

На правах рукописи



Уразов Олег Владимирович

**РАЗРАБОТКА КОМБИНИРОВАННОЙ ОБРАБОТКИ
С УПРОЧНЕНИЕМ ТРАНСМИССИЙ И МАГИСТРАЛЕЙ
ПРИ ОГРАНИЧЕННОМ ДОСТУПЕ ИНСТРУМЕНТА
В ЗОНУ ВЫПОЛНЕНИЯ ОПЕРАЦИИ**

Специальность: 2.5.5. Технология и оборудование механической
и физико-технической обработки

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Воронеж - 2026

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Воронежский государственный технический университет»

Научный руководитель

Сафонов Сергей Владимирович
доктор технических наук, доцент

Официальные оппоненты:

Кадырметов Анвар Минирович
доктор технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Воронежский государственный
лесотехнический университет им. Г.Ф.
Морозова», профессор кафедры
«Машиностроительные технологии»

Яковлева Анна Петровна

доктор технических наук, доцент,
ФГАОУ ВО «Московский государственный
технический, технический университет
им. Н.Э. Баумана (национальный
исследовательский университет)», доцент
кафедры технологии машиностроения

Ведущая организация

ФГБОУ ВО «Донской государственный
технический университет»,
г. Ростов-на-Дону

Защита состоится 29 октября 2026 г. в 12⁰⁰ часов в конференц-зале на заседании диссертационного совета 24.2.286.06, созданного на базе ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет» (ВГТУ), по адресу: 394026, г. Воронеж, Московский просп., 14.

Адрес для отправки отзыва на автореферат диссертации: 394006, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84, ВГТУ, отдел диссертационных советов.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке и на сайте <https://schgou.ru/> ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»

Автореферат разослан «27» апреля 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат технических
наук, доцент



Мандрыкин
Андрей Владимирович

Общая характеристика работы

Актуальность темы работы: в современном машиностроении происходят изменения, требующие от технологов совершенствования технологических приемов, создания для их реализации новых средств технологического обеспечения. Авиакосмическая и энергетическая промышленность заинтересованы в ускоренном создании прогрессивных комбинированных методов обработки (КМО) с использованием результатов числовых, аддитивных технологий, средств искусственного интеллекта. Применение положительных результатов исследований на всех этапах создания нового объекта зависит от научно обоснованного выбора этапов и сроков разработки продукции. Успехи в этом вопросе стали возможными за счет управления этапами исследований по рекомендациям, полученным на базе расчетов производственной технологичности, после установлении новых закономерностей управления выбором технологических воздействий в комбинированных методах обработки с учетом условий эксплуатации в наукоемком авиакосмическом и энергетическом машиностроении. Последнее расширяет область использования комбинированной обработки (КО) на общее машиностроение, особенно путем упрочнения, повышения надежности и ресурса изделий при ограниченном доступе инструмента в зону их обработки. Проведенные исследования показали, что применительно к высоконагруженным объектам длинномерных транспортных силовых передач, широко используемых в авиакосмической отрасли и в магистралях атомных станций, главное внимание требуется уделять местам сопряжения участков, повышению их надежности и ресурса до уровня не ниже установленного показателя межремонтного периода эксплуатации деталей и узлов в изделии. Такие вопросы могут быть решены только при правильном сочетании в едином технологическом процессе электрических методов обработки и управляемого упрочнения инструментом с геометрией, изменяемой в процессе проведения операции и способным принимать форму, определяемую фактическим положением зоны обработки. При этом для сохранения точности детали и повышения эксплуатационных характеристик длинномерных трансмиссий и магистралей требуется выровнять внутренние напряжения в поверхностном слое. Для этого перед упрочнением необходимо устранить наследственные явления, свойственные традиционной механической обработке с силовым воздействием инструмента, где операция выполняема только в случае непосредственного силового контакта в зоне обработки обрабатываемой поверхности с инструментом при сложных перемещениях его в ограниченном пространстве. Вопрос рассматривается на примерах плановой или аварийной замены неподвижных участков длинномерных конструкций наукоемких изделий авиакосмической или энергетической атомной отрасли машиностроения, где пребывание персонала в потенциально опасной зоне должно быть снижено до минимума. Это актуальная народно-хозяйственная проблема в наукоемком машиностроении. Она может быть решена существенным повышением ресурса работы объектов и ускоренным выполнением операций при осложненном доступе ограниченных видов инструмента, операций выравнивания напряжений и получения заданного наклепа на наиболее нагруженных концевых участках длинномерных деталей, что позволяет многократно ускорить процесс замены элементов при обеспечении их эксплуатационных свойств без остановки агрегатов или при максимальном снижении времени на операцию даже при значительных технологических ограничениях, преодолеваемых использованием научно обоснованного сочетания механических, физико-технических воздействий по алгоритмам, представленным в диссертации.

Исследования выполнялись в Воронежском государственном техническом университете с использованием производственной и исследовательской базы АО КБХА, Воронежского авиационного завода и Нововоронежской атомной электрической станции, откуда получены акты внедрения результатов, что убедительно доказывает полезность и актуальность работы для машиностроения.

Степень разработанности темы: научные основы и применение комбинированных методов обработки, создание средств технологического оснащения для авиакосмической и других отраслей наукоемкого машиностроения исследовались в научных школах и коллективах ученых РАН, вузов, конструкторских организаций предприятий России, бывших стран

содружества и ведущих технически развитых стран мира. Основные исследования по теме диссертации выполнены в Воронеже, Казани, Москве. В исследовании учтены результаты по управлению качеством полученные в Ростове-на-Дону, Туле, Санкт-Петербурге, Брянске, Волгограде, Самаре, Уфе, а также в Белоруссии, Польше, США, Китае и в других странах.

Анализ изученных источников показал, что в большинстве случаев авторы остановились на исследовании отдельных воздействий без детального учета их взаимодействий. Недостаточно полно изучен механизм совместного протекания процессов с упрочнением опасных зон при работе электродами-инструментами с переменными контуром и параметрами режимов, в том числе с возможностью автоматизации процессов для работы в потенциально опасных зонах, и в случае ограничений их доступа в зону выполнения операций. Это не позволяло в полной мере реализовать возможности комбинированных технологий, которые имели большой неиспользованный потенциал по расширению области использования КМО совместно с управляемым упрочнением. Последнее открывает возможность на порядок и более увеличить ресурс и межремонтный период силовых трансмиссий изделий авиакосмического машиностроения и уникальных высоконапорных магистралей атомных электрических станций при минимальных сроках их обслуживания и восстановления без длительного простоя и перерыва выработки энергии. Решение таких вопросов в рассматриваемой работе доказывает актуальность исследований, представленных соискателем.

Цель и задачи исследования.

Целью исследования является создание методологии выбора и назначения управляемых механических и физико-технических воздействий для проектирования технологических процессов и средств технологического обеспечения комбинированных методов размерного съема припуска и упрочнения поверхностного слоя, обеспечивающего получение заданного ресурса и установленного межремонтного периода предельно нагруженных участков длинномерных силовых трансмиссий изделий авиакосмической техники и потенциально опасных высоконапорных магистралей атомных электростанций с учетом технологических ограничений условий выполнения операций.

Для достижения данной цели были поставлены и решены следующие **задачи**:

1. Обоснование области использования КМО с упрочнением для типовых деталей в наукоемком авиакосмическом и энергетическом машиностроении.
2. Разработка механизма управления воздействиями в КМО с применением физико-технических составляющих объединенного процесса.
3. Моделирование процедуры комбинированной обработки и методов ее эффективного использования для проектирования комбинированных технологических процессов локальной обработки с упрочнением высоконагруженных участков деталей, регламентирующих ресурс и надежность эксплуатации наукоемких изделий.
4. Обоснование выбора и создание средств технологического обеспечения для КМО с упрочнением и использованием в производственной операции инструмента, снимающего или снижающего ограничения по допуску его в зону выполнения работы.
5. Проведение испытаний для обоснования ресурса, доказательства получения требуемого уровня качества при эффективном использовании КМО в современных и перспективных изделиях авиакосмической и энергетической отраслях наукоемкой техники.

