

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ВОРОНЕЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи



Уразов Олег Владимирович

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

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

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

Научный руководитель: **Сафонов Сергей Владимирович**
доктор технических наук, доцент

Воронеж – 2026

Оглавление

Введение.....	4
Глава 1 Анализ исследований по теме диссертационной работы.....	13
1.1 Конструктивные, производственные и эксплуатационные характеристики типовых объектов исследования.....	13
1.2 Методы комбинированных методов обработки (КМО) с применением физико-технических воздействий.....	27
1.3 Анализ упрочняющих технологий на предмет совместимости с другими воздействиями в КМО.....	30
1.4 Производственная технологичность как инструмент качественной и количественной оценки применимости КМО	38
1.5 Средства технологического оснащения для реализации созданных технологических процессов комбинированных методов обработки.....	40
1.6 Контроль и испытания объектов производства после КМО....	42
Заключение по главе.....	43
Глава 2 Пути и методы решения поставленных задач и достижения поставленной в работе цели.....	45
2.1 Научные гипотезы для решения задач работы.....	45
2.2 Экспериментальное оборудование.....	47
2.3 Средства измерения и испытаний.....	51
2.4 Научно обоснованные методы и устройства для выбора и критериального обоснования методов и средств для КМО...	53
2.5 Алгоритмизация процесса достижения поставленной цели по критерию полезности.....	57
Выводы по главе.....	62
Глава 3 Механизм и моделирование процесса комбинированной обработки с управляемым упрочнением концевых и контактирующих участков конструкций с учетом условий эксплуатации.....	64
3.1 Инструмент и механизм упрочнения.....	64
3.2 Инструмент, механизм обработки, технические средства для чистовой операции с упрочнением участков объектов при ограниченном доступе инструмента.....	69
3.3 Моделирование процесса упрочнения пластическим деформированием.....	72

3.4	Технологические особенности и управление процессом комбинированной обработки (КО) мест стыковки магистралей электродом-щеткой	77
3.5	Алгоритм проектирования комбинированных процессов с учетом специфики работы высокоресурсных узлов отраслевого машиностроения	82
3.6	Моделирование процесса выбора технологических методов	86
	Выводы по главе.....	93
Глава 4	Разработка технологических методов и средств для КМО длинномерных силовых приводов и магистралей с учетом запросов авиакосмической и атомной энергетической отрасли.....	95
4.1	Процедура проектирования технологии КМО с использованием эффективного сочетания механических и физико-технических воздействий с упрочнением для типовых объектов машиностроения.....	95
4.2	Технологические режимы комбинированной обработки внутренних поверхностей трансмиссий.....	98
4.3	Технология комбинированной обработки электродом-щеткой.....	101
4.4	Технология упрочнения труднодоступных мест сопряжения деталей обкаткой.....	102
4.5	Создание средств механизации и автоматизации для выполнения операций пластическим упрочнением.....	107
	Выводы по главе.....	112
Глава 5	Проведение комплексных испытаний результатов применения КМО с упрочнением для научного обоснования повышения качества перспективных изделий авиакосмической и энергетической атомной отраслей машиностроения.....	114
5.1	Обеспечение требуемой твердости поверхностного слоя после упрочнения.....	114
5.2	Остаточные напряжения.....	119
5.3	Усталостная прочность и долговечность изделий.....	120
	Выводы по главе	124
	Заключение.....	126
	Список литературы.....	129
	Приложение 1.....	147
	Приложение 2.....	151
	Приложение 3.....	153

Введение

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 материалов числовых, аддитивных технологий, средств искусственного интеллекта. Применение положительных результатов исследований на всех этапах создания нового объекта или при его восстановлении зависит от научно-обоснованного выбора этапов и сроков разработки продукции. Это стало возможным за счет управления этапами исследований по рекомендациям, полученным на базе расчетов производственной технологичности, путем установления новых закономерностей управления выбором технологических воздействий в комбинированных методах обработки с учетом условий эксплуатации в наукоемком авиакосмическом и энергетическом машиностроении. При проведении научных изысканий учитываются достижения и перспективы развития отраслевой техники, защищенные охранными документами новые способы, устройства, полученные с участием автора работы, и позволяющие в дальнейшем расширить 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 изделиям длинномерных транспортных силовых передач 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 чего перед упрочнением необходимо устранить наследственные явления, свойственные традиционной механической обработке с силовым воздействием инструмента, где операция выполнима только в случае непосредственного силового контакта в зоне обработки обрабатываемой поверхности. Процесс осуществляется при сложных перемещениях инструмента в ограниченном пространстве, например, при плановой или аварийной замене 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, например, в полевых условиях. Совмещение в едином комбинированном технологическом процессе операций выравнивания напряжений и получения заданного наклепа на наиболее нагруженных концевых участках длинномерных деталей 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 на научной базе Воронежского государственного технического университета с использованием производственной и исследовательской базы 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 [120, 80, 87, 116 и др.], бывших стран содружества [126 и др.], и ведущих технически развитых стран мира [157 и др.]. Основные исследования по теме диссертации выполнены в Воронеже [80, 116, 129, 87, 103; 131-133 и др.], Казани [135, 109], Москве [136, 120,], где учтены результаты по управлению качеством, полученные в Ростове-на-Дону [9, 127], Туле [89], Санкт-Петербурге [8], Брянске [31, 124], Волгограде [13], Самаре [6], Уфе [47], а также в Белоруссии [126], Польше, США [157], Китае [49] и в других странах.

