р., Давыдов А.А., Агеева Е.В. // Известия Юго-Западного государственного университета. 2012. № 5-2 (44). С. 099-102.

2. Агеев, Е.В. Оценка эффективности применения твердосплавных электроэрозионных порошков в качестве электродного материала / Агеев Е.В., Латыпова Г.Р., Давыдов А.А., Агеева Е.В. // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2012. № 1. С. 19-22.

3. Агеев, Е.В. Метод получения наноструктурных порошков на основе системы WC-Co и устройство для его осуществления / Агеев Е.В., Семенихин Б.А., Латыпов Р.А. // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2010. № 5 (283). С. 39-42.

4. Агеев, Е.В. Изучение строения и свойств твердосплавных электроэрозионных порошков, используемых для восстановления и упрочнения деталей автотракторной техники / Агеев Е.В., Агеева Е.В., Давыдов А.А., Бондарев С.А., Новиков Е.П., Молодкин А.Ю. // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. 2013. № 2. С. 69-72.

5. Агеев, Е.В. Исследование химического состава порошков, полученных электроэрозионным диспергированием твердого сплава / Агеев Е.В., Семенихин Б.А., Агеева Е.В., Латыпов Р.А. // Известия Юго-Западного государственного университета. 2011. № 5-1 (38). С. 138а-144.

6. Агеева, Е.В. Исследование влияния электрических параметров установки на производительность процесса электроэрозионного диспергирования отходов свинцовой бронзы в дистиллированной воде / А.С. Переверзев, Е.В. Агеева, А.С. Осьминина // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. – 2018. – №1 (26). – С. 6- 13.

7. Агеев, Е.В. Исследование микроструктуры спеченных электроэрозионных наноконпозиционных порошков свинцовой бронзы / Е.В. Агеев, А.С. Переверзев, А.А. Горохов // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. – 2018. – №3 (28). – С. 29-35.

Н.М. Хорьякова, Е.В. Агеев, К.В. Садова  
Юго-Западный государственный университет,  
Курск, Россия, [natali03011989@yandex.ru](mailto:natali03011989@yandex.ru)

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ И ЭЛЕМЕНТНОГО СОСТАВА ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ПОРОШКОВОЙ МЕДИ, ПОЛУЧЕННОЙ В РАЗБАВЛЕННОМ РАСТВОРЕ СЕРНОЙ КИСЛОТЫ

### Аннотация

Важное место в рациональном использовании материальных ресурсов отводится экономии цветных металлов, особенно меди, которая может быть достигнута благодаря применению прогрессивных высокоэкономичных и экологических технологических процессов. Таким процессом может стать электродиспергирование (ЭД) – метод, позволяющий вторично переработать отходы в порошок микро- и -нанодисперсий. Следует отметить, что поведение диспергированных частиц в процессе электроэрозии в литературе недостаточно освещено. Особо важную роль следует уделять интенсификации процесса электродиспергирования, которое можно достичь путем применения в качестве рабочей жидкости водных растворов кислот [1, 2].

Целью настоящего исследования являлось получение медного порошка электродиспергированием отходов в водном растворе серной кислоты, исследование и сравнение производительности процесса получения и элементного состава электроэрозионной порошковой меди, полученной в водном растворе серной кислоты с результатами, полученными в дистиллированной воде.

*Ключевые слова:* медь, отходы меди, электроэрозионное диспергирование, рабочая жидкость, вода, водном растворе серной кислоты, производительность, элементный состав.

### Введение

В настоящее время важнейшей задачей является создание конкурентоспособной продукции в важнейших отраслях промышленности, что становится возможным благодаря ресурсосберегающей технологии порошковой металлургии. Порошковая металлургия является одним из основных направлений развития современного, высокоэффективного производства технологически развитых стран мира. Электродиспергирование – метод, суть которого заключается в локальном воздействии электрических разрядов между электродами, в результате которого под действием очень высоких температур нагрев происходит расплавление и частичное испарение материала в зоне разряда, а также разрушение токопроводящего материала [1-3].

Электроэрозионное диспергирование осуществляется в рабочей жидкости, которая заполняет межэлектродный промежуток (МЭП) (или зазор между электродами). При получении металлических порошков методом ЭД основным и необходимым условием является отсутствие взаимодействия используемых рабочих растворов с получаемыми в ходе диспергирования частицами. Системы медь-вода и медь-водный раствор кислоты наиболее приемлема для получения порошков

металлов, например, меди [2]. Свойства электроэрозионных порошков меди, полученных в среде дистиллированной воды, изучены и описаны в литературе [4-7].

Особый интерес представляет применение в качестве рабочей жидкости водных растворов сильных кислородсодержащих кислот (серная, азотная), причем, чем сильнее кислота, тем более резко повышается содержание порошка металла. В зоне искрового разряда наряду с диспергированием металла, происходит термическое разложение вводимых в рабочий раствор добавок кислоты с получением продуктов распада, одним из которых является атомарный кислород, который окисляет частицы металла с образованием диспергированного металла с частично или полностью окисленной поверхностью [2, 3].

### **Методы**

Поставленные в работе задачи решались с использованием современного оборудования и взаимодополняющих методов физического материаловедения.

Электродиспергирование (ЭД) отходов меди в среде серной кислоты проведено на экспериментальной установке (Патент РФ № 2449859), разработанной и запатентованной сотрудниками научно-образовательного центра «Порошковая металлургия и функциональные покрытия» Юго-Западного государственного университета [8]. В качестве рабочей жидкости использовали водный раствор серной кислоты с концентрацией 0,18 моль/л. В качестве исходного (диспергируемого) материала использовали отходы электротехнической медной проволоки марки М1.

Элементный состав электроэрозионной порошковой меди, полученной в водном растворе серной кислоты исследовали на энергодисперсионном анализаторе рентгеновского излучения фирмы «EDAX» (Нидерланды), встроенного в РЭМ «Quanta 600 3D» (Нидерланды).

### **Результаты и обсуждение**

Для изучения производительности процесса электродиспергирования отходов меди в водном растворе серной кислоты проведена серия опытов, длительностью 1 час, при напряжении на электродах 220 В, ёмкости разрядных конденсаторов 50 мкФ с варьированием частоты следования импульсов в интервале 0..160 Гц.

По полученным экспериментальным данным, построен график зависимости массовой производительности процесса электродиспергирования отходов меди от частоты следования импульсов (рисунок 1). График производительности процесса электродиспергирования отходов меди в водном растворе серной кислоты (темные столбцы), приведен в сравнении с данными, полученными в ходе электродиспергирования отходов меди в дистиллированной воде (светлые столбцы).

Экспериментально установлено, прямо пропорциональная зависимость производительности процесса электроэрозионного диспергирования меди в водном растворе серной кислоты от частоты следования импульсов в интервале до 100 Гц. Дальнейшее увеличение частоты следования импульсов (120-140 Гц) нецелесообразно в связи с уменьшением интенсивности порошкообразования. При частоте следования импульсов 140-160 Гц и выше процесс диспергирования стал нестабильным, наблюдалось повышенное искрообразование, сопровождающееся слипанием и сплавлением частиц порошкового материала.

Для процесса электроэрозионного диспергирования медных отходов в водном растворе серной кислоты интервал частоты следования импульсов 44-100 Гц является оптимальным. Содержание порошка, полученного в растворе серной кислоты при



частоте следования импульсов 100 Гц, увеличилось на 19 % по сравнению с полученным в дистиллированной воде порошке.