Предмет и объект исследования. Высоконагруженные переходные и концевые участки трубчатых длинномерных трансмиссий и магистралей летательных аппаратов и энергетических установок атомных станций, где требуются технологические приемы, способные повысить качество и увеличить ресурс опасных для разрушения высоконагруженных участков наукоемких изделий до достижения уровня не ниже аналогичных показателей всего узла.

Методологическая, теоретическая и эмпирическая база, достоверность результатов.

Для научного подхода к решению поставленных в работе задач, обоснованы и выдвинуты научные гипотезы по тематике исследований, подобраны, частично спроектированы и изготовлены средства технологического оснащения для выполнения экспериментальных исследований, подтверждающих правомерность теоретических расчетов. Теоретические

положения строятся на принципе полезности и методике оценки эффективности вариантов по производственной технологичности. Потребовался новый методологический подход к проектированию КМО с базированием операций от внутренней поверхности объектов исследований для устранения дисбаланса и вибрации трансмиссий, а также создание средств автоматического проведения операций упрочнения магистралей атомных электрических станций, сокращающих при проведении ремонтных работ время пребывания обслуживающего персонала в потенциально опасной зоне установки и необходимость отключения блоков для выработки энергии. Результаты работы прошли проверку в производственных условиях и внедрены с реальным экономическим эффектом.

Научные результаты, выносимые на защиту.

1. Доказательная база для применения в едином комбинированном технологическом процессе механических и физико-технических воздействий с динамичным управлением их величиной для выравнивания и повышения ресурса высоконагруженных элементов силовых передач и напорных магистралей, расширяющих возможности создания перспективной наукоемкой продукции, оцениваемой по критериям производственной технологичности.

2. Методология проектирования КМО с базированием изделий от внутренней поверхности трансмиссий для выявления, устранения дисбаланса и вибраций объектов в процессе их эксплуатации.

3. Механизм протекания и моделирование процессов комбинированной обработки с управляемым упрочнением и научно обоснованными предложениями по доступу инструмента в зону протекания процесса.

4. Разработка методики ускоренного выбора типовых объектов исследования, влияния физико-технических воздействий на механизм формирования структуры и средств комбинированных методов обработки с механическим наклепом поверхностного слоя.

Научная новизна результатов и личный вклад соискателя в технологическую науку

1. Научное обоснование эффективности применения физико-технических воздействий в комбинированных технологических процессах с применением качественной и количественной оценки их использования по разработанному механизму управления процессом на базе закономерностей производственной технологичности с учетом условий эксплуатации и восстановления качества наукоемких изделий авиакосмической и энергетической отраслей машиностроения.

2. Структура и построение механизма математического описания моделей, регулирующих в комбинированном процессе взаимосвязи между режимами обработки и параметрами упрочнения при различных сочетаниях предложенных технологических приемов, применимых в условиях ограничения доступа инструмента в зону обработки.

3. Теоретическое обоснование и механизм автоматизированного устройства, защищенного патентом РФ, для поверхностного упрочнения зоны повреждения соединений.

4. Перспективы расширения области использования КМО с упрочнением и пополнение сведений по повышению качества и ресурса изделий в информационной базе по технологической науке.

Практические результаты работы.

1. Выбор, расчет и создание инструмента для комбинированных методов обработки внутренних и наружных поверхностей, труднодоступных для выполнения операций чистового удаления припуска с управляемым упрочнением.

2. Методология проектирования режимов и комбинированных технологических процессов непрофилированными электродами-инструментами нежесткой конструкции с выполнением эксплуатационных требований к наукоемким изделиям авиакосмического и энергетического машиностроения.

3. Экспериментальное подтверждение качества материалов после КМО, обоснование возможности повышения ресурса, межремонтного цикла, надежности наукоемких изделий для расширения области использования результатов исследований.

4. Разработка мероприятий для обеспечения безопасности обслуживающего персонала в период выполнения операций с КМО.

5. Пополнение базы и банка информации о технико-экономических возможностях КМО наукоемких изделий в отраслевом и общем машиностроении.

Соответствие выполненных исследований паспорту специальности

Работа выполнялась в соответствии с требованиями паспорта специальности 2.5.5. Технология и оборудование механической и физико-технической обработки, где область исследований включала:

1. Назначение и создание комбинированных методов обработки с управляемыми физико-техническими воздействиями для открытых и труднодоступных для обработки элементов трансмиссий и магистралей с их описанием и совершенствованием процессов для повышения качества и ресурса наукоемких изделий машиностроения и энергетики (п. 2 шифра специальности 2.5.5.).

2. Проектирование и применение инструмента для обработки труднодоступных мест выполнения операций, что соответствует (п. 4 шифра специальности 2.5.5.).

3. Изучение механизма, теоретическое описание процесса и применение электродов-инструментов с переменным профилем (п. 6 шифра специальности 2.5.5.).

Апробация и реализация результатов исследований.

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на международных и отраслевых научно-технических конференциях: XII Международной научно-технической конференции Ассоциации технологов-машиностроителей «Инновационные технологии в транспортном и химическом машиностроении» (Тамбов, 2020); конференции «Современные направления и перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении» (ICMTMTE 2021) (Севастополь, 2021); Международной научно-практической конференции «Технологическое обеспечение и повышение качества изделий машиностроения и авиакосмической отрасли» (Брянск, 2022); International Scientific Conference «Scientific research of the SCO countries: synergy and integration» (Пекин, Китай – 9 декабря 2023 г.); XIV Международной научно-практической конференции «Инновации в машиностроении» (Кемерово: КузГТУ, 26 ноября – 2 декабря 2023); 15-м МНТК «Наукоёмкие технологии в машиностроении» в рамках конгресса «Русский инженер» (Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана 1-3 ноября 2023 г.); 16-й МНТК «Наукоёмкие технологии машиностроения, авиации и транспорта» (Ростов-на-Дону, 23-29 сентября 2024 г.); XVII Международной научно-технической конференции «Наукоёмкие технологии в машиностроении: современные тренды, перспективы развития и опыт подготовки инженерных кадров 2025» (Крым, Алушта).

Результаты работы прошли проверку и внедрены на АО «Конструкторское бюро химавтоматики» и на ремонтной базе Нововоронежской атомной электрической станции, откуда получены акты внедрения результатов с реальным экономическим эффектом. Исследования использованы при выпуске авиационной техники на Воронежском авиационном заводе, в станкостроении страны, в учебном процессе ВГТУ и Нововоронежского политехнического института – филиала НИЯУ МИФИ.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 14 научных работ. В их числе: 6 – в изданиях, рекомендованных ВАК РФ; 1 патент РФ; 5 – в зарубежных научных источниках, рецензируемых в базе «Scopus»; 2 публикации в научных сборниках и материалах конференций, где соискателю принадлежат: постановка, развитие научной проблемы, изучение механизма протекания процессов в рабочих средах с управляемыми физическими параметрами, реализация результатов в авиакосмической отрасли и в других видах машиностроения. В работах, изданных в соавторстве, все авторы в равной степени принимали участие в проведении исследований по теме работы и не имеют взаимных претензий.

Структура и объем работы Диссертация состоит из Введения, 5 глав, Заключение, списка литературы (160 наименований), 42 рисунков, 9 таблиц и 2 приложений. Содержание диссертации изложено на 155 страницах машинописного текста с рисунками, таблицами, приложениями.