Анализ изученных источников показал, что в большинстве случаев авторы остановились на исследовании отдельных воздействий без учета их взаимодействий и изучения механизма совместного протекания процессов с упрочнением опасных зон при работе электродами-инструментами с переменными контуром и параметрами режимов, в том числе при автоматизации процессов для работы в потенциально опасных зонах и в случае ограничений их доступа в зону выполнения операций. Они не могли 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 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 поставленной 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 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 сборных разъемных 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 и частично спроектированы и изготовлены средства технологического оснащения для выполнения экспериментальных исследований, подтверждающих правомерность теоретических расчетов. Такие положения строятся на принципе полезности по методике оценки эффективности вариантов по производственной технологичности. Потребовался новый методический 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 Российской Федерации, 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 с упрочнением непрофилированными электродами-инструментами нежесткой конструкции с выполнением эксплуатационных требований к наукоемким изделиям авиакосмического 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 и автоматических средств 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, что соответствует п. 2 шифра специальности 2.5.5.

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

3. Изучение механизма, теоретическое описание процесса и применение электродов-инструментов с переменным профилем, что соответствует п. 6 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 (Кемерово, КузГТУ, 26 ноября - 2 декабря 2023 г.); 15-й 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 конференция «Наукоёмкие технологии в машиностроении: современные тренды, перспективы развития и опыт подготовки инженерных кадров – 2025» (Крым, Алушта. 8-13 сентября 2025 г.)

Результаты работы прошли проверку и внедрены в АО «Конструкторское бюро химавтоматики» и на ремонтной базе Нововоронежской атомной электростанции, 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, механизм протекания процессов 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, заключения, списка литературы (160 наименований), 42 рисунков, 9 таблиц и 2 приложений. Содержание диссертации изложено на 155 страницах машинописного текста с рисунками, таблицами, приложениями.

Глава 1 Анализ исследований по теме диссертационной работы

1.1 Конструктивные, производственные и эксплуатационные характеристики типовых объектов исследования

Варианты структурных схем сопрягаемых участков приводов и магистралей, многолетний опыт создания, совершенствования, использования, эксплуатации и утилизации транспортных и энергетических систем позволил выделить наиболее эффективные направления научных и прикладных исследований по назначению новых технологических процессов, созданию для этого средств оснащения, учитывающих требования технологичности конструкций и методов их изготовления в производстве.

Наиболее высокий уровень производственной технологичности достигнут в наукоемких изделиях авиакосмической отрасли и в атомной энергетике. Результаты выполненных отечественных [116, 136, 129 и др.], зарубежных [126 и др.] работ обосновали правомерность оперативного использования их в качестве базы для расширения зоны применения в машиностроении, в первую очередь в исследуемых здесь типовых наукоемких элементах [120, 129, 75, 47 и др.] транспортного и энергетического машиностроения, приведенных в таблицах 1.1 и 1.2.

Приведенные в таблице 1.1 длинномерные разъемные сборные силовые приводы из цельных металлических трубных заготовок с равномерным или импульсным вращательным движением используются в транспортных машинах, в том числе в летательных аппаратах, и в бытовой технике с возможностью ускоренного освоения в серийном и крупносерийном производстве. Ограничивает их использование высокая вероятность возникновения концентраторов напряжений, снижающих ресурс, затрудненный подход с инструментом к месту обработки концевых участков, где в заготовках они осажжены вдоль оси.

Таблица 1.1 – Типовые объекты изготовления и характеристики технологичности для совершенствования приводов в транспортном машиностроении

Вариант объекта	Объект исследования		Ограничения при традиционной обработке в машиностроении	Рекомендации по производственной технологичности	Ожидаемые результаты от отработки технологичности
	Название	Назначение			
1	2	3	4	5	6
I	Разъемные силовые приводы из цельных металлических трубных заготовок (рис. 1,а)	Длинномерные сборные разъемные трубчатые реверсивные приводы с равномерным движением в транспортных системах наукоемких машин	Ограниченный доступ инструмента к месту обработки концевых участков труб после продольной осадки. Образование переходных участков в местах осадки с формированием локальных очагов напряжений из-за нарушений точности участков. Формирование при чистовой механической обработке винтовых канавок от перемещения инструмента в отверстия, вызывающих местную концентрацию напряжений и снижающих усталостную прочность материала привода. Низкий показатель принципа полезности по трудоемкости и затратам.	Разработать КМО внутренней поверхности по бесконтактной схеме с одновременной чистовой подготовкой поверхности и ее упрочнение с управлением по разработанным моделям.	Выравнивание величины остаточных напряжений до величины не ниже аналогичного показателя всего объекта обработки. Повышение ресурса безотказной работы и межремонтного цикла и ресурса привода в условиях его эксплуатации с возможностью повышения качества и работоспособности перспективных изделиях. Расширение области использования КО на изделия с ограниченным доступом инструмента в зону обработки. Повышение уровня полезности мероприятия.

Продолжение таблицы 1.1

<p>II</p>	<p>Разъемные силовые приводы из цельных металлических труб и полужакрытых концевых участков, соединенных сваркой (рис. 1,б)</p>	<p>Применение в транспортных системах машин и бытовой технике с возможностью освоения в серийном и крупносерийном производстве</p>	<p>Высокая вероятность образования концентраторов напряжений на концевых участках, вызывающих ограничения по ресурсу применения приводов, необходимость прерывания в работе привода при снижении межремонтного цикла и ресурса объекта. Необходимость задела ремонтного задела для транспортного средства. Сложность восстановления объекта в полевых условиях. Пониженный уровень производственной технологичности.</p>	<p>Усилить входной контроль получаемых концевых участков с использованием предлагаемой системы оценки уровня производственной технологичности и применение КМО с упрочнением места соединения наконечников с трубами. По оценке на этапе контроля обосновать необходимость в выборе или разработке инструмента и оборудования для КО, в том числе участков с ограниченным доступом инструмента</p>	<p>Повышение качества и уровня технологичности и приобретаемых наконечников путем конкурсного отбора продукции, в том числе по результатам усталостных испытаний, проводимых на разрабатываемом оборудовании инструментом КМО мест соединения для повышения ресурса объекта. Достигнутое сокращение сроков запуска новых изделий в серийное производство.</p>
-----------	---	--	--	--	---

Здесь формируются очаги напряжений, нарушается точность профиля. Возникают винтовые канавки от перемещения инструмента при расточке, что приводит к разрушению этих участков отверстий и снижает усталостную прочность материала. При оценке технологичности снижается технологический показатель.