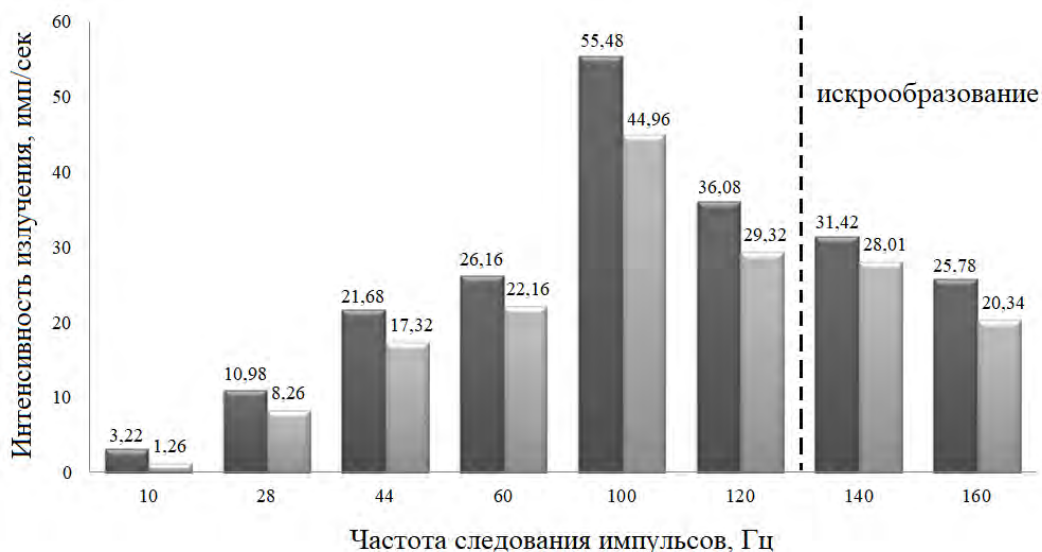


Рисунок 1 – Зависимость производительности (г/час) электродиспергирования медных отходов в дистиллированной воде (красные столбцы) и серной кислоте (синие столбцы) от частоты следования импульсов (Гц)

С целью установления влияния рабочей жидкости на состав продукта исследовали элементный состав электроэрозионной порошковой меди, полученной в дистиллированной воде и керосине. Результаты изучения концентраций элементного и минералогического состава электроэрозионной порошковой меди, полученной в дистиллированной воде и водном растворе серной кислоты, представленные в таблице 1 и на рисунке 2.

Таблица 1 – Элементный состав электроэрозионной порошковой меди, полученной в дистиллированной воде и водном растворе серной кислоты

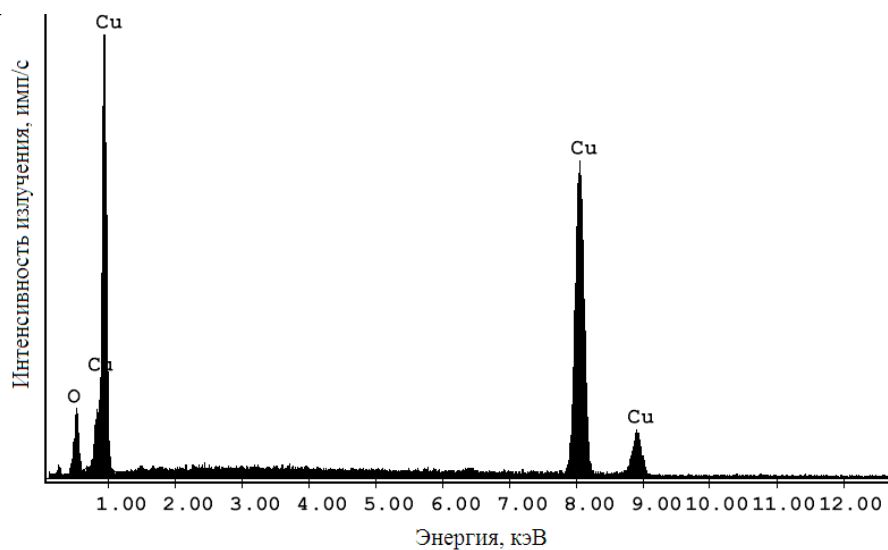
Порошок	Элемент	Вес, %
Электроэрозионный порошок меди, полученный в воде	Cu	99,82
	O	0,18
Электроэрозионный порошок меди, полученный в водном растворе серной кислоты	Cu	100

Установлено, что основными элементами в электроэрозионной порошковой меди, полученной в воде, является медь – 99,82 % и кислород – 0,18 %.

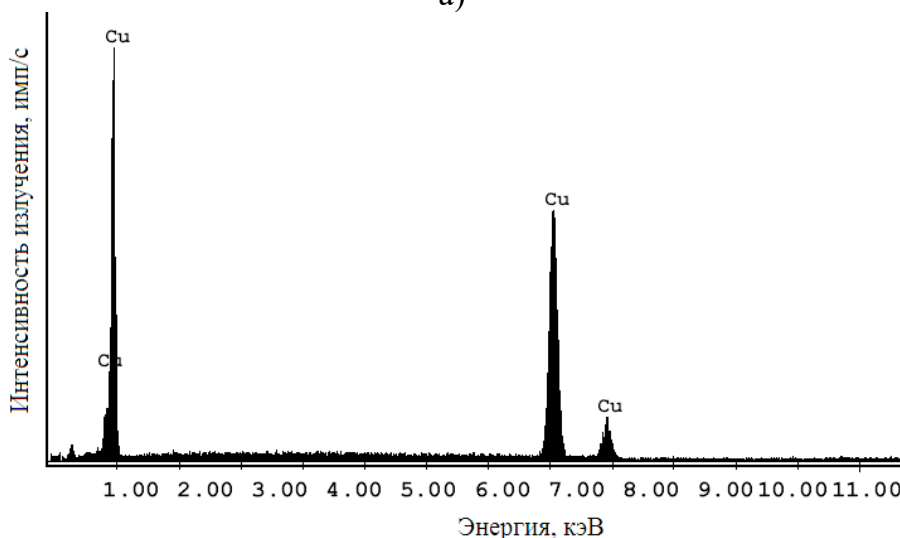
### Заключение

Экспериментально установлены особенности процесса электроэрозии меди в водном растворе серной кислоты. Проведено исследование и сравнение производительности процесса получения и элементного состава электроэрозионной порошковой меди, полученной в водном растворе серной кислоты с результатами, полученными в дистиллированной воде. Установлено, что применение в качестве рабочей жидкости водного раствора сильной кислородсодержащей серной кислоты,

способствует повышению содержания порошка меди, которое заключается в том, что в зоне искрового разряда, наряду с диспергированием металлов, происходит термическое разложение добавок, вводимых в рабочий раствор, с образованием продуктов распада, в том числе, атомарного кислорода.



а)



б)

Рисунок 2 – Элементный состав электроэрозионной порошковой меди:  
а) в воде; б) в серной кислоте

Получение порошка металла происходит при образовании в зоне искрового разряда кислорода в количестве, достаточном для окисления диспергированных медных частиц с образованием на поверхности защитной оксидной пленки, предотвращающей взаимодействие меди с водой. В зависимости от количества образующегося атомарного кислорода, происходит окисление частиц металла с образованием металла с частично окисленной или покрытой защитной оксидной пленкой поверхностью [2]. В случае диспергирования медных отходов в водном растворе кислоты происходит образование частиц меди с защищенной оксидной пленкой поверхностью. В случае диспергирования медных отходов в