Содержание работы

Во Введении содержится комплексное описание диссертационной работы, включающее общую характеристику, исследования, аргументацию актуальности выбранной темы, формулировку цели и задач, представление научной новизны и практической ценности полученных результатов, описание методов достижения поставленных целей, подтверждение достоверности и полезности материалов, характеристику вклада в развитие технологической науки, детализацию в поставленных задачах, личного участия автора в проведении и внедрении результатов исследований. В этом разделе детально раскрываются ключевые аспекты работы и значимость проведенного исследования для научной и практической сферы.

В первой главе представлен анализ исследований по теме диссертационной работы, включающий изучение конструктивных, производственных и эксплуатационных характеристик типовых объектов производства в авиакосмической и энергетической отраслях машиностроения (рисунок 1 и 2). Доказано, что здесь целесообразно использовать разработанную систему оценки уровня производственной технологичности, применять КМО и создаваемое оборудование, средства контроля, инструмент, обеспечивающий доступ к месту выполнения работ. Этим достигается реализация приемов для получения конкурентоспособной продукции, автоматизация производства, расширение области использования КМО, сокращение сроков запуска новых и модернизированных изделий в серийное производство, обоснование выбора задач для достижения поставленной в работе цели.

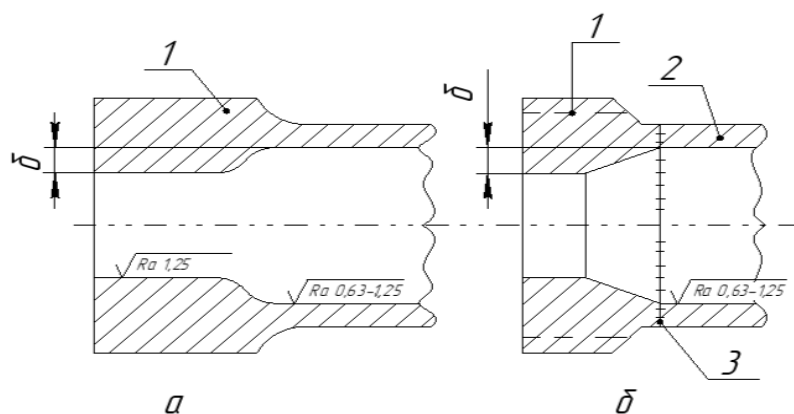


Рисунок 1 – Концевые участки силовых приводов трансмиссий

а – из цельнометаллических трубчатых заготовок с продольной осадкой концов (δ – напуск на чистовую обработку внутренней поверхности); б – сборные участки из серийно изготавливаемых наконечников 1, присоединяемых к трубе 2 привода неподвижной сборкой 3, например, сваркой

Приведенные на рисунке 1 элементы конструкции вызывают большие производственные трудности при чистовой обработке внутренних поверхностей с последующим упрочнением из-за образования при осадке концевых участков, когда здесь создается канал меньшего диаметра, ограничивающий доступ инструмента в зону обработки. Такие сложности уменьшаются за счет разработки новых видов электродов-инструментов с переменным периметром, что относится к изучаемой проблеме и решается в одной из поставленных задач исследования.

Научным доказательством возможности появления опасных дефектов на концевых и стыковочных участках трансмиссий является опыт, накопленный при эксплуатации в авиационной технике силовых приводов, где основная часть опасных концентраторов напряжений выявляется на концевых и стыковочных участках длинномерных конструкций, что становится ограничением при назначении ресурса для изделий в целом. На этот эксплуатационный показатель значительное влияние оказывают условия эксплуатации летательных аппаратов, где возможны систематические перегрузки за счет резких ускорений и торможений, вращения, перераспределения крутящих моментов между валами, что

представлено в приведенной в работе конструкции редуктора современного вертолета с распределенным выводом приводов для обслуживания изделия. Анализ кинематики перераспределения и передачи силового вращения от редуктора к приводам однозначно доказал, что вероятность разрушения концевых участков значительно выше, чем основной части вала. Несмотря на проведенные многочисленные технологические усовершенствования, включающие чистовую механическую обработку внутренних поверхностей, упрочнение наружной и внутренней поверхности, проблема повышения надежности и ресурса остается востребованной для отрасли. Поэтому исследования в этом направлении актуальны, и они предусмотрены в задачах работы.

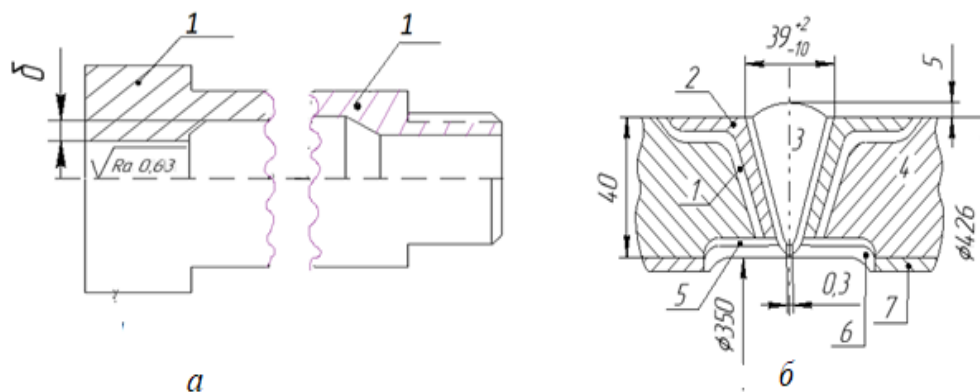


Рисунок 2 – Концевые участки труб (1) для соединения участков в герметичных магистралях:
 а – однослойная труба с усиленными переходными зонами; б – двухслойные трубы после неподвижной сборки сваркой
 1 – прокладка; 2 – вставка из металла; 3 – присадочный материал; 4 – концевой участок магистрали; 5; 6 – экран для защиты внутренней поверхности трубы от капель расплава при сборке; 7 – внутренняя труба

Анализ рисунка 2 показал, что конструктивные особенности магистралей и требуемые для повышения ресурса технологические мероприятия близки к исследуемым для трансмиссий, поэтому они соответствуют поставленным в работе задачам исследования. Доказано, что технологические процессы и методы повышения качества, работоспособности и ресурса магистралей в атомной и авиакосмической отрасли близки по видам применяемых способов, видам производства, используемым средствам контроля и испытаний объектов с концевыми участками одинакового или различного сечения, соединенными с магистралью неподвижной неразъемной сборкой. Они предназначены для создания герметичных устройств с высоким межремонтным ресурсом при выполнении операций при минимальных сроках простоя оборудования. В большей степени это относится к созданному и создаваемому технологическому оборудованию для комбинированных методов обработки объектов варианта «а» на рисунке 2, где рассматриваются сварные однослойные магистрали с высоким межремонтным периодом. Существенным положительным отличием здесь является отсутствие необходимости перемещения объектов в процессе эксплуатации. Однако это усложняет доступ персонала и инструмента к месту выполнения технологических операций и для контроля концевых участков магистралей при выполнении регламентных и ремонтных работ. Отмеченные на рисунке 2, б ограничения особенно значимы для последнего варианта объектов исследования, поскольку время пребывания персонала в потенциально опасной зоне работающего изделия ограничено вероятностью получения травм и профессиональных заболеваний. На всех объектах после обработки имеются проблемные критические элементы (сварные соединения, узлы, зоны), подверженные образованию и ускоренному развитию эксплуатационных повреждений. Длительное термосиловое и механическое воздействие, осложненное условиями эксплуатации и трудностями доступа в зону проведения технологических операций при регламентных и восстановительных операциях, способно снижать ресурс изделий, вызывать ускоренное старение и разрушение материалов в наиболее

нагруженных зонах. Такими зонами, как правило, являются сварные соединения на концевых участках трубопроводов различного диаметра. Среди них композитные швы в магистралях атомных электростанций в значительно большей степени подвержены возникновению технологических и эксплуатационных дефектов. Это происходит за счет неоднородности материалов и различных коэффициентов линейного расширения зон локального нагрева, что способно увеличить значения напряжений в процессе эксплуатации до предельно опасного критического уровня. Здесь появляется необходимость назначения компенсирующих мероприятий для восстановления служебных эксплуатационных характеристик, что обосновывается экспериментально и опытным методом путем упрочнения деталей с обеспечением их работоспособности в течение всего срока службы или выполнения регламентных работ. В магистралях наукоемких изделий наиболее сложными случаями при проведении монтажных операций является нарушение герметичности соединений трубопроводов под действием циклических термических и механических нагружающих воздействий в условиях ограниченного доступа персонала и инструмента в зону обработки. Решение такой проблемы является одной из задач работы, решаемой при проведении восстановительных операций без остановки технологического процесса, что устраняет значительные экономические потери из-за простоя агрегатов и изделий.