В качестве рекомендаций предлагается разработать и использовать КМО по бесконтактной схеме с одновременной чистовой подготовкой поверхности и ее управляемым упрочнением на заданную величину. В результате достигается выравнивание величины остаточных напряжений до величины не ниже

аналогичного показателя всего объекта обработки в условиях его эксплуатации, особенно в создаваемых изделиях.

В таблице 1.1, п. II показан объект, имеющий полузакрытые концевые участки (рисунок 1.1, б; 1.2, а), приобретаемые на стороне или изготавливаемые у себя по серийной технологии. Здесь требуется запас деталей для ремонта и восстановления привода, что затрудняет выполнение регламентных и восстановительных работ в полевых условиях и вызывает понижение уровня производственной технологичности. Предлагается повысить качество и требования к контролю концевых участков приводов. Для этого 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.

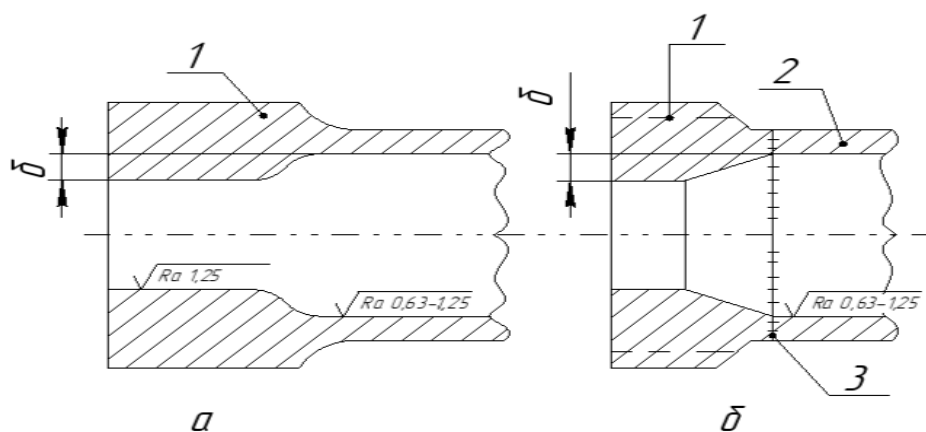


Рисунок 1.1 – Концевые участки силовых приводов трансмиссий

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 1.1 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 рассматривается в 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 на рисунке 1.2 конструкции редуктора современного вертолета.

Анализ кинематики перераспределения и передачи силового вращения от редуктора к приводам, приведенным на рисунке 1.2, однозначно доказал, что вероятность разрушения концевых участков значительно вероятнее, 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.