дистиллированной воде происходит образование частиц меди с частично окисленной поверхностью.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агеев Е.В. Состав и свойства медных порошков, полученных электроэрозионным диспергированием [Текст]: монография / Е.В. Агеев, Е.В. Агеева, Н.М. Хорьякова. - Курск: ЗАО «Университетская книга», 2014. - 143 с.
2. Байрамов, Р.К. Разработка процессов получения высокодисперсных порошков при электроэрозии металлов в водных растворах: дис. ... д-ра тех. наук: 05.16.06 / Байрамов Рамиз Касум оглы. - М., 2010. - 255 с.
3. Байрамов, Р.К. Получение высокодисперсных порошков металлов и их соединений электроискровым диспергированием металлов: монография [Текст] / Р.К. Байрамов. - М: Издательский дом МИСиС, 2012. - 80 с.
4. Агеева Е.В. Фазовый состав медного порошка, полученного электроэрозионным диспергированием отходов [Текст] / Е.В. Агеева, Н.М. Хорьякова, Е.В. Агеев // Вестник сумского национального аграрного университета. - 2013. - № 10. - С. 213-215.
5. Хорьякова, Н.М. Морфология и элементный состав медного порошка, полученного методом электроэрозионного диспергирования [Текст] / Хорьякова Н.М., Малюхов В.С. // Современный материалы, техника и технология: материалы 3-й Междунар. науч.-практич. конф. в 3-х томах. - Курск: ЮЗГУ, 2013. - Т. 1. С. 388-390.
6. Агеева Е.В. Твердые сплавы, полученные из электроэрозионных порошков [Текст]: монография / Е.В. Агеева, О.В. Кругляков, Н.М. Хорьякова, Е.В. Агеев. - Курск: ЗАО «Университетская книга», 2015. - 164 с.
7. Латыпов, Р.А. Сравнительный рентгеноспектральный микроанализ медного порошка, полученного электроэрозионным диспергированием, и медного порошка ПМС-1 / Р.А. Латыпов, Е.В. Агеев, Е.В. Агеева, Н.М. Хорьякова // ЭлектроМеталлургия. – 2017. - № 4. - С.36-40.
8. Пат. 2449859, Российская Федерация, С2, В22F9/14. Установка для получения нанодисперсных порошков из токопроводящих материалов [Текст] / Агеев Е.В.; процесса заявитель и патентообладатель Юго-Западный государственный университет. – № 2010104316/02; Заявлено 08.02.2010; Опубл. 10.05.2012. – 4 с.: ил.

Алматаев Нозимбек Тожибой угли  
Андижанский машиностроительный институт,  
Андижан, Узбекистан, [nozim\\_almataev@mail.ru](mailto:nozim_almataev@mail.ru)

## ИЗУЧЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МЕСТНЫХ ПОЛИПРОПИЛЕНОВЫХ ПОЛИМЕРОВ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЕ

### **Аннотация:**

В статье описаны преимущества метода впрыска под давлением, процесс литья и его этапы, приведены изменения нагрузки (силы сжатия) в зависимости от температуры и времени нагрева формы при изготовлении деталей.

*Ключевые слова:* Нагрузка, форма, деталь, продукт, пластик, температура, материал.

Almataev Nozimbek  
Andijan Machine-Building Institute, Andijan, Uzbekistan, [nozim\\_almataev@mail.ru](mailto:nozim_almataev@mail.ru)

## STUDYING THE TECHNOLOGICAL PROPERTIES OF LOCAL POLYPROPYLENE POLYMERS FOR MACHINE-BUILDING PURPOSE

### **Annotation:**

The article describes the advantages of the injection method under pressure, the casting process and its stages, shows the changes in the load (compression force) depending on the temperature and heating time of the mold during the manufacture of parts.

*Keywords:* Pressure, shape, detail, product, plastic, temperature, material.

### **Introduction**

Pressure casting is the most common method of obtaining automotive parts, which is a technological process of manufacturing a product in which liquid plastic is poured into a metal mold under pressure, evenly distributed on it, and hardened. The process of injection molding requires complex equipment and serious technical preparation. With the help of this technology it is possible to obtain any plastic products without additional processing. The method of casting parts under pressure has a high productivity, which has the following advantages [1]

1. High accuracy of the finished product. The injection (delivery) of liquid plastic under pressure allows it to be evenly distributed across its shape, filling even the smallest holes.

2. Possibility to get parts of any complexity, with very thin walls, including. A metal mold is made for the production of the products, the design takes into account all the small details of the future product. The result is a simple and very complex product, with many holes and folds.

3. The need for mechanical processing of the product is minimal. Most of the time, the finished product does not require any processing. The cost of producing even complex products is very small.

4. Unlimited finished products. The metal mold created before production has a very long service life, with which you can prepare any amount of product.

5. Cheap price - on the condition of producing a large batch. The more items are made, the cheaper the price of one copy. Because the main budget is spent on the preparatory phase, which is carried out only once.

The process of manufacturing plastic products by the injection molding method involves several steps. They can be divided into two groups:

- preparatory work.
- direct injection.

Preparations can take weeks to months. However, this is an important step that should not be rushed. The quality of future products depends on it.

At present, there is an opportunity to create a 3D model of the product, prepare a prototype and design the mold in the innovative research laboratory "Engineering and Design" at the Department of "Automotive" Andijan Institute of Mechanical Engineering.

### **Method**

Direct injection.

1. Pour the plastic into the mold under pressure. The liquefied plastic is poured into the mold under high pressure.
2. Distribute the plastic evenly on the mold. Due to the pressure, the plastic is evenly distributed throughout the shape, filling even small holes.
3. Cooling of the mold and hardening of the plastic part. The cooling time depends on several parameters: the type of plastic, the temperature of the mold, and so on. For small things, usually a few seconds is enough.
4. Finished product. Once the mold has cooled, it is opened to give the finished product [1-2].

A casting (thermoplastic gun) store will be required for the direct casting process. The injection chamber under pressure is shown in Figure 1. The pressurized injection machine consists of a stock (1), a piston (2), a cylinder (3), a nozzle (4) and a press mold (5). The plastic composition is transferred to the material cylinder (3) of the casting machine and heated in it for 30-40 minutes at a temperature of 240-2700 C. The part (4) heated to a temperature of 2400 C is initially mounted on a shaping plate (5) heated to 80-1000C.

When the piston (7) of the casting machine moves from right to left, the squeezed tip of the molten plastic composite (6) is removed from the cylinder and it fills the gap between the forming surface and the surface of the eroded part. Therefore, the temperature of the liquid composition should be 200 C higher than its melting temperature, the specific pressure of the casting should be 30-35 MPa, and the time under pressure should be 20 hours. Then the pressure is reduced and the press mold is separated. The restored part is removed from it, the seams are cleaned, the excess pieces of material are removed, the part is thermally treated in oil at a temperature of 1200-1300 C for 1.5-2 hours. The part is then cooled to 1100S along with the oil and cooled to room temperature in the open. When plastics are cast under pressure, their dimensions should be checked after 24 hours [3-4].

In the manufacture of automotive parts under pressure from plastic materials, the retention time of the compressive strength and the heating temperature of the mold are of great importance. We consider this on the example of high and low pressure polyethylene and polypropylene, local plastic raw materials produced in Uzbekistan at the Shurtan, Mubarek and Ustyurt gas complexes

Table 1 shows the dependence of the holding time of the load on the injection molding of polyethylene and polypropylene. Analysis of the graph shows that the

compressive strength also increases as the holding time increases. But after its amount exceeds 15-20 seconds, the value of the download decreases.