Проводимые с участием автора исследования по автоматизации восстановительных и контрольных работ для НВАЭС и создание новых (на уровне изобретений) автоматических устройств позволяют частично решить проблему сокращения пребывания персонала в опасных зонах атомных станций. Это в дальнейшем нашло применение при изготовлении и испытании ракетных двигателей, хотя в настоящее время требуется продолжение и расширение области выполнения работ в этом направлении.

Кроме того, в главе представлены методы комбинированной обработки (КМО) с применением физико-технических воздействий; анализ упрочняющих технологий на предмет совместимости их с другими видами в КМО; производственная технологичность как инструмент качественной и количественной оценки применимости КМО; средства технологического оснащения для реализации созданных технологических процессов комбинированных методов обработки; контроль и испытания объектов производства после КМО.

Анализ состояния вопроса служит базой для постановки и решения задач, что требуется для достижения цели выполняемой работы.

В главе 2 приведены пути и методы решения поставленных задач и достижения обозначенной в работе цели.

Оценка уровня проработки материалов по теме исследований позволяет ускорить решение поставленных задач путем концентрации усилий разработчиков на главных направлениях работы, ограниченных выдвинутыми научными гипотезами. К ним относятся:

1. Опыт использования в наукоемком машиностроении КМО доказал, что получить новые технологические результаты возможно при научно обоснованном совместном действии в едином технологическом процессе нескольких взаимосвязанных физико-технических воздействий, выбор которых зависит от многих факторов, в том числе, от эксплуатационных требований. В рассматриваемом случае одним из таких воздействий является механическое упрочнение поверхностей, определяющих ресурс изделия и создающих условия для расширения области использования изучаемых методов и устройств на другие отрасли машиностроения.

2. К выбранным и обоснованным для исследования типовым деталям авиакосмического и энергетического машиностроения предъявляются требования, схожие по эксплуатационным условиям, что позволяет применять единый методологический подход при описании механизмов, разработке моделей, обосновании воздействий при проектировании технологических процессов и при использовании средств технологического оснащения. Такой подход обеспечивает ускорение поиска лучших вариантов обработки с упрочнением, сокращает сроки и затраты на решение поставленных задач.

3. Управление созданием комбинированного процесса с использованием физико-технических воздействий может осуществляться по критерию полезности, представленному в

работе при отработке технологичности по закономерностям многокритериальной оптимизации выбора вариантов с вероятностными ограничениями по алгебре Буля. Здесь для процессов упрочнения внутренней поверхности силовых приводов механизм может быть раскрыт по моделям, управление которыми базируется на закономерностях пластической деформации металлов, в том числе концевых участков, где возможна наибольшая концентрация очагов разрушения материала.

4. Обоснование зоны упрочнения высоконагруженных мест стыковки участков при их замене может быть построено с учетом полного отсутствия возможности доступа к внутренней поверхности магистрали, поэтому такая операция выполнима только снаружи. Здесь наилучший доступ к месту стыковки имеет непрофилированный инструмент в форме электрода-щетki, но для его использования требуется научное обоснование механизма упрочнения и создание уточненных режимов обработки и параметров инструмента. Управление процессом может осуществляться по закономерностям, близким к волновой теории ударно-динамического метода, с учетом различной обрабатываемости присадочных материалов и их составов в местах стыковки при электрических воздействиях в КМО, что также является объектом изучения в рассматриваемой работе.

5. Назначение ресурса и межремонтного периода восстановления работоспособности длинномерных приводов и магистралей требует проведения исследований структуры и эксплуатационных свойств материалов после применения КМО, где для повышения уровня их технологичности необходимо назначать многоцикловые трудоемкие усталостные испытания. Согласно ГОСТ, они проводятся для сталей на базе $2 \cdot 10^7$ циклов, что обосновано для трансмиссий и назначения их ресурса. Анализ условий эксплуатации магистралей атомных электрических станций дает основания ограничить длительность испытаний до $3 \cdot 10^4 - 3 \cdot 10^5$ циклов без ухудшения работоспособности всего агрегата и при существенном снижении времени простоя без выработки электроэнергии.

Обоснованы выбор, необходимость изготовления экспериментального оборудования, средств технологического оснащения, частично предложенных впервые по патентам членов творческого коллектива, работающего с соискателем.

Применение приведенного в работе алгоритма действий для достижения поставленной цели, позволяет ускорить проведение необходимых исследований, учесть перспективы и расширить область использования достижений технологической науки и опыта практического использования результатов в промышленности.

В третьей главе приведены механизм и моделирование процесса комбинированной обработки с управляемым упрочнением концевых и контактирующих участков конструкций с учетом условий эксплуатации.

Для выполнения технологических операции комбинированной обработки с упрочнением поверхностного слоя требуется применение инструмента, включающего в конструкцию блок механического упрочнения, обеспечение его доступа в зону проведения операции и получение требуемых качественных и количественных показателей качества изделия. Рассматривается обработка полузакрытых каналов в длинномерных трубах; комбинированное упрочнение стыковочных участков с их чистовой подготовкой; проведение комбинированной обработки изучаемых элементов магистралей при ограниченном доступе инструмента. Учитывается специфика построения процесса и обеспечение его средствами технологического обеспечения при единичной технологии, свойственной для выполнения ремонтных и восстановительных работ, в частности проводимых в полевых условиях (трансмиссии и магистрали авиакосмической техники), на магистралях потенциально опасных для персонала атомных электрических станций и на других предприятиях машиностроения.

Рассмотрены операции с упрочнением внутренних поверхностей, для чего был спроектирован и изготовлен электрод-инструмент для комбинированной обработки с упрочнением внутренних поверхностей (рисунок 3).



Рисунок 3 – Электрод-инструмент (ЭИ) с регулируемым диаметром рабочей части

Электрод на рисунке 3 способен выполнять чистовую обработку с упрочнением длинномерных каналов, имеющих переменный диаметр отверстий. Обработка выполняется при продольной подаче инструмента и вращении заготовки. Для изменения наружного диаметра в нем выполнено 3 равнорасположенных в сечении паза, позволяющих через внутренний конус разводить или сжимать диаметр до размера, дающего возможность перед началом обработки вводить инструмент через участок трубы с осаженным концом, имеющим меньший (на 0,5-0,8 мм) диаметр. На наружной поверхности в пазы вмонтированы нетокопроводящие керамические шаровидные упрочняющие элементы, которые для диаметров отверстий менее 45 мм установлены неподвижно, а при больших размерах сечений могут иметь вращение. Перед началом комбинированной обработки ЭИ в сжатом по диаметру состоянии вводят через отверстие заготовки в технологический приемник, перемещением тяги с наружным концевым конусом через отверстие в ЭИ расширяют диаметр рабочей части. Это изменение, как правило, эквивалентно удвоенной сумме размеров на величину припусков под анодную обработку отверстия в заготовке и на пластическую деформацию под упрочнение материала. Для прецизионных каналов в расчет требуется дополнительно ввести однократную величину допуска на размер основной части отверстия.