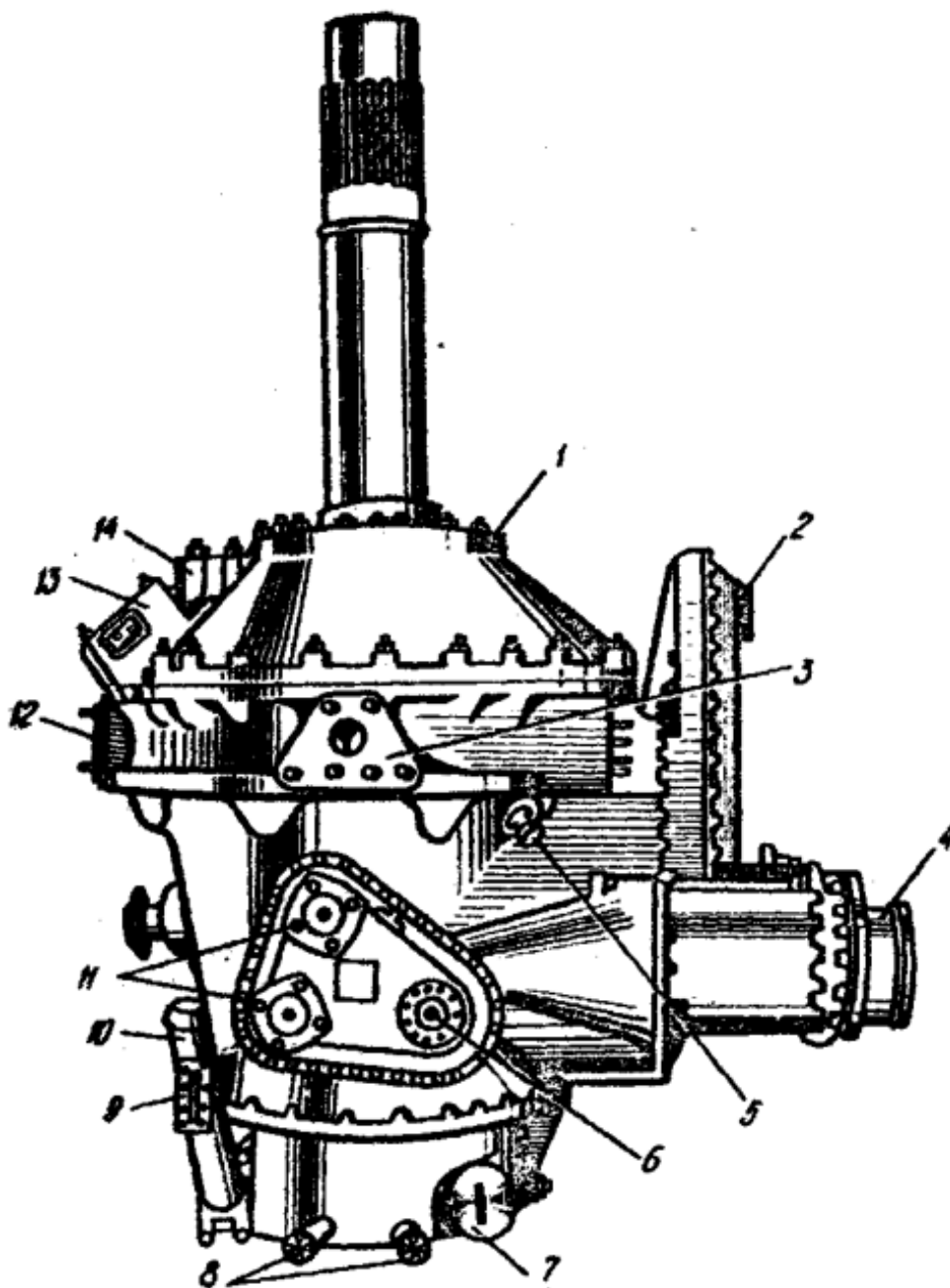


Рисунок 1.2 – Редуктор вертолета с распределенным выводом приводов для обслуживания изделия

- 1 – фланец крепления направляющей автомата перекоса; 2 – фланец привода вентилятора; 3 – фланец крепления лапы подредукторной рамы; 4 – фланец подсоединения двигателя; 5 – датчик замера давления масла в редукторе;
- 6 – привод компрессора; 7 – масляный фильтр; 8 – пробки-сигнализаторы или магнитные пробки; 9 – масломерное стекло; 10 – заливная горловина;
- 11 – приводы насосов; 12 – фланец крепления лапы подредукторной рамы;
- 13 – фланец крепления гидросилителей; 14 – фланец крепления рычага общего шага автомата перекоса

В таблице 1.2 приведены типовые объекты изготовления и характеристики технологичности для обеспечения герметичности высоконагруженных магистралей, учитывающих условия эксплуатации на атомных энергетических станциях, а также в двигателях и системах летательных аппаратов и в общем машиностроении. Анализ таблицы 1.2 (варианты III-IV) показывает, 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 с минимальными сроками простоя оборудования.

Анализ данных таблицы 1.2 и рисунка 1.3 показал, что конструктивные особенности магистралей и требуемые для повышения ресурса технологические мероприятия близки к исследуемым для трансмиссий, поэтому они соответствуют поставленным в работе задачам исследований. В большей степени это относится к созданному и создаваемому технологическому оборудованию для комбинированных методов обработки объектов III варианта (таблица 1.2, рисунок 1.3, а), 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 контроля концевых участков магистралей при выполнении регламентных и ремонтных работ.

Таблица 1.2 – Типовые объекты изготовления и характеристики технологичности герметичных магистралей

Вариант объекта	Объект исследования		Ограничения при традиционной обработке в машиностроении	Рекомендации по производственной технологичности	Ожидаемые результаты от отработки технологичности
	Название изделия	Назначение изделия			
1	2	3	4	5	6
III	Однослойные размерные герметичные магистрали с концевыми участками единого или различного сечения, соединенным и с магистралью неподвижной неразъемной сборкой	Для создания технологичных магистралей, работающих при постоянных и импульсных нагрузках, с гарантируемым ресурсом и заданным межремонтным периодом, с возможностью выполнения операций при минимальных сроках простоя оборудования, особенно в потенциально опасных зонах атомных установок	Снижение ресурса концевых участков магистралей за счет мест сопряжения концевых элементов с магистралями. Ограничение предельных характеристик и ресурса длинномерных магистралей. Опасность нарушения герметичности и пожароопасность при работе двигателей авиакосмической техники. Для атомных станций дополнительно возникает опасность негативного воздействия на персонал облучения. Создание местных сопротивлений течению рабочих сред в местах соединения концевых участков с магистралями.	Изготовление концевых участков по серийной технологии для ускорения и удешевления операции сборки. Использование методов ускоренной оценки усталостной прочности мест соединения концевых участков с магистралями. Применение комбинированных методов обработки с выдавливаемыми и регулируемыми наклепом мест соединения. Обоснование назначения методов и средств для реализации в основном и ремонтном производстве базы для повышения уровня производственной технологичности	Повышение уровня технологичности магистралей. Повышение межремонтного периода магистралей. Улучшение условий труда обслуживающего персонала. Создание технологических методов и средств для организации обслуживания магистралей в условиях их использования в авиакосмической и атомной энергетической отрасли. Экономия средств на обслуживание герметичных магистралей за счет привлечения внешних исполнителей для изготовления концевых участков на по серийным технологиям с обеспечением заданного уровня качества изделий.