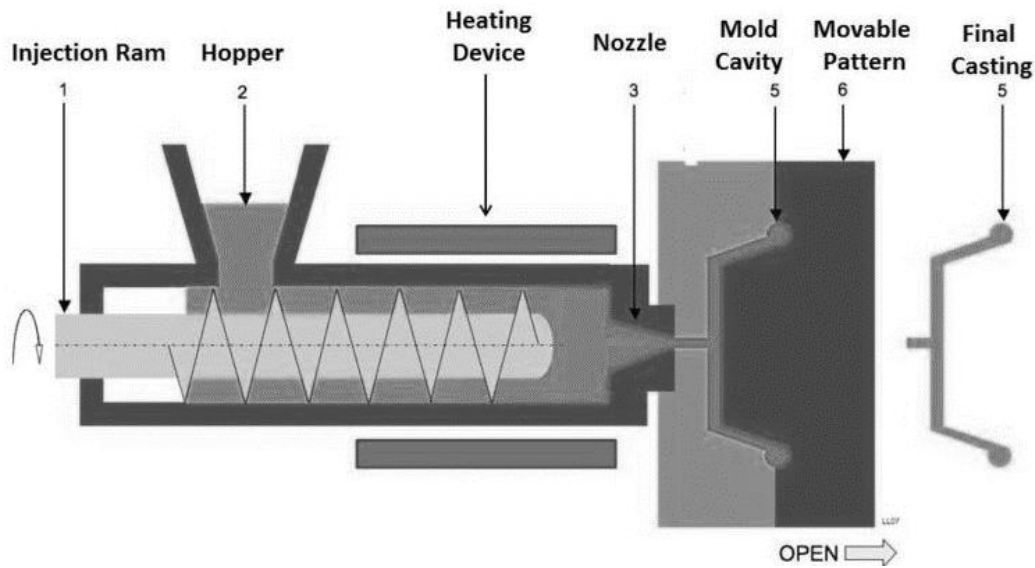


Figure 1 – Schematic of the injection molding equipment.

The highest load value was observed in polypropylene, while the lowest value was observed in low pressure polyethylene. It depends on the physical and mechanical properties of plastics and their structural structure. The conclusion is that the injection of high-pressure polyethylene into the mold under pressure among plastics is smoother and faster than others, for which there is no need for large compressive strength.

Table 1 – Dependence of casting pressure on holding time

№	Polymer material	Casting pressure value (kgf/cm <sup>2</sup> ) vs holding time (sec)					
		0	50	100	150	200	250
1	Polypropylene	155	176	202	218	185	190
2	Polyethylene LP	135	150	158	162	144	150
3	Polyethylene HP	94	104	110	108	40	48

Table 2 shows a graph of the specific load of plastic materials in pressure casting depending on the heating temperature of the mold.

Table 2 – Dependence of the specific load on the mold heating temperature

№	Polymer material	The value of the specific load (kg / cm <sup>2</sup> ) from the heating temperature of the mold (°C)					
		0	20	40	60	80	100
1	Polypropylene	110	130	150	160	146	124
2	Polyethylene LP	70	76	84	98	80	60
3	Polyethylene HP	50	48	46	44	42	34

As can be seen from the figure, the specific load increases with increasing mold heating temperature. However, the value of the specific load decreases after the mold temperature exceeds 60-70 degrees. This is due to various changes in the physical and mechanical properties of plastic materials with respect to temperature. That is, as the mold

temperature increases, the plastic material is poured well into the mold in liquid form, resulting in the mold cavity being well filled and the casting quality being good. No more load is required to cast such liquefied plastics into the mold, resulting in a decrease in the specific load.

The decrease in the temperature of the mold, on the other hand, causes the plastic to thicken as it is poured into it, resulting in the mold cavity not filling well and the casting quality not being good.

### **Conclusion**

The following conclusions can be drawn on the basis of scientific research, analysis and study of research results.

1. When pouring plastics into the mold, the highest value of the load is observed in polypropylene, and the lowest value is observed in low-pressure polyethylene. depends on their physical and mechanical properties and their structural structure. Among the plastics seen, the injection of high-pressure polyethylene into the mold under pressure is smoother and faster than others.

2. As the heating temperature of the mold increases, the specific load increases, and it decreases after 60-70 degrees due to various changes in the physical and mechanical properties of plastic materials with respect to temperature. At the same time, as the temperature of the mold increases, the plastic material is well poured into the mold in liquid form, no large load is required, resulting in a decrease in the specific load.

3. Among the plastics seen in the experiment, the best result in this regard was recorded in high-pressure polyethylene.

### **REFERENCES**

1. <https://klona.ua/blog/liteynoe-proizvodstvo/tehnologiya-litya-plastika-pod-davleniem-prosto-o-slojnom>

2. A.M. Robert. Konstruirovaniye plastmassovykh izdeliy dlya litya pod davleniem. St. Petersburg-2006, 504 st.

3. Sh.A. To'raev, N.T. Almataev. Determination of the physical condition of the car in the manufacture of plastic parts under pressure. Proceedings of the Ministry-wide scientific-practical conference on "Problems of innovative development: cooperation in science, education and industry." AndMI, November 24, 2016, pp. 44-46.

4. Т.О. Алматаев, Н.Т. Алматаев, К.А. Шарипов., Исследование технологических свойств местных полимерных материалов машиностроительного назначения [The scintillation method of electromagnetic radiation control in the air-inflated structure and protection system switching]. Universum: Technical science., № 11 (80)., Moscow, 2020

## СОДЕРЖАНИЕ

Д.П. Гасюк, д.т.н., профессор ОСОБЕННОСТИ И НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ СИСТЕМЫ ПОДГОТОВКИ СПЕЦИАЛИСТОВ В ОБЛАСТИ МАШИНОСТРОЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ИМПОРТОЗАМЕЩЕНИЯ И ЦИФРОВИЗАЦИИ ЭКОНОМИКИ РОССИИ	4
ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ	13
Т.А. Ларионова, Е.О. Ларионов ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ РЕЗАНИЯ И ГЕОМЕТРИИ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА НА ПАРАМЕТРЫ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ТОЧЕНИИ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ	13
П.В. Бурдин, С.В. Михайлов ОПТИМИЗАЦИЯ ТОКАРНОЙ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ ПО КРИТЕРИЮ НАИМЕНЬШЕЙ СЕБЕСТОИМОСТИ С УЧЕТОМ СТРУЖКОДРОБЛЕНИЯ	19
А.В. Петров, С.Н. Степанов, С.С. Степанов РАЗРАБОТКА МОДУЛЯ ДЛЯ РАСПОЗНАВАНИЯ ПОЛОЖЕНИЯ СТРЕЛКИ ИНДИКАТОРОВ ЧАСОВОГО ТИПА	25
А.А. Мартюшова, А.Н. Клементьев ВЫЯВЛЕНИЕ УСЛОВИЙ ВЫПОЛНЕНИЯ СОЕДИНЕНИЯ «КОРПУС – НИПШЕЛЬ» АЛМАЗНОГО ДОЛОТА ПРИ АВТОМАТИЧЕСКОЙ СБОРКЕ	29
Р.В. Абрамов, Е.А. Польский, К.А. Матросова ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ СБОРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ЭЛЕМЕНТОВ ФОРМООБРАЗУЮЩЕЙ ОСНАСТКИ	33
Д.Е. Васильева, Е.А. Польский, Е.А. Абрамов ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ КОМБИНИРОВАННЫХ РЕЗЬБОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ ВЫСОКОНАГРУЖЕННОГО СТЫКОВОГО УЗЛА НА ЭТАПАХ КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА	37
И.Д. Воронина, П.В. Скачков, С.В. Сорокин АВТОМАТИЗАЦИЯ ЭТАПОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА НА ОСНОВЕ ФОРМИРОВАНИЯ КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО КОДА ДЕТАЛИ	40
А.А. Грибанов, Н.Ю. Ковеленов ПОВЫШЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ФИНИШНЫХ ОПЕРАЦИЙ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ГРАФИТОВЫХ УПЛОТНЕНИЙ	44
И.Н. Хрусталева, Д.П. Гасюк, Л.Г. Черных, В.В. Михайлов ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ РЕЗАНИЯ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ ПЕРЕХОДОВ ПОТОЧНОЙ ЛИНИИ НА ОСНОВЕ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ	50
И.Н. Хрусталева, Д.П. Гасюк, Л.Г. Черных, А.А. Лаптев ВЫБОР РАЦИОНАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ ЛИНИИ СБОРКИ НА ОСНОВЕ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ	55