Далее начинают процесс калибровки диаметра концевой части путем анодного растворения передней частью ЭИ на длине до упрочняющих элементов при расчетном усилии, требуемом для его упрочнения при продольном перемещении ЭИ с вращением заготовки. После снижения припуска в этой части обработанной поверхности до величины, установленной для упрочнения, начинается наклеп шаровыми элементами с подачей на шаг винтовой линии. Эффективность однопроходного пластического упрочнения повышается, если зоны наклепа имеют просветы между соседними участками, поэтому при комбинированной обработке не требуется перенастройка режимов при прохождении ЭИ концевых участков заготовки. На рисунке 4 показан длинномерный вал привода агрегатов от редуктора изделия, где при комбинированной обработке диаметр отверстия упрочнен с концевых участков до 15-18 %, что позволило повысить его ресурс на величину свыше такого показателя для всего редуктора и создать возможность дальнейшей модернизации узла.

Рассмотрена обработка наружных поверхностей в местах неподвижной неразъемной сборки участков. Для выполнения такой операции в настоящее время преимущественно используется нежесткий инструмент для комбинированной обработки, обеспечивающий частичное упрочнение разнородных стыковочных металлических элементов, входящих в узел.

Для требуемого упрочнения обрабатываемого узла, приведенного на рисунке 2 б, предложено использовать в качестве инструмента при КМО металлический электрод-щетку (ЭЩ) (рисунок 5), где требуется создать новые параметры конструкции с допуском в зону обработки и режимы, позволяющие после сборки удалять припуск с контактных участков, имеющих различную обрабатываемость, вызывающую появление дефектов поверхности после чистовой обработки под упрочнение. Такие рекомендации детализированы в диссертации.



Рисунок 4 – Вал привода из стали 40ХНМА с упрочненной внутренней поверхностью

На рисунке 4 показан длинномерный вал привода агрегатов от редуктора изделия, где при комбинированной обработке диаметр отверстия упрочнен с концевых участков до 15-18 %, что позволило повысить его ресурс на величину свыше такого показателя для всего редуктора и создать возможность дальнейшей модернизации узла.

Рассмотрена обработка наружных поверхностей в местах неподвижной неразъемной сборки участков. Для выполнения такой операции в настоящее время преимущественно используется нежесткий инструмент для комбинированной обработки, обеспечивающий частичное упрочнение разнородных стыковочных металлических элементов, входящих в узел.

Для требуемого упрочнения обрабатываемого узла, приведенного на рисунке 2, б, предложено использовать в качестве инструмента при КМО металлический электрод-щетку (ЭЩ) (рисунок 5) там, где требуется создать новые параметры конструкции с допуском в зону обработки и режимы, позволяющие после сборки удалять припуск с контактных участков, имеющих различную обрабатываемость, вызывающую появление дефектов поверхности после чистовой обработки под упрочнение. Такие рекомендации детализированы в диссертации.

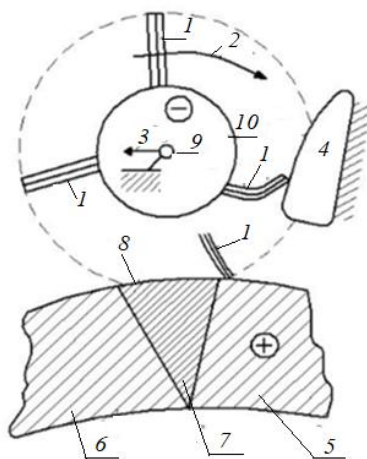


Рисунок 5 – Электрод-щетка для комбинированной обработки с ударным пластическим упрочнением поверхности

1 – пучок проволоки; 2 – направление вращения ЭЩ; 3 – направление перемещения ЭЩ при обработке; 4 – упор; 5-6 – детали магистрали; 7 – сварной шов; 8 – выступ сварного шва; 9 – ось вращения ЭЩ; 10 – центральный диск инструмента

ЭЩ на рисунке 5 выполнен по изобретению и предназначен для чистовой комбинированной обработки мест соединения деталей 5 и 6 магистрали сварным швом 7, поверхность которого возвышается в районе выступа 8 сварного шва, полученного на дыхательном трубопроводе Нововоронежской атомной электростанции. Параметры выступа показаны на Рис. 2. б. ЭЩ имеет несколько пучков 1 (Рис. 5) металлической проволоки или листового материала из нитинола, обладающего эффектом памяти. Отличием предложенной

конструкции является минимальное количество пучков (как правило, три), равномерно расположенных по периферии диска 10, что обеспечивает лучшее балансирование инструмента при рабочем вращении ЭЩ вокруг оси 9. В память металла пучков 1 заложено прямолинейное положение, поддерживаемое центробежными силами от вращения диска. При выполнении операции диск 10 перемещают в направлении 3 и вдоль оси магистрали совместно с упором 4 из износостойкого материала (например, минералокерамики). Рабочая поверхность упора имеет плавный профиль и соединена с диском 10. При набегании каждого пучка 1 в прямолинейном состоянии происходит изгиб концов пучка, его нагрев за счет трения, перемещение концов в изогнутом положении к месту соединения деталей 5, 6, 7. При сближении разнополярных электродов начинаются разряды между набегающим пучком и деталью 5 на рисунке 5. За счет выделения тепла происходит дальнейший нагрев изогнутого пучка 1 и его резкое (ударное) выпрямление, которое усиливает центробежную силу от вращения диска и обеспечивает наклеп поверхности. За счет ударов и силовых воздействий от ударной волны импульсных разрядов концы пучков претерпевают импульсное ударное перемещение к месту обработки и выравнивают наклеп. Одновременно ЭЩ удаляет неровности и другие концентраторы напряжений в месте соединения деталей 5, 6, 7. Ограничением для использования ЭЩ является соседняя деталь магистрали, исключающая возможность ее отгиба или перемещения для доступа инструмента (в рассмотренном примере сечение трубы из высоколегированных сталей имеет диаметр 426 мм, толщину стенки 40 мм). При величине просвета менее 10 мм между этими деталями упрочнение замыкающего участка по контуру места соединения можно выполнить комбинированным немеханизированным методом. Здесь в качестве инструмента применяется токопроводящая абразивная лента, перемещаемая через локальный участок с минимальным просветом при радиальном давлении, выполняемом натяжением ленты. Ограничением является недостаточная степень наклепа (как правило, не более 6-10 %), не позволяющая в полной мере реализовать потенциал местного упрочнения при эксплуатации объекта. В большинстве магистралей, созданных для атомных станций, просвет превышает 10-15 мм и на этом участке технологично использовать механизированный процесс упрочнения накаткой металлическими роликами. Для этого автором создана установка для упрочнения, на базе которой изобретен автомат для поверхностного наклепа зоны повреждения соединений, примененный и внедренный на предприятиях авиакосмической и энергетической отрасли машиностроения. Устройство, принцип работы созданных устройств раскрыты в диссертации. Там же приложены акты внедрения патента. Для рассмотренного процесса локального упрочнения со степенью наклепа до 30 % был смоделирован механизм, спроектирован представленный в диссертации технологический процесс, где обоснованы технологические режимы, включающие нагрузку на инструмент при накатке 2500-3000 Н, глубину вдавливания ролика 0,04-0,08 мм, скорость подачи роликов диаметром до 8 мм – 25 м/мин. В работе приведены алгоритмы расчета параметров и раскрыто их влияние на эксплуатационные характеристики изделий в различных отраслях машиностроения. Созданный механизм и модели описывают процессы комбинированной обработки с управляемым упрочнением концевых и контактирующих участков конструкций с учетом условий их эксплуатации.