Продолжение таблицы 1.2

<p>Ш</p>	<p>Однослойные размерные герметичные магистрали с концевыми участками единого или различного сечения, соединенным и с магистралью неподвижной неразъемной сборкой</p>	<p>Для создания технологичных магистралей, работающих при постоянных и импульсных нагрузках , с гарантируемым ресурсом и заданным межремонтным периодом, с возможностью выполнения операций при минимальных сроках простоя оборудования, особенно в потенциально опасных зонах атомных установок</p>	<p>Снижение ресурса концевых участков магистралей за счет мест сопряжения концевых элементов с магистралями. Ограничение предельных характеристик и ресурса длинномерных магистралей. Опасность нарушения герметичности и пожароопасность при работе двигателей авиакосмической техники. Для атомных станций дополнительно возникает опасность негативного воздействия на персонал облучения. Создание местных сопротивлений течению рабочих сред в местах соединения концевых участков с магистралями.</p>	<p>Изготовление концевых участков по серийной технологии для ускорения и удешевления операции сборки. Использование методов ускоренной оценки усталостной прочности мест соединения концевых участков с магистралями. Применение комбинированных методов обработки с выдавливаемыми и регулируемыми наклепом мест соединения. Обоснование назначения методов и средств для реализации в основном и ремонтном производстве базы для повышения уровня производственной технологичности</p>	<p>Повышение уровня технологичности магистралей. Повышение межремонтного периода магистралей. Улучшение условий труда обслуживающего персонала. Создание технологических методов и средств для организации обслуживания магистралей в условиях их использования в авиакосмической и атомной энергетической отрасли. Экономия средств на обслуживание герметичных магистралей за счет привлечения внешних исполнителей для изготовления концевых участков на по серийным технологиям с обеспечением заданного уровня качества изделий.</p>
----------	---	--	---	--	---

Продолжение таблицы 1.2

<p>IV</p>	<p>Однослойные и многослойные магистральные из толстостенных труб</p>	<p>Обеспечение качества и герметичности магистралей в условиях использования неразъемной сборки для транспортировки опасных, агрессивных и вредных рабочих средств, протекающих при высоких давлениях с возможностью импульсных нагрузок. Обеспечение ресурса и межремонтного периода эксплуатации магистралей в ракетных двигателях и атомных электрических станциях.</p>	<p>Возможность появления концентраторов напряжения и поверхностных дефектов в местах соединения участков магистралей, особенно расположенных в труднодоступных местах. Сложность обеспечения равномерного наклепа и требуемого качества поверхностного слоя в местах соединения участков. Необходимость остановки агрегатов атомной электростанции на период восстановления работоспособности магистралей и удлинения сроков испытаний двигателей транспортной техники. Увеличение потерь на снижение выпуска энергии и уровня производственной технологичности систем.</p>	<p>Применение КМО непрофилируемым инструментом в форме щетки с оригинальными параметрами и режимами обработки. Разработка технологических приемов и средств оснащения с выравниванием свойств, повышение межремонтного периода и ресурса сборных магистралей атомных электростанций и двигателей. Повышение уровня технологичности и герметичности магистралей.</p>	<p>Создание и применение новых, на уровне изобретений методов и средств обработки и контроля конечных элементов магистралей с автоматизацией процессов. Снижение времени простоя при выпуске продукции. Повышение качества, надежности, ресурса изделий, создание базы для повышения уровня квалификации персонала.</p>
-----------	---	--	---	---	---

Анализ таблицы 1.2 (варианты III-IV) показывает, 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 с минимальными сроками простоя оборудования.

Анализ данных таблицы 1.2 и рисунка 1.3 показал, что конструктивные особенности магистралей и требуемые для повышения ресурса технологические мероприятия близки к исследуемым для трансмиссий, поэтому они соответствуют поставленным в работе задачам исследований. В большей степени это относится к созданному и создаваемому технологическому оборудованию для комбинированных методов обработки объектов III варианта (таблица 1.2, рисунок 1.3, а), 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 контроля концевых участков магистралей при выполнении регламентных и ремонтных работ.

Отмеченные в таблице 1.2 (рисунок 3,б) ограничения, особенно значимы для IV варианта объектов исследований, поскольку время пребывания персонала в потенциально опасной зоне работающего изделия ограничено возможностью получения травм и профессиональных заболеваний.

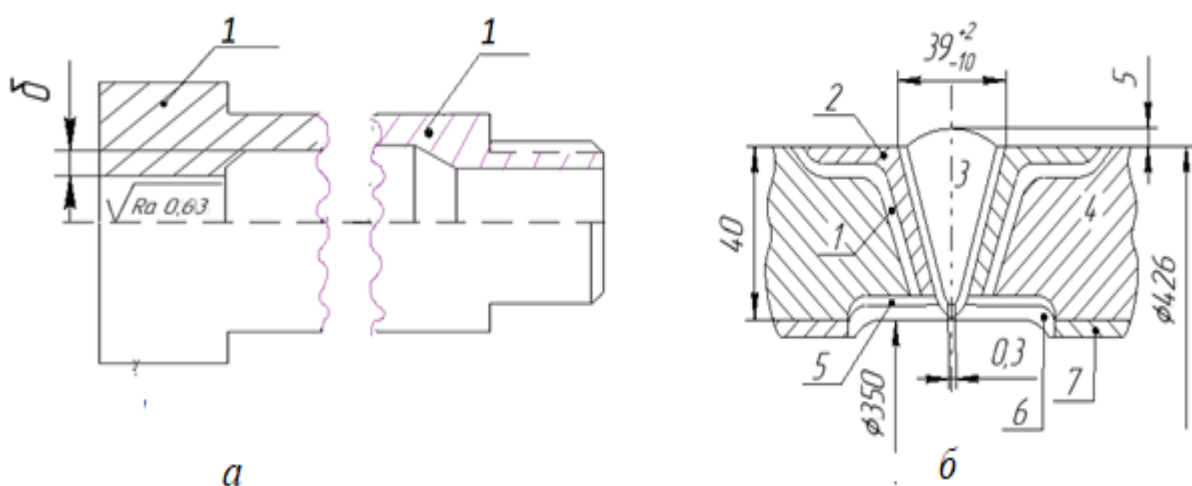


Рисунок 1.3 – Концевые участки труб (1) для соединения участков в герметичных магистральных:

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 – элементы для защиты внутренней поверхности трубы от капель расплава при сборке. 7 – внутренняя труба