Я.Ю. Бровкина, Д.Н. Шабалин МОДЕЛЬ ПЛОТНОСТИ ЗЕРЕН АЛМАЗОСОДЕРЖАЩЕГО ПРОСТРАНСТВА КРУГА НА ГЛУБИНЕ ПРОФИЛЯ	61
Намбудри Танудж, С.Н. Степанов ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИИ БАМПЕРА АВТОМОБИЛЯ НА ОСНОВЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ	65
М.А. Пудовкин, С.А. Любомудров SMART-ИНСТРУМЕНТ В «ИНДУСТРИИ 4.0»	69
Е.А. Кунарев, Т.А. Макарова ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТИ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ «ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ РЕЗАНИЯ НА ШЕРОХОВАТОСТЬ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ЛЕЗВИЙНОЙ ОБРАБОТКЕ СТЕЛЛИТОВОГО СПЛАВА»	76
Е.А. Кунарев, Т.А. Макарова ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОБРАБОТКИ СТЕЛЛИТОВОГО СПЛАВА ЗА СЧЕТ ПРИМЕНЕНИЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА В ПРОГРАММЕ "DEFORM-3D"	81
А.А. Стрельникова, М.М. Радкевич ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ БИОЛОГИЧЕСКИХ СМАЗОЧНЫХ СРЕД НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ПАРЫ ТРЕНИЯ «ТИТАНОВЫЙ СПЛАВ ЗМ – СТАЛЬ»	85
Д.С. Фомин, А.И. Попов, А.С. Фумин, С.В. Беляков, М.М. Радкевич АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ОБРАБОТКИ ТУРБИНЫХ ЛОПАТОК СТРУЙНЫМ ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННЫМ МЕТОДОМ	89
Е.А. Хлопков, С.В. Виноградов, Д.П. Гасюк РАБОТА КОЛЬЦЕВЫХ СИЛОВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗ НИКЕЛИДА ТИТАНА В ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ ПРОЦЕССЕ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ИЗДЕЛИЙ ИЗ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ	94
Х. Арслан, М.Т. Коротких ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИЕ ЗАЖИМНЫЕ УСТРОЙСТВА ДЛЯ СТАНОЧНЫХ ПРИСПОСОБЛЕНИЙ	99
З.С. Савинов, Т.А. Макарова ПРОБЛЕМЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ТОРЦОВЫХ ФАСОК НА ЗУБОЗАКРУГЛЯЮЩИХ СТАНКАХ	104
В.В. Батуев, А.С. Онищенко РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА АВТОМАТИЧЕСКОГО ВЫБОРА ФРЕЗ ДЛЯ САМ СИСТЕМ	109
Е.Н. Ратьков, В.В. Ваганов УСТРОЙСТВО ЗАМЕНЫ ПЕЧАТНЫХ ФОРМ РЕВОЛЬВЕРНОГО ТИПА ДЛЯ ФЛЕКСОГРАФСКОЙ ПЕЧАТИ	115
Л.В. Шипулин, Я.А. Яшкузина, А.А. Фролов АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ ПОДГОТОВКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС В САПР «ADEM»	118
Л.В. Шипулин, А.А. Фролов РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО МОДУЛЯ ИМИТАЦИИ РЕЗАНИЯ ЕДИНИЧНЫМ ЗЕРНОМ	124

Т.Р. Абляз, Е.С. Шлыков, В.В. Ширяев, К.Р. Муратов, В.В. Осинников ПРОТОТИП РОБОТИЗИРОВАННОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ РОССИЙСКИХ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ	128
А.Н. Стариков ЦИЛИНДРИЧЕСКИЕ ЗУБЧАТЫЕ ПЕРЕДАЧИ	133
Д.А. Быченко, И.И. Козарь, С.А. Любомудров СОВРЕМЕННЫЕ СПОСОБЫ БОРЬБЫ С ВИБРАЦИЯМИ ПРИ РЕЗАНИИ МЕТАЛЛОВ ПРИ ПОМОЩИ СПЕЦИАЛЬНОГО ВСПОМОГАТЕЛЬНОГО ИНСТРУМЕНТА	139
А.А. Котик, А.Е. Овчинников, Е.В. Овчинников СВЕРХТВЕРДЫЕ АДДИТИВНЫЕ ПОКРЫТИЯ ДЛЯ МЕТАЛЛООБРАБАТЫВАЮЩЕГО ИНСТРУМЕНТА	144
К.С. Агашков, С.В. Маковой МОДЕРНИЗАЦИЯ ВЫШКИ 40В6М(40В6МД) ДЛЯ БЕЗОПАСНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ И РЕМОНТА ПРИ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ	149
Д.Д. Брусова, О.А. Лапшина, Д.Н. Шабалин, И.И. Козарь УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ ДЕТАЛИ «ФЛАНЕЦ» НА ОСНОВАНИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ДЕФЕКТОВКИ	154
О.А. Лапшина, Д.Д. Брусова, И.И. Козарь, Д.Н. Шабалин МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПРИСПОСОБЛЕНИЯ ДЛЯ ФРЕЗЕРОВАНИЯ	158
Н.В. Пастарнак, И.И. Козарь, Д.Н. Шабалин ПРОЕКТИРОВАНИЕ УСТАНОВОЧНО-ЗАЖИМНОГО ПРИСПОСОБЛЕНИЯ ДЛЯ ФРЕЗЕРНОЙ ОПЕРАЦИИ	164
Н.А. Беликова, И.И. Козарь, Д.Н. Шабалин РАСЧЕТ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ ОТДЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ УСТАНОВОЧНО-ЗАЖИМНОГО ПРИСПОСОБЛЕНИЯ ДЛЯ ФРЕЗЕРНОЙ ОПЕРАЦИИ	170
В.М. Кондратьева, М.Д. Головань, К.О. Лобастов, Д.Д. Зинин, С.С. Степанов ИССЛЕДОВАНИЕ ПОГРЕШНОСТИ ПОВЕРКИ КОНЦЕВЫХ МЕР ДЛИНЫ НА УСТАНОВКЕ УКМ 100	176
Д.И. Ашрапов, А.А.Евдокимова, В.А. Подлобошников, С.Н. Степанов, А.А. Москалец ИССЛЕДОВАНИЯ ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРОННЫМ УРОВНЕМ М-05-03	181
Е.Н. Евсеева., Д.А. Нифонтов, А.С. Быстрова, Л.Г. Черных, И.Н. Хрусталева ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ АЛЮМИНИЯ НА АДГЕЗИЮ ПРИ ГАЗОПЛАМЕННОМ НАПЫЛЕНИИ ОБРАЗЦОВ ИЗ КОНСТРУКЦИОННОЙ СТАЛИ С РАЗЛИЧНОЙ ШЕРОХОВАТОСТЬЮ	186
О.Д. Григорьев, К.В. Плюсина, Р.О. Кириченко, Л.Г. Черных, В.И. Слатин МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ НА ВАЛАХ, С ПОМОЩЬЮ УСТРОЙСТВА ДЛЯ ПРИВОДА ПРОФИЛОМЕТРА	191
И.С. Михайлова, И.И. Козарь, Д.Н. Шабалин РАЗРАБОТКА УСТАНОВОЧНО-ЗАЖИМНОГО ПРИСПОСОБЛЕНИЯ ДЛЯ РАДИАЛЬНО-СВЕРЛИЛЬНОЙ ОПЕРАЦИИ	196