Разработана модель процесса пластического упрочнения, предназначенная для определения, назначения, расчета оптимальных режимов выполнения операции. Такая МКЭ-модель позволяет производить расчет процесса упруго-пластической деформации материала различным инструментом. При разработке расчетной модели были приняты следующие начальные условия и ограничения:

1. Процесс протекает при упруго-пластической деформации материала, где инструмент принимается абсолютно жестким, что в соответствии с принятыми научными гипотезами позволяет упростить расчеты за счет исключения из процесса менее значимых воздействий КМО. Кроме того материал обрабатываемого образца на первом этапе считается однородным относительно исходного состояния.

2. Модель содержит порядка 1 200 000 узлов. Она создана в программном комплексе UZOR 1.0, предназначенном для конечно-элементной процедуры вычисления на основе

суперэлементного подхода, когда расчетная схема строится не сразу для всей конструкции (как в обычном методе конечных элементов), а в несколько этапов – уровней. На каждом этапе равновесие суперэлемента определенного уровня α , имеющего порядковый номер δ описывается через матрицу жесткости суперэлемента $[K^{\alpha,\delta}]$, узловые параметры, вектор перемещений $\{q^{\alpha,\delta}\}$ и вектор усилий $\{P^{\alpha,\delta}\}$, системой вида $[K^{\alpha,\delta}]\{q^{\alpha,\delta}\} = \{P^{\alpha,\delta}\}$

Модель позволяет получать для расчете режимов описание полей деформаций и напряжений при динамичном нагружении зоны упрочнения контактной частью комбинированного инструмента.

3. Подобная пространственная конечно-элементная модель позволяет выявлять в трансмиссиях и магистралях различные отклонения, способные перерасти в концентраторы недопустимых напряжений. Примером таких несовершенств являются ремонтные нарушения процесса в зонах сварных соединений.

Механизм построения конечно-элементной модели обеспечивает определение участка максимальной эксплуатационной повреждаемости магистрали, например, трубопровода атомной станции, где уже имеется неблагоприятное воздействие потока теплоносителя в магистрали, что приводит к образованию градиента температур и внутренних напряжений по сечению трубопровода, нарушающих стабильность режимов и параметров прочности при комбинированной обработке с упрочнением опасных участков пластической деформацией.

Для управления процессом пластического упрочнения создан алгоритм моделирования с использованием закономерностей производственной технологичности, реализуемый при выпуске высокоресурсных, наукоемких изделий. В работе приведена структура механизма и модели процесса отработки производственной технологичности за период жизненного цикла изделий авиакосмической и атомной энергетической отрасли машиностроения.

В соответствии с требованиями технического задания или тактико-техническими требованиями к изделию оцениваются возможности и ограничения, которые необходимо выполнять при построении модели. К ним относятся: техническая характеристика и программа выпуска изучаемых объектов производства, уровень научной разработки проблемы, установленный ресурс, условия эксплуатации, планируемые сроки и объемы вложений на подготовку производства изделия. Применительно к изучаемой отрасли необходимо иметь информацию об уровне защиты персонала от внешних негативных воздействий, ограничениях, связанных с техникой безопасности, особенностями утилизации материалов после замены объектов при ремонте и регламентном обслуживании, уровнем отработки технологичности всего объекта, а также производственных показателях для конкретной исследуемой отрасли. Для анализа может потребоваться информация о полноте оснащения производства персоналом, техническими средствами, включая вычислительную и контрольную технику, сведения об отечественных и зарубежных смежниках, выпускающих аналогичную продукцию.

В качестве граничных условий для проектирования и использования модели следует применять численные показатели, приведенные в исходных данных, результаты научных исследований по отработке технологичности, возможность освоения выпуска продукции при различных видах производства в текущий момент времени и на перспективу.

Использование алгоритма способствует ускорению процедуры назначения обоснованного предельно допустимого ресурса передач, позволяет формировать перспективные планы обслуживания объектов, создавать пути совершенствования создаваемых изделий, служит основой для проведения патентной защиты объектов производства, расходования средств на оснащение оборудованием и подготовку кадров.

Создан механизм отработки производственной технологичности наукоемких изделий машиностроения, где обоснован отбор элементов исследований. Для отработки производственной технологичности были выбраны типовые детали, работающие в условиях крутильных колебаний на примере приводов авиакосмической техники, где при регламентных и восстановительных ремонтных работах необходимо периодически проводить замену участков

длинномерных приводов и магистралей, выработавших ресурсный срок эксплуатации или досрочно утративших работоспособность.

Проведено научное обоснование выбора методов, средств, инструмента и оборудования.

Для сокращения трудоемкости, ускорения сроков проведения операций при применении ограниченного количества средств технологического оснащения потребовалось научное обоснование выбора методов и средств, инструмента и оборудования, что стало возможным при использовании механизма отработки производственной технологичности, где в работе предложен принцип полезности, позволяющий на стадии создания нового способа объективно оценить его технологические возможности для рассматриваемых изделий и отрасли машиностроения. Для минимизации затрат на стадии изготовления изделия требуется назначить или создать оптимальный вариант изготовления продукции, в основном из числа комбинированных методов, предложенных учеными нашей страны.

В предложенных алгоритмах раскрыта процедура отработки производственной технологичности в машиностроении и раскрыт механизм управления комбинированными методами обработки.

Использование для создания системы управления возможностей физико-технических воздействий по накопленным информационным материалам, обработанным с применением цифровых технологий и средств искусственного интеллекта, позволяет построить механизм освоения процесса по кратчайшим траекториям поиска оптимальных технологических решений. В его основе лежит принцип полезности, формально выражаемый зависимостью,

$$\begin{aligned} K_{o1}^p P_{o1} &\geq P_{p1}, \\ K_{o2}^p P_{o2} &\geq P_{p2}, \\ &\dots\dots\dots \\ K_{om}^p P_{on} &\geq P_{pn}. \end{aligned} \quad (1)$$

С использованием критерия «принцип полезности» можно достаточно убедительно прогнозировать достижимый и предельный уровень воздействия каждого технологического фактора $P_{o1}, P_{o2}, \dots, P_{on}$ (n – количество изучаемых показателей) в создаваемом или модернизированном изделии относительно аналогичного объекта ($P_{p1}; P_{p2} \dots$), освоенного в современном машиностроении, на получение объединенного технологического показателя ($P_{o1}; P_{o2} \dots$) и управлять процессом до достижения конечных оценочных показателей в рассматриваемом комбинированном методе обработки. В (1) критерий полезности $K_{o1}; K_{o2}; \dots, K_{om}; K_{o}; K_{o2}; \dots, K_{om}$ (m – минимальное количество технологических воздействий, рассматриваемых в работе), численно отражает степень эффективности выбранных мероприятий для повышения эксплуатационных показателей объекта производства до границ не ниже заданных в задании. Это сужает зону поиска оптимального варианта воздействия. Требуемые величины критерия зависят от многих факторов, включая характеристики зоны обработки, режимные параметры, наличие и качество технологической базы, организационные мероприятия. Они отражены в задании, формируют начальные и граничные условия при моделировании, устанавливаются для конкретных выбранных технологических воздействий в комбинированном процессе, где базой служит объем и содержание предшествующего опыта и структура, содержание информационной базы.

Для моделирования процесса выбора технологических методов и средств в машиностроении исходными данными являются: принятые заказчиком наиболее значимые (как правило, указанные в задании) виды параметров процесса; имеющийся уровень изучаемых обоснованных технологических показателей; требуемая и допустимая величина параметров по условиям эксплуатации изделий; специфичные требования со стороны заказчика. Граничные условия устанавливаются сторонами по взаимному соглашению, включающему сроки, затраты на разработку объекта, организационные факторы.