На всех объектах после обработки имеются [131, 132] 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 которых композитные швы в магистральных атомных электростанций в значительно большей степени подвержены возникновению технологических и эксплуатационных дефектов 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 способом путем упрочнения деталей и обеспечения 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 этой проблемы является одной из задач для проведения восстановительных операций без остановки технологического процесса, устраняющего 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 [75]) автоматических устройств позволяет частично решить проблему сокращения пребывания персонала в опасных зонах атомных станций. Это в дальнейшем нашло применение при изготовлении и испытании ракетных двигателей, но в настоящее время требуется продолжение и расширение области выполнения работ в этом направлении. Общим ограничением для использования традиционных методов обработки высоконагруженных приводов и магистралей является требование по выравниванию силовых усилий на режущие кромки механического инструмента и устранение винтообразных углублений после резания, особенно на внутренней поверхности труб и в местах сопряжения концевых участков. Эти углубления становятся концентраторами напряжений, что снижает усталостную прочность и особенно нежелательно для приводов, работающих под действием перегрузок и импульсных воздействий.

Разработанные средства КМО [109] позволяют выполнять удаление припуска даже на труднодоступных для электродов-инструментов участках в длинномерных магистралях и приводах с переменным сечением без механического воздействия на деталь с перемещением инструмента только вдоль ее оси. На эксплуатационные характеристики соединения оказывает

определяющее воздействие поверхностный наклеп, многократно повышающий механические характеристики поврежденных поверхностей магистралей, что установлено на примере эксплуатации композитного сварного соединения дыхательного трубопровода энергоблока АЭС с ВВЭР-1000, работающего с теплоносителем первого контура при давлении 16 МПа и температуре 600° К. Приведенный на рис.1.3,б трубопровод, выполнен трубами Ø 426x40 мм из углеродистой стали перлитного класса 10ГН2МФА с аустенитной наплавкой (плакирующий слой) из стали 08Х19Н10Г2Б, что допускается для трубопроводов такого типа на атомных станциях.

На ресурс соединения оказывает влияние радиус гибов – около 1700мм, овальность, которая в местегиба ограничена 8 %, а утонение стенки не допускается более 10 % от размера.

Расплавляемая вставка для сварных швов выполняется инструментом Св-04Х19Н11М3 по ГОСТ 2246 прямоугольного сечения 4-0,3 x 2±0,1мм.

Для обеспечения надежности и герметичности соединения сварку выполняют по следующей технологии: первый слой наносят электродами ЭА-395/9, второй – ЭА-400/10Т (шифры установлены ГОСТ РФ), затем производится первичная и вторичная внутренняя наплавка. Далее идет формирование кромок, стыковка, облицовка корня материалом 04Х19Н11М3 и заполнение шва электродом ЭА-400\10Т. Для использования КМО необходимо выяснить возможность совместной обработки материалов детали и присадочного элемента, т.к. технологические показатели, в том числе режимы протекания процесса, качество изделия, зависят от обрабатываемости каждого компонента в месте стыковки участков. При проведении упрочнения зоны шва (вариант IV в таблице 1.2) обработку мест сопряжения магистралей требуется проводить после сборки, когда доступ инструмента в каналы прекращается. Тогда эффективным методом комбинированной обработки (КО) остается наружная зачистка места соединения и его упрочнение непрофилированным электродом-щеткой [30] за счет подводимой тепловой энергии и импульсов от соударений периферии инструмента с обрабатываемой поверхностью, подготовленной к упрочнению

электрохимическим воздействием в той же операции. Электрические режимы такого метода приведены в [30].

1.2 Методы и технологические возможности комбинированных методов обработки (КМО) с применением физико-технических воздействий

КМО включают несколько взаимосвязанных воздействий, в том числе физико-технические процессы. Каждый из них на современном уровне изучения обладает своими технологическими возможностями, совместимостью в едином процессе, но может иметь характеристики, вызывающие сложности и ограничения при использовании КМО, в том числе совместно с управляемым упрочнением поверхностного слоя детали.

При проектировании комбинированных методов обработки следует учитывать возможности механических (М), как правило, традиционных, детально изученных, воздействий, тепловых (Т), химических (Х) и некоторых их сочетаний (магнитоимпульсный (МИИ) и др.), формирующих уже освоенные в промышленности методы обработки (эрозионно-химический и др.).

Виды обработки и их технологические возможности приведены в таблице 1.3.

В таблице 1.3 рассмотрены основные способы КМО, их структура, технологическое применение. При технико-экономической оценке эффективности проектируемых процессов следует учитывать не только сочетания воздействий, но и закономерности обоснования выбора базового варианта, что может осуществляться по рассмотренным в работе законам управления процессом на базе производственной технологичности, где с учетом эксплуатационных условий, в нашем случае требований предприятий авиакосмической и энергетической отраслей, необходимо научно доказать совместимость присоединяемых физико-технических методов к базовому варианту, показанному в начале перечня видов воздействия в таблице 1.3.

Таблица 1.3 – Технологические показатели и область использования
освоенных КМО

№ П/ П	Способ комбинирован- ной обработки	Основные виды воздей- ствий	Технологические показатели			Преимущест- венная область использования в машиностроении
			Ско- рость удаления припус- ка мм ³ /мин	Точность обработ- ки, кавалитет	Шерохо- ватость Ra (Rz), мкм	
1	Эрозионно- химический	Т + Х + М	(2 - 3) 10 ³	6 – 8	0,63 – 1,25	Получение отверстий, в том числе в труднодоступных местах, полостей. любого профиля в металлических материалах. Чисто вая обработка с упрочнением каналов
2	Электро- абразивная	Т + М + МИм	50 - 100	5 – 6	0,32 – 0,63	Чистовая обработка труднообработы- ваемых материалов
3	Обработка электродом - проволокой	Т + Х + М	До 180 мм ² /мин	3 – 5	0,63 – 2,5	Разделение металлических материалов, изготовление пазов, отверстий универсальным инструментом
4	Обработка электродом - щеткой	Т + Х + М + МИм + МПс	(1 - 2) 10 ³	6 – 9	0,63 – 2,5	Чистовая обработка универсальным инструментом, за- чистка и упрочнение преимущественно го наружного поверхностного слоя преимущественно металлических изделий