А.А. Лухмаев, И.И. Козарь, Д.Н. Шабалин РАЗРАБОТКА ОТДЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ СТАНОЧНОЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОСНАСТКИ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ ГОРИЗОНТАЛЬНО-ФРЕЗЕРНОЙ ОПЕРАЦИИ	202
Ши Шуанюань, С.В. Михайлов МЕТОДИКА РАСЧЕТА РАЦИОНАЛЬНОЙ ПЕРИОДИЧНОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ РЕЖИМОВ РЕЗАНИЯ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ПРИНУДИТЕЛЬНЫМ СТРУЖКОДРОБЛЕНИЕМ НА СТАНКАХ С ЧПУ	209
КОМПЬЮТЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ	214
Н.Д. Васильев, Д.О. Васильев ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ВИРТУАЛЬНОГО ПРОТОТИПИРОВАНИЯ ПРИ СОЗДАНИИ ТРОФИ ТРАКА	214
Т.А. Рад, В.М. Голод, М.В. Иксанов ПРИМЕНЕНИЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ОТЛИВОК ИЗ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ ДЛЯ ИЗДЕЛИЙ МАШИНОСТРОЕНИЯ	220
И.А. Васильев ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ ДЛЯ ДЕТАЛЕЙ ИЗ МАЛОУГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ	225
И.А. Белянов, А.А. Осипов ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ РОСТА ПОКРЫТИЙ ОКСИД ИНДИЯ-ОЛОВА НА УСТАНОВКЕ РЕАКТИВНОГО МАГНЕТРОННОГО РАСПЫЛЕНИЯ	231
А.М. Шевелев, А.А. Ульянов, А.М. Борышнев, В.И. Новиков МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛООВОГО ПОЛЯ В ЭЛЕМЕНТАХ ГИДРОСЪЕМНИКА ДЛЯ СТРУЙНОЙ ЦЕМЕНТАЦИИ ГРУНТОВ	236
А.Ю. Васянин, А.Н. Шубин, К.В. Елисеев ИССЛЕДОВАНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА НЕРАВНОМЕРНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАГРУЗКИ В ЗАЦЕПЛЕНИЯХ ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ	240
И.В. Васильев, Д.О. Васильев АДАПТИВНЫЙ РАЗВАЛ ПЕРЕДНЕЙ ПОДВЕСКИ АВТОМОБИЛЯ	245
Э.А. Никольская, К.В. Елисеев МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ КОЛЕСА ПРИ ДВИЖЕНИИ ПО РЕЛЬСУ С ДЕФЕКТАМИ ПОВЕРХНОСТИ	249
Д.И. Мышенский, К.В. Елисеев МЕТОД ПОДМОДЕЛИРОВАНИЯ В ANSYS WORKBENCH	253
Ю.В. Богданов, А.М. Бойко, Р.А. Гиргидов ПРИМЕНЕНИЕ ДИСПЕРСИОННОГО АНАЛИЗА К ОЦЕНКЕ СТРУКТУРЫ РОЯ, ОБРАЗОВАННОГО БЕСПИЛОТНЫМИ ЛЕТАТЕЛЬНЫМИ АППАРАТАМИ	258
Д.А. Распутин, Р.А. Гиргидов ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ РАСПОЗНАВАНИЯ АНАЛОГОВОГО АУДИОСИГНАЛА	264

Е.В. Фоминов, А.А. Марченко, А.О. Мурцева МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ НА ПЕРЕДНЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ТОКАРНОГО РЕЗЦА С УЧЁТОМ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЛУНКИ ИЗНОСА	267
А.М. Кудрявцева, А.Н. Лабузов МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ПЕРВОЙ СТЕНКИ РЕАКТОРА ИТЭР В ПРОЦЕССЕ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКИ	271
Шэнь Юньфэн, М.Б. Москаленко ПЕРСПЕКТИВЫ СОЗДАНИЯ СЕМЕЙСТВА КОЛЕСНЫХ ШАССИ ЭКСТРЕМАЛЬНОЙ ПРОХОДИМОСТИ	275
Р.Г. Канцев, К.Д. Андреев, А.А. Москалец, М.А. Скотникова СРАВНЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВНУТРЕННЕГО КОНВЕКТИВНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ СОПЛОВЫХЛОПАТОК ГАЗОВОЙ ТУРБИНЫ	281
А.А. Котенко, С.И. Худорожков ОДНОМЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОСНОВНЫХ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОМОБИЛЯ	287
А.С. Ровбо, Л.Ю. Добош СТАТИСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕНДРИТНОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ В ЛИТОМ СПЛАВЕ АК12 С ЦЕЛЬЮ УЛУЧШЕНИЯ КАЧЕСТВА ОТЛИВОК	292
КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ ТРИБОТЕХНИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ	297
А.С. Парфенов, А.В. Волков, Е.В. Березина, В.А. Годлевский ПРИМЕНЕНИЕ НАНОРАЗМЕРНЫХ ПРИСАДОК В УСЛОВИЯХ АБРАЗИВНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ	297
Дин Юнкан, Г.В. Иванова, Е.А. Тарасенко ПРОЕКТИРОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ АГРЕГАТА ДВУХПОРШНЕВОГО НАСОСА ДВУХСТОРОННЕГО ДЕЙСТВИЯ	302
Ли Цзе, Г.В. Иванова, Е.А. Тарасенко ВЫБОР МАТЕРИАЛА И ПАРАМЕТРОВ ДЕТАЛЕЙ ФРИКЦИОННОЙ МУФТЫ	308
А.А. Ищенко, О. Чипензи, А.Ю. Степанов, Г.В. Иванова ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ 3D ПЕЧАТИ ДЛЯ СОЗДАНИЯ КОНСТРУКТОРСКОГО МАКЕТА БУТЫЛОЧНОГО ДОМКРАТА	313
Тан Цзяяо, Г.В. Иванова, Е.А. Тарасенко ИССЛЕДОВАНИЕ СИНХРОНИЗАТОРА КОРОБКИ ПЕРЕДАЧ	318
Е.В. Васильева, Г. Шеслер, М. Банда, Г.В. Иванова АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ ПЕЧАТИ МЕХАНИЗМОВ С РЕЗЬБОВЫМИ СОЕДИНЕНИЯМИ	322
Чэнь Шуньчао, Г.В. Иванова, Е.А. Тарасенко АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ КЛАПАНА ПОДАЧИ ЖИДКОСТИ	326
П.В. Болокан, К.И. Золотарев, И.А. Дьяченко, Г.В. Иванова, А.А. Москалец ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ 3D ПЕЧАТИ ДЛЯ СОЗДАНИЯ МОДЕЛЕЙ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ МЕХАНИЗМОВ НА ПРИМЕРЕ РУЧНОГО ПРЕССА	332