Управление выбором по предложенному критерию технологичности выполняется с учетом вектора положительного или отрицательного воздействия путем сравнения численных значений оценочных параметров, полученных для конкретного мероприятия.

$$\begin{aligned} \vec{K}_1, \vec{K}_2, \dots, \vec{K}_m &\rightarrow \max, \\ \vec{K}'_1, \vec{K}'_2, \dots, \vec{K}'_m &\rightarrow \min, \end{aligned} \quad (2)$$

где $\vec{K}_1, \vec{K}_2, \dots, \vec{K}_m$ – векторы положительных показателей; $\vec{K}'_1, \vec{K}'_2, \dots, \vec{K}'_m$ – векторные значения, способные вызвать снижение полезности мероприятия, оцениваемого по критерию полезности.

В общем виде система управления с использованием критерия полезности имеет вид:

$$\begin{aligned} \vec{K}_{o1} \Pi_{o1} &\geq \Pi_{p1} \\ \vec{K}_{o2} \Pi_{o2} &\geq \Pi_{p2} \\ \vec{K}_{om} \Pi_{om} &\geq \Pi_{pn}. \end{aligned} \quad (3)$$

По зависимости (3) можно разработать целевые модели, учитывающие условия эксплуатации изделий, прежде всего, наукоемкого авиакосмического и энергетического машиностроения, результаты которых послужат базой для совершенствования комбинированных технологических процессов остальных отраслей машиностроения, где граничные условия в основном должны включать только специфичные требования отрасли. Последнее облегчает, ускоряет и удешевляет выбор и использование предлагаемых или создаваемых комбинированных методов обработки.

В работе приведен алгоритм критериальной оценки уровня полезности технологических воздействий и их сочетаний на эксплуатационные показатели изделий, позволяющий на примере охлаждаемой лопатки реактивного двигателя по модели с использованием принципа полезности доказать эффективность применения для этого случая прошивки отверстий переменного сечения и профиля комбинированной эрозионно-химической обработкой.

В четвертой главе приведена разработка технологических методов и средств для КМО длинномерных силовых приводов и высоконагруженных магистралей с учетом запросов авиакосмической и атомной энергетической отраслей машиностроения. Изложена процедура проектирования технологии КМО с использованием эффективных сочетаний механических и физико-технических воздействий с упрочнением типовых объектов машиностроения. Построен алгоритм проектирования инструмента с возможностью преодоления ограничений по доступу инструмента в зону обработки.

Разработаны технологические режимы комбинированной обработки внутренних поверхностей трансмиссий, где приведена методология управления комбинированным процессом по параметру силы продольной подачи инструмента, возможности изменения скорости продольного перемещения инструмента за счет выравнивания свойств поверхностного слоя перед упрочняющим элементом после удаления припуска под анодную обработку. Это требует уточнения приведенных в работе экспериментальных коэффициентов, в частности K_c , которые в рассматриваемом процессе устанавливаются индивидуально экспериментальными методами.

Сила P_c продольного протягивания инструмента при комбинированной обработке находится по зависимости

$$P_c = \pi d_k P_k l_k (\alpha + \mu), \quad (4)$$

где d_k -наружный диаметр упрочняющего элемента инструмента (Рис. 3) после увеличения его рабочего диаметра до расчетной величины перемещением внутреннего конуса; P_k -контактное

давление инструмента на обрабатываемую поверхность; l_k – ширина контактной поверхности упрочняющего элемента, где $l_k = \pi d_k - n l_n$ (n – число продольных разрезов на упрочняющем элементе; l_n – ширина разреза в нормальном сечении без учета угла наклона разреза к оси инструмента); α – угол заборного конуса упрочняющего элемента, радиан; μ – коэффициент трения скольжения между упрочняющим элементом и упрочняемой поверхностью в жидкой среде.

В зависимости 4 контактное давление инструмента

$$P_k = \beta \sigma_s \left\{ \ln m + \frac{2r_0}{l_k} \left[\frac{\pi \mu k_\sigma}{4(ar_0)} F_2 + F_1 \left(\frac{0,43}{(ar_0)} \cdot \frac{m-1}{m} - 0,7\mu(ar_0) F_3 \right) \right] \right\}, \quad (5)$$

где

$$F_1 = \frac{(m^2 + 1) / (2m^2) - \mu k_\sigma [1 - (m-1) / \ln m]}{1 + \mu (ar)^2 (m-1)}$$

$$F_2 = \frac{\ln m - (m-1)^2}{m \cdot \ln m}$$

$$F_3 = (m+1) \cdot \ln m - 2(m-1)$$

Здесь: r_0 – внутренний радиус отверстия в заготовке после чистовой его обработки анодным удалением припуска перед упрочнением; r – внутренний радиус концевой части упрочняющего элемента инструмента; σ_s – удельное сопротивление материала заготовки пластическому деформированию; m – соотношение в заготовке наружного диаметра $D_{нар}$ к внутреннему $d_{вн}$ для основной части трубы ($m = D_{нар} / d_{вн}$); β – угол действия давления упрочняющего элемента относительно нормали к упрочняемой поверхности ($\beta = 0,1-0,12$ радиан).

В зависимости (4) одним из расчетных параметров процесса упрочнения при КМО является контактное трение, которое зависит от свойств материала заготовки и учитывается через коэффициент μ , величина которого для высоколегированных сталей составляет 0,10-0,15, а для базового материала Ст45 0,07-0,09. Величина натяга под упрочнение установлена в диапазоне 0,05-0,08 мм на сторону, что значительно больше, чем при дорновании и объясняется тем, что измененный слой заготовки перед упрочнением удален анодным процессом и исходный наклеп практически отсутствует.

Разработаны технологии комбинированной обработки электродом-щеткой (ЭЩ), созданной по изобретению при использовании металла с эффектом памяти формы, что позволило достичь требуемой шероховатости места упрочнения детали 0,63-1,25 мкм, обеспечить точность обработки в пределах 0,1-0,2 мм. При этом износ концов пучков ЭЩ не превышает 10 % от их массы относительно снятого обрабатываемого материала. Средний наклеп поверхностного слоя детали составил 12-16 %. После комбинированной обработки магистрали ее усталостная долговечность возросла в 1,3-1,5 раза, что документально подтверждено в работе. Разработана технология упрочнения труднодоступных замыкающих мест сопряжения сборочных участков с использованием метода обкатки. Обоснован метод и созданы защищенные патентами новые средства автоматизации для выполнения операций упрочнения пластической деформацией.

В пятой главе приведены результаты комплексных испытаний материалов после их комбинированной обработки с упрочнением и научное обоснование возможностей их применения для повышения ресурса при эксплуатации перспективных изделий авиакосмической и энергетической атомной отраслей машиностроения.

Проведенными испытаниями доказана обоснованность применения метода производственной технологичности при назначении физико-технических воздействий и механического пластичного упрочнения для обеспечения возможностей повышения качества, ресурса, межремонтного периода и восстановления работоспособности продукции, в том числе в единичном и мелкосерийном производстве.

По результатам проведенных испытаний подтверждена эффективность изученных вариантов пластического упрочнения материалов, используемых в наукоемких отраслях

машиностроения, в том числе для объектов производства, имеющих ранее труднопреодолимые ограничения для осуществления технологических операций.

Подтверждены технико-экономические достоинства примененных КМО с упрочнением для выполнения ремонтно-восстановительных операций, создавших доказательства для назначения обоснованного ресурса и открывших возможность повышения качества перспективных изделий на последующий период выпуска продукции, в том числе серийного производства.