Продолжение таблицы 1.3

5	Безабразивное сопряжение поверхностей	X + M + T + (МИм)	50 - 100	5 – 6	0,32 – 1,25	Получение износостойких запорных устройств с исключением шаржирования поверхностного слоя
6	Криогенно-эрозионное упрочнение	T + X + M	не изменяется			Повышение ресурса и сроков безотказной работы без изменения при обработке геометрических размеров детали
7	Электрохимический наложением ультразвукового луча	X + Мим + М	10 - 50	6 - 7	0,32 – 0,63	Изготовление точных отверстий и углублений в прессованных заготовках
8	Несвязанными гранулами	МИм + X + М	10 - 50	8 - 9	1,25 – 2,5	Чистовая размерная обработка полостей и углублений
9	Гидроабразивный в электрическом поле	МИм + X	До 3000	5 - 7	0,63 – 2,5	Чистовое и объемное формообразование поверхностей в металлических материалах
10	Магнитно-абразивный	M + X + МИм	10 - 50	7 - 8	0,32 – 0,63	Чистовая обработка поверхностей деталей
11	Нанесение покрытий	Сочетание различных воздействий от 2 до 6	-	7 - 8	0,63 – 5	Изменение и улучшение эксплуатационных свойств деталей с покрытиями

В основе комбинированных методов обработки, приведенных в таблице 1.3, лежат известные механические, тепловые, химические, магнитные, радиационные

воздействия, где источником энергии на технологические цели служат электромагнитные факторы процесса, создаваемые электрическим током.

В качестве базового воздействия в КМО в большинстве случаев назначается механическое (М) в форме постоянного и импульсного варианта. Его совмещение с физико-техническими воздействиями образует большой потенциал для повышения эффективности КМО и расширения области использования рассматриваемого вида обработки, в том числе в труднодоступных для инструмента местах рабочей зоны.

1.3 Анализ упрочняющих технологий на предмет их совместимости с другими воздействиями в КМО

1.3.1 Термические воздействия имеют место при использовании импульсных разрядных воздействий тока на поверхность, где наряду с термической обработкой происходит локальное расплавление металла, образование лунки и упрочнение ее окрестностей. Здесь наблюдается труднопреодолимое ограничение стабильности даже при использовании такого воздействия в комбинированном процессе: попытка увеличения глубины нагрева для упрочнения обязательно вызывает нарастание глубины лунки, что увеличивает шероховатость, ограниченную допуском на чистоту поверхности. В комбинированном процессе рассматриваемый недостаток снижают регулированием режимов обработки, проводя операцию одним инструментом сначала на черновом режиме, а затем на чистовом.

В случае использования электрода-щетki [30] упрочнение происходит механическим воздействием (см. ниже), где средством управления служит частота вращения инструмента, напряжение тока на электродах, прижим пучков проволоки к детали. Метод слабо изучен, но перспективен для применения при упрочнении, т.к. снимает многие ограничения по доступу в зону обработки.

1.3.2 Разновидностью электроэрозионного процесса является **электроимпульсная размерная обработка**, в основном турбинных лопаток

реактивных двигателей [144], которая была изучена в 50 годах прошлого века российскими учеными (в их числе – лауреат Ленинской премии СССР Митяшкин Д.З.). Этот комбинированный метод позволяет получить глубокую закалку поверхностного слоя, но из-за большой энергии импульса дает возможность выполнить только черновую операцию. В последующие годы по мере развития технологической науки метод потерял актуальность и был заменен другими способами, в том числе комбинированными.

1.3.3 К тепловым методам относится **поверхностная закалка с упрочнением газопламенным нагревом**, которая после охлаждения (в основном водой) в результате химических преобразований создает аустенизацию поверхности стали. При этом в микроструктуре поверхностного слоя образуется твердый мартенсит. Ограничением использования метода упрочнения при КМО является необходимость выполнения условия, что стандартная сталь должна содержать достаточное количество углерода и других компонентов для получения желаемой твердости.

1.3.4 Термическая обработка с упрочнением нашла применение при **закалке токами высокой частоты** [82]. Это универсальный способ, который позволяет осуществлять как общее равномерное, так и локальное поверхностное упрочнение путем генерирования тепла внутри детали при воздействии электромагнитного поля, величина которого регулируется количеством витков в катушке, рабочей частотой, потребляемой мощностью переменного тока и характеристиками обрабатываемой детали.

К ограничениям для использования метода в КМО относятся: сложность и высокая стоимость оборудования, негативное воздействие на персонал, возможность нарушения процесса обработки сильными импульсными магнитными полями, отсутствие изученных технологических режимов для обработки деталей сложной геометрической формы и состава материала, ограниченный доступ поля в зону обработки для получения требуемого равномерного нагрева.

1.3.5 Лазерная закалка для упрочнения поверхности. Лазерная поверхностная термическая обработка [20, 144] широко используется для упрочнения локальных участков деталей машин из стали и чугуна. Тепло, выделяемое при поглощении лазерного излучения, регулируется с целью предотвращения плавления и поэтому часто используется для селективной аустенизации областей поверхности, которые превращаются в мартенсит в результате быстрого охлаждения за счет теплопередачи в объем заготовки. Этот метод обеспечивает избирательное упрочнение черных металлов на глубину для стали в диапазоне от 0,3 до 1,3 мм, и получение твердости до 60 HRC. Лазерная обработка имеет преимущества перед электронно-лучевой закалкой в том, что она не требует вакуума, позволяет расширить диапазон геометрических поверхностей под закалку, может автономно управляться, хорошо совместима в КМО, но энергоемка и сложна в управлении совместно с электрическими воздействиями. Лазерное упрочнение поверхности повышает износостойкость материалов, способности доставлять контролируемое количество энергии в нужные области и может увеличивать усталостную прочность за счет сжимающих напряжений, возникающих на поверхности детали.