А.Ю. Рябикин, М.А. Скотникова, Г.В. Иванова, Е.К. Иванов СРАВНИТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ ИЗНОСОСТОЙКИХ СТАЛЕЙ	336
М.П. Шишкарев, М.Д. Гавриленко, М.А. Мотько СИНТЕЗ АДАПТИВНОЙ ФРИКЦИОННОЙ МУФТЫ С ПОЛОЖИТЕЛЬНО-ОТРИЦАТЕЛЬНОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ	342
Е.О. Куома, Э.Г. Мохсени, А.М. Тупиков, М.А. Скотникова ЭКСПЕРТИЗА РАБОТОСПОСОБНОСТИ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ МЕХАНИЗМОВ ПЕРФОРАТОРА МАКІТА	347
Д.В. Зимин, А.Д. Бреки ПРОБЛЕМЫ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПЛАСТИЧНЫХ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ ТРИБОТЕХНИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ИХ БИОПОВРЕЖДЕНИЙ	352
Эмад Мохсени, Г.В. Цветкова ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА МИКРОТВЕРДОСТИ ПОСЛЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ТИТАНОВОГО СПЛАВА	356
М. Аль-Наджар, Я. Нагхави, Г.В. Цветкова, Г.В. Иванова ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ НАПЛАВОК ДЛЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН	360
Пань Чэнхао, Ли Чжицзин, М.А. Скотникова ИСПЫТАНИЕ ПЛАСТИЧНЫХ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ	365
Ли Чжицзин, М.А. Скотникова ИССЛЕДОВАНИЕ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПАР ТРЕНИЯ «СТАЛЬ - БРОНЗА» В МОДИФИЦИРОВАННОЙ СМАЗОЧНОЙ СРЕДЕ	370
С.Ю. Мишаков, П.Н. Хопин ЭКСПРЕСС-ОЦЕНКА ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПРИ ГРАНИЧНОМ ТРЕНИИ С ПРИСАДКАМИ ГРАФИТА И ГРАФЕНА	375
<b>МАШИНЫ И ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ</b>	<b>381</b>
И.В. Калатошишвили, К.С. Арсентьева, В.В. Блажевич, В.С. Мамутов КОМПЬЮТЕРНЫЙ РАСЧЕТ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ДАВЛЕНИЯ НА ДЕФОРМИРУЕМОЙ ЗАГОТОВКЕ ПРИ ЭЛЕКТРОГИДРОИМПУЛЬСНОЙ ФОРМОВКЕ	381
Е.Л. Левашова, М.М. Радкевич, М.В. Яковицкая ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА СЛОЖНОПРОФИЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ЛИСТОВОГО МЕТАЛЛА МЕТОДОМ СВОБОДНОЙ ГИБКИ	385
М.М. Радкевич, Н.В. Дмитриев ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПОКОВОК ГОРЯЧЕЙ ОБЪЕМНОЙ ШТАМПОВКОЙ	391
К.В. Лепетан, П.А. Кузнецов, А.О. Просторова ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛАСТОСТАТИЧЕСКОГО ПРЕССОВАНИЯ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ПРОФИЛИРОВАННЫХ ТРУБЧАТЫХ ЗАГОТОВОК ИЗ ПОРОШКОВ	396
А.А. Курятников, К.С. Арсентьева, В.С. Мамутов ЭФФЕКТИВНОСТЬ УСТАНОВКИ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ МАГНИТНО-ЭЛАСТОИМПУЛЬСНОЙ ШТАМПОВКИ	402

Д.Р. Кравцов, П.А. Кузнецов, С.Н. Кункин РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ГОРЯЧЕГО ВЫДАВЛИВАНИЯ ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ ЗАГОТОВОК ПРИ ЛОКАЛЬНОМ НАГРЕВЕ НА ОСНОВЕ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ	406
Н.М. Потапов, Д.И. Дюбескин, Л.Б. Аксенов ДИНАМИЧЕСКАЯ ПОТЕРЯ УСТОЙЧИВОСТИ ТОНКОСТЕННЫХ ТРУБНЫХ ЗАГОТОВОК ПРИ ТОРЦЕВОЙ РАСКАТКЕ	410
К.С. Арсентьева, А.Е. Сидоров, Е.В. Сидорова ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ГЮЛЬДЕНА-ПАППУША ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЗАГОТОВОК ДЛЯ ДЕТАЛЕЙ КОРОБЧАТОЙ ФОРМЫ	415
И.И. Газизов, Л.Б. Аксенов ТОПОЛОГИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ГЕОМЕТРИИ ПОКОВКИ РЫЧАГА РОБОТА	419
К.С. Арсентьева СПОСОБЫ ЗАДАНИЯ ЗАВИСИМОСТИ ДАВЛЕНИЯ ОТ ВРЕМЕНИ ПРИ РАСЧЕТАХ ИМПУЛЬСНЫХ МЕТОДОВ ЛИСТОВОЙ ШТАМПОВКИ	425
И.А. Шишов, В.В. Мишин АНАЛИЗ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В БЕРИЛЛИЕВЫХ ПОЛУСФЕРАХ ПОСЛЕ ГЛУБОКОЙ ВЫТЯЖКИ С УЧЕТОМ КРИСТАЛЛОГРАФИЧЕСКОЙ ТЕКСТУРЫ ЗАГОТОВКИ	429
УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ В МАШИНОСТРОЕНИИ	434
А.А. Кузьменко, Д.П. Гасюк МЕТОДИКА ОБОСНОВАНИЯ РАЦИОНАЛЬНОЙ ТРУДОЕМКОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА НА СБОРОЧНОМ УЧАСТКЕ	434
Д.П. Гасюк, Е.Г. Деева ВЫБОР СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЯ ДЛЯ ЛИНЕЙНЫХ РАЗМЕРОВ	440
Д.П. Гасюк, Ю.А. Валуйских СОЗДАНИЕ И ВНЕДРЕНИЕ СИСТЕМЫ МЕНЕДЖМЕНТА КАЧЕСТВА НА ПРЕДПРИЯТИИ МАШИНОСТРОЕНИЯ НА ОСНОВЕ РИСК-ОРИЕНТИРОВАННОГО МЫШЛЕНИЯ	444
Д.П. Гасюк, К.С. Гречина ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССА ПРЕССОВАНИЯ, ОКАЗЫВАЮЩИЕ СУЩЕСТВЕННОЕ ВЛИЯНИЕ НА СОСТАВ И СОДЕРЖАНИЕ ТРЕБОВАНИЙ К ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОСНАСТКЕ ДЛЯ ПРЕССОВАНИЯ СПЕЦСОСТАВА В ДУГОВОЙ КАНАЛ КОЛЬЦА ВЗРЫВАТЕЛЯ	450
А.М. Федотова, Д.П. Гасюк ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА ОБНАРУЖЕНИЯ И ОЦЕНКИ РИСКОВ В ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОМ МАШИНОСТРОЕНИИ	455
Н.В. Сырейщикова, В.И. Гузеев ОСВОЕНИЕ СИСТЕМЫ «TOTAL PRODUCTIVE MAINTENANCE» ДЛЯ ПЛАНИРОВАНИЯ РЕМОНТОВ И ОБСЛУЖИВАНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРЕДПРИЯТИЯ	462

М.А. Щирова, Д.П. Гасюк, М.Х. Седлер ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ВНУТРЕННЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ТРУБОПРОВОДОВ С КРИВОЛИНЕЙНОЙ ОСЬЮ ПУТЁМ РАЗРАБОТКИ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ПОДГОТОВКИ ПОВЕРХНОСТИ И НАНЕСЕНИЯ АНТИКОРРОЗИОННОГО ПОКРЫТИЯ	471
А.С. Козлов, Д.П. Гасюк АНАЛИЗ СЛОЖНОСТИ АВТОМАТИЗАЦИИ СБОРА И ОБРАБОТКИ ДАННЫХ, ПОЛУЧЕННЫХ В ХОДЕ МОНИТОРИНГА ПЕРСОНАЛА В РАМКАХ СИСТЕМЫ МЕНЕДЖМЕНТА КАЧЕСТВА	476
Д.П. Гасюк, В.О. Маркевич ПРОВЕДЕНИЕ ФОТОГРАФИИ РАБОЧЕГО ВРЕМЕНИ ДЛЯ АНАЛИЗА ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА	482
С.В. Федосова, Д.П. Гасюк ОСОБЕННОСТИ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ, ПЕРЕДАННЫМИ НА АУТСОРСИНГ	490
К.А. Тихомиров, В.В. Ваганов ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ПЕЧАТИ НА ЦИФРОВЫХ ПЕЧАТНЫХ МАШИНАХ С ПОМОЩЬЮ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ ПОДГОТОВКИ ЗАПЕЧАТЫВАЕМОГО МАТЕРИАЛА	494
ПЕРСПЕКТИВНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ	497
М.А. Шилов МОДЕЛИРОВАНИЕ ОРИЕНТАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В СМАЗОЧНОМ СЛОЕ ПРИ СДВИГЕ ПОД ДАВЛЕНИЕМ	497
П.В. Королёв, М.А. Шилов ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОРИЕНТАЦИИ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛАСТОМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ	503
Д.А. Сафронов, В.В. Мишин ОЦЕНКА УРОВНЯ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ИСПЫТАНИЯХ НА ТЕРМИЧЕСКУЮ УСТАЛОСТЬ В ОБРАЗЦАХ КОРСЕТНОЙ ФОРМЫ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ МЕТОДОМ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ИЗ ТИТАНОВОЙ МЕТАЛЛОПОРОШКОВОЙ КОМПОЗИЦИИ МАРКИ ВТ6	508
С.Н. Кутепов, Д.С. Клементьев ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА СТОЙКОСТЬ АРМАТУРНЫХ СТАЛЕЙ К ВОДОРОДНОМУ РАСТРЕСКИВАНИЮ	513
С.С. Кустов, С.С. Михалев, Ю.Б. Егорова, А.В. Челпанов, Л.В. Давыденко РАЗРАБОТКА ЦИФРОВОЙ КЛАССИФИКАЦИИ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ЭКВИВАЛЕНТОВ ПО АЛЮМИНИЮ И МОЛИБДЕНУ	518
Д.Р. Беличко, А.В. Малецкий ВЛИЯНИЕ ОКСИДОВ КРЕМНИЯ И АЛЮМИНИЯ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА КЕРАМИКИ НА ОСНОВЕ НАНОПОРОШКОВ ДИОКСИДА ЦИРКОНИЯ	523

Д.В. Масайло, А.В. Орлов, А.А. Попович «IN-SITU» СИНТЕЗ МНОГОКОМПОНЕНТНОГО СПЛАВА НА ОСНОВЕ НИКЕЛЯ ИЗ ЭЛЕМЕНТНЫХ ПОРОШКОВ МЕТОДОМ ПРЯМОГО ЛАЗЕРНОГО ВЫРАЩИВАНИЯ	529
Л.С. Аболмасова, Е.В. Агеев МАТЕРИАЛЬНЫЙ БАЛАНС ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОГО ДИСПЕРГИРОВАНИЯ ОТХОДОВ ТВЕРДЫХ СПЛАВОВ ЛАТУНИ МАРКИ ЛС58-3 В ВОДЕ ДИСТИЛЛИРОВАННОЙ	538
Д.П. Ерутин, Е.В. Борисов, А.А. Попович, В.Ш. Суфияров ИССЛЕДОВАНИЕ АМОРФНОГО И НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО ПОРОШКОВ НА ОСНОВЕ ЖЕЛЕЗА	543
М.С. Королев, Е.В. Агеев ФАЗОВЫЙ СОСТАВ ТВЕРДОСПЛАВНЫХ ПОРОШКОВ, ПОЛУЧЕННЫХ ЭЛЕКТРОДИСПЕРГИРОВАНИЕМ СПЛАВА Т5К10 В КЕРОСИНЕ	548
Е.А. Бобков, Е.В. Агеева РЕНТГЕНСПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ НИКЕЛЬХРОМОВОГО СПЛАВА Х20Н80, СПЕЧЕННОГО ИЗ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННЫХ ПОРОШКОВ, ПОЛУЧЕННЫХ В ВОДЕ	552
Е.В. Волокитина, Н.Г. Разумов, А.А. Попович, Д.В. Масайло, М.А. Ковалев, В.К. Шевчук РЕМОНТ И ВОССТАНОВЛЕНИЕ ИЗДЕЛИЙ МЕТОДОМ ПРЯМОГО ЛАЗЕРНОГО ВЫРАЩИВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПОРОШКА ВЫСОКОЭНТРОПИЙНОГО СПЛАВА	556
М.А. Филиппов, В.С. Марин, В.П. Третьяков ОЦЕНКА ПРЕИМУЩЕСТВ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СВАРКИ	561
Л.С. Метлов, М.М. Гордей КИНЕТИКА ДЕФЕКТОВ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ РЕШЕТКИ ДВУХКОМПОНЕНТНЫХ СПЛАВОВ ПРИ МЕГАПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ	566
Л.В. Коногорова, Н.Д. Оглезнев РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЯЧЕЙСТЫХ СТРУКТУР С РЕГУЛИРУЕМЫМ НАКЛОНОМ И ПЕРЕМЕННЫМ КОЭФФИЦИЕНТОМ ПЕРЕКРЫТИЯ ДЛЯ ПОГЛОЩЕНИЯ ЗВУКА	571
Л.С. Метлов, Е.Д. Дахно ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СТРУКТУРНОГО И МАГНИТНОГО ПАРАМЕТРА ПОРЯДКА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ И ДАВЛЕНИЯХ НА ПРИМЕРЕ СПЛАВА ГЕЙСЛЕРА	574
А.И. Шамшурин, К.А. Стариков, Е.В. Борисов, А.А. Попович СИНТЕЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ОБРАЗЦОВ ИЗ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ СЕЛЕКТИВНЫМ ЛАЗЕРНЫМ ПЛАВЛЕНИЕМ	578
А.М. Грачева, И.А. Полозов, А.А. Попович СЕЛЕКТИВНОЕ ЛАЗЕРНОЕ ПЛАВЛЕНИЕ БИМЕТАЛЛИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА ВТ6/ТИТАНОВЫЙ ОРТО-СПЛАВ	582
А.М. Грачева, И.А. Полозов, А.А. Попович ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ СПЛАВА НА ОСНОВЕ ОРТОРОМБИЧЕСКОГО АЛЮМИНИДА ТИТАНА	586



В.С. Петрович, В.Г. Теплухин, М.В. Новоселов, А.И. Попов ПРИМЕНЕНИЕ СТРУЙНОЙ ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МЕТАЛЛОГРАФИЧЕСКИХ ОБРАЗЦОВ	591
Б.Н. Сабельников, Е.В. Агеева ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОГО БЕЗВОЛЬФРАМОВОГО ТВЕРДОСПЛАВНОГО ПОРОШКОВОГО МАТЕРИАЛА	596
Н.М. Хорьякова, Е.В. Агеев, К.В. Садова ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ И ЭЛЕМЕНТНОГО СОСТАВА ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ПОРОШКОВОЙ МЕДИ, ПОЛУЧЕННОЙ В РАЗБАВЛЕННОМ РАСТВОРЕ СЕРНОЙ КИСЛОТЫ	599
Алматаев Нозимбек Тожибой угли ИЗУЧЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МЕСТНЫХ ПОЛИПРОПИЛЕНОВЫХ ПОЛИМЕРОВ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЕ	
Almataev Nozimbek STUDYING THE TECHNOLOGICAL PROPERTIES OF LOCAL POLYPROPYLENE POLYMERS FOR MACHINE-BUILDING PURPOSE	604
СОДЕРЖАНИЕ	608

# ИННОВАЦИОННЫЕ ИДЕИ В МАШИНОСТРОЕНИИ

Сборник научных трудов  
Всероссийской научно-практической  
конференции молодых ученых

24–26 мая 2022 года

Под редакцией  
доктора технических наук, профессора *А. А. Поповича*,  
доктора технических наук, профессора *Д. П. Гасюка*

Налоговая льгота – Общероссийский классификатор продукции  
ОК 005-93, т. 2; 95 3004 – научная и производственная литература

---

Подписано в печать 27.06.2022. Формат 60×84/16. Печать цифровая.

Усл. печ. л. 38,75. Тираж 60. Заказ 2483.

---

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.