Заключение по работе

С учетом требований к условиям эксплуатации авиакосмической и энергетической техники на базе критериальной оценки технологического потенциала и возможностей физико-технических воздействий с принятыми ограничениями создана система управления выбором и назначением мероприятий для расширения технологических возможностей комбинированных методов обработки на примерах из авиакосмической и энергетической отраслей машиностроения. Система охватывает наиболее уязвимые для нарушения работоспособности изделий высоконагруженные наукоемкие силовые приводы транспортных машин, гидравлические магистрали атомных электрических станций и осуществляется по установленным закономерностям комбинированными методами обработки с упрочняющими технологиями путем эффективного воздействия на наиболее нагруженные концевые и стыковочные участки длиномерных систем с возможностью повышения их ресурса и межремонтного периода до уровня не ниже, чем всего изделия по состоянию современного развития технологической науки и средств технологического оснащения в машиностроении с реальным достижением высоких технико-экономических показателей в период эксплуатации объектов.

В результате анализа исследований можно сделать выводы о том, что:

1. Выполнены исследования механизма и проведено моделирование процедуры назначения воздействий, режимов обработки с упрочнением материалов, что позволило достичь заданного ресурса всего изделия и достичь заданного интервала выполнения регламентных работ.

2. Разработаны технологические приемы для снижения негативных воздействий и снятия большинства значимых ограничений при выполнении КМО концевых и стыковочных участков трансмиссий и магистралей.

3. На базе изобретений, научно обоснованного сочетания механического и физико-технических воздействий, выбора, создания, применения, внедрения новых методов и средств технологического оснащения по запросам авиакосмического и энергетического машиностроения расширена база знаний и усовершенствованы методы комбинированной обработки с использованием упрочнения инструментом с переменной геометрией и автоматизированным управлением от сформированной чистовой поверхности детали. За счет этого в процессе эксплуатации только на базовых предприятиях и эксплуатационно-ремонтных изучаемых объектах удалось устранить опасный дисбаланс трансмиссий, вызывающий вибрацию изделий при эксплуатации, на порядок и более снизить трудозатраты, получить реальный, документально подтвержденный, экономический эффект свыше 6,3 миллиона рублей в год. Результат получен в основном за счет сокращения времени простоя изделий на период ремонта, регламентных работ и сокращения в этот период выработки электроэнергии на Нововоронежской атомной станции.

4. Выполнен научно обоснованный анализ конструкций концевых и контактных элементов при неподвижной сборке участков трансмиссий и магистралей на примере исследуемых изделий с технологическими ограничениями, что позволило определить преимущества выбранных физико-технических воздействий и эффективность средств технологического оснащения, сформировать направления исследований по освоению результатов работы в машиностроении и в технологической науке.

5. Выполнена адаптация новых конструкций электродов-инструментов и оборудования к КМО с целью их использования в изучаемых отраслях машиностроения. Получен патент на

автоматизацию процесса упрочнения металлических сочленений магистралей, с которым были ознакомлены отечественные и зарубежные технологи, и который был внедрен в производство на авиакосмических предприятиях и энергетических станциях.

6. Разработаны принципы выбора по критериям технологичности средств технологического оснащения для изучаемой отрасли с рекомендациями по источникам получения требуемой продукции со стороны отечественных изготовителей, что в 1,3 раза позволило сократить трудоемкость изготовления наукоемкой продукции, и создало базу для ускоренного освоения серийного производства изделий.

7. Определен объем, виды исследований и испытаний материалов, достаточный для назначения повышенного более чем в 10 раз ресурса и надежности трансмиссий и магистралей, обработанных КМО с упрочнением. В результате на порядок и более расширен межремонтный период и увеличен ресурс исследуемых объектов.

8. Разработан алгоритм выполнения исследований для пополнения базы знаний по КМО с упрочнением, применение которого позволяет многократно ускорить проведение исследований, намеченных в цели и задачах работы, учесть перспективы и расширить область использования достижений технологической науки и опыта практического использования результатов в промышленности.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. **Уразов, О.В.** Технология и оборудование для комбинированных методов обработки объектов транспортного и энергетического машиностроения / О.В. Уразов // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2025. – Т. 21, № 4. – С. 210-221.

2. **Уразов, О.В.** Процесс отработки технологичности наукоемких изделий машиностроения / О.В. Уразов, С.В. Сафонов, В.П. Смоленцев // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2025. – №.6 (374). – С.55-63.

3. **Уразов, О.В.** Исследование физико-механических характеристик композитных соединений установок АЭС, восстановленных методом поверхностного пластического деформирования / О.В. Уразов, В.Г. Егоров, А.Д. Данилов, ИГ. Дроздов // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2022. – Т. 18, № 3. – С. 124-132.

4. **Уразов, О.В.** Технический комплекс для восстановительного ремонта поверхностных повреждений трубопроводов методом поверхностного наклепа / О.В. Уразов, А.Д. Данилов // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2022. – Т. 18, № 1. – С. 140-146.

5. **Уразов, О.В.** Исследование процесса восстановления поврежденных поверхностей трубопроводов методом поверхностного наклепа / О.В. Уразов, А.Д. Данилов // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2021. – Т. 17, № 5. – С. 126-132.

6. Поваров, В.П. Восстановление свойств металла лопастей циркуляционных насосов методом поверхностной ультразвуковой ударной обработки / В.П. Поваров, **О.В. Уразов**, М.Б. Бакиров, С.С. Пахомов // Конденсированные среды и межфазные границы. – 2017. – Т. 19, № 2. – С. 273-281.

В изданиях, входящих в базу цитирования SCOPUS

7. **Urazov, O.V.** The rolling simulation for cold work metal hardening / **O.V. Urazov**, A.D. Danilov, K.Yu. Gusev // Journal of Physics: Conference Series, 2021., V:2094(4), pp.1-6.

8. **Urazov, O.V.** Technology of nuclear power plant pipelines' joint welds' reconditioning repair by surface cold working method / **O.V. Urazov**, A.D. Danilov, K.Yu. Gusev, P.Yu. Gusev, I.A. Aksenov // AIP Conference Proceedings, 2021, V: 2402, pp. 41-48.

9. Povarov, V.P. Restoration of metal properties of circulation pump blades by the method of surface ultrasonic impact treatment / V.P. Povarov, **O.V. Urazov**, M.B. Bakirov, S.S. Pakhomov, I.A. Belunik // Thermal Engineering, 2017, 64(10), pp. 762–769.

10. **Urazov, O.V.** Results of a preoperational inspection at Unit No 1 of Novovoronezh NPP II / **O.V. Urazov** // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zawedeniy, Yadernaya Energetika, 2017, (3), pp. 142–150.

11. Povarov, V.P. Design and experimental assessment of thermal stratification influence on operational loading of surge line of Novovoronezh NPP, unit No5 / V.P. Povarov, **O.V. Urazov**, M.B. Bakirov, V.I. Levchuk // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zawedeniy, Yadernaya Energetika, 2017, (1), pp. 5–16.

Патенты на изобретение

12. Патент на полезную модель № RU 231708 U1, 06.02.2025, МПК В24В 39/04. / Данилов А.Д., **Уразов О.В.** // Автоматизированное устройство для поверхностного упрочнения зоны повреждения сварных соединений, № 2024132149; заявл. 25.10.2024; опубл. 06.02.2025. Бюл. № 4. – 10 с.

Статьи и материалы конференций

13. **Уразов, О.В.** Проведение ремонта бассейна выдержки энергоблоков №1, 2 Нововоронежской АЭС-2 без дренирования / Новые технологии в научных исследованиях, проектировании, управлении, производстве (НТ-2017): сборнике научных трудов XI Международной научно-технической конференции. Воронеж: ВГТУ, 2017. – С. 135-138.

14. Баранова Ю.А. Средства отображения информации систем технической диагностики проекта АЭС-2006 С ВВЭР-1200 / Ю.А. Баранова, М.Т. Слепов, А.Ф. Громов, **О.В. Уразов** // Электротехнические комплексы и системы управления. – 2014. – № 4. – С. 42-48.

Подписано в печать 21.04.2026 г.
Формат 60x84x16. Бумага для множительных аппаратов
Усл. печ. л. 1,25. Тираж 80 экз. Заказ № ____
ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»
394006, Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84