Глубина упрочнения обычно не превышает 2,5 мм. Для стали с низкой прокаливаемостью она чаще находится в пределах до 0,25 мм в мягких сталях и до 1,3 мм в среднеуглеродистой стали.

Ограничением применения лазера в КМО является большая стоимость энергии и оборудования, требование свободного доступа луча к месту протекания процесса, что не всегда осуществимо, например, при обработке внутренних поверхностей.

1.3.6 Применение электроэрозионных покрытий [83, 84, 144 и др.] металлами, обладающими повышенной прочностью твердостью износо-и термостойкостью.

Актуальной задачей современного машиностроения является совмещение в одном методе получения требуемых физико-технических и эксплуатационных свойств материалов. Применение для изготовления подобных деталей в качестве

материалов нержавеющей стали, меди, сплавов на основе титана и хрома усложняют и удорожают объекты изготовления. Представляется эффективным иметь с требуемыми эксплуатационными свойствами только поверхностный слой в зоне работы изделия.

Большее внимание конструкторов при проектировании деталей привлекают алюминиевые сплавы, обладающие преимуществами не только в области авиационной техники, но и у других потребителей. Они позволяют значительно сократить массу и потери материалов, легко обрабатываются резанием, КМО. Однако у них эксплуатационные характеристики часто не удовлетворяют заказчика. В первую очередь это относится к тепло- и износостойкости, защите от коррозии. Такими свойствами обладает доступный и дешевый серый чугун, но большая разница между материалами по массе, температуре плавления ограничивает их совместное применение без использования покрытия.

К методам нанесения металлических покрытий относятся: гальванический, термодиффузионный, металлизация напылением, погружение в расплавленный металл или горячий метод и термомеханический метод – плакирование. Часть из них находит применение в КМО, другие представляют перспективный объект исследования.

Для достижения необходимых эксплуатационных показателей деталей и получения требуемого качества поверхностей, в производстве необходимо применять ряд дополнительных технологических приемов и операций, что значительно удлиняет цикл изготовления и увеличивает себестоимость выпускаемой продукции, но решить проблему формирования качественных покрытий не может, и, как правило, не обеспечивает требуемый ресурс и надежность современных изделий. Обеспечение требуемых эксплуатационных свойств, предъявляемых к деталям оснастки, применяемой при КМО, возможно лишь при получении покрытий, обладающих высокой стойкостью к воздействию агрессивных сред и электрическому току большой плотности, прочностью сцепления и высокой твердостью. При этом сформированное покрытие должно быть беспористым, равномерным по толщине и с низкими остаточными напряжениями. Такие эксплуатационные свойства в ряде случаев могут быть достигнуты применением метода электроэрозионного нанесения покрытий.

Приведенные в [83] результаты показали, что созданный процесс КМО деталей из алюминиевых сплавов позволяет получить на поверхности изделия

упрочняющие покрытия из чугуна с высокой адгезионной стойкостью, обеспечивающие хороший токоподвод к зоне обработки, а также высокую защиту от разрушения и износа при эксплуатации КМО таких деталей и падает возможность достичь значительного энергосбережения.

Анализ приведенных материалов дает основания утверждать, что в дальнейшем для расширения области использования биметаллических покрытий потребуются специальные исследования с комплексом испытаний и доказательствами их эффективности в машиностроении.

Развитием этого метода можно считать способ электроконтактной приварки металлического покрывного элемента из металла с необходимыми свойствами. Однако для получения деталей с требуемым поверхностным слоем нужна подготовка поверхности в виде дополнительных операций качественной очистки, обезжиривания, исправление и уточнение базовых поверхностей, а также включение трудоемких операций последующей чистовой механической обработки, ухудшающей технико-экономические показатели КМО.

1.3.7 Упрочнение методами поверхностного пластического деформирования

Метод поверхностного деформирования представляет собой обработку, при которой пластически деформируется только поверхностный слой изделий. При этом в нем формируются сжимающие напряжения и достигаются полезные структурные свойства, в частности повышение сопротивлению усталости металла.

Для методов поверхностного пластического деформирования [31, 129] характерно образование востребованной мелкозернистой структуры поверхности металла, отсутствие термических дефектов, возможность улучшения качества поверхности.

По характеру контакта инструмента и изделия варианты упрочнения этим методом разделяются на статические и ударные. В статических методах (выглаживание, накатка и др.) процесс упрочнения происходит за счет действия постоянного давления по мере перемещения инструмента.

В процессе обкатывания и раскатывания механический шарик или ролик оказывает давление на поверхность изделия, достаточное для пластической

деформации ее поверхности и подповерхностной зоны с созданием слоя до 1-2 мм с сжимающими остаточными напряжениями [109, 120]. Показаны пути, увеличения срока службы изделий при усталостных нагрузках путем деформационного упрочнения и снижения шероховатости поверхности [9, 109, 135].

Обычно раскатывают внутренние цилиндрические и фасонные поверхности. Процесс осуществляется различными способами в зависимости, в основном, от формы поверхности, на котором он должен быть проведен.

Выбор и назначение режимов упрочнения в КМО на базе исследований процесса производится на этапе отработки производственной технологичности с использованием параметров раскатывания при механической обработке и использованием продольного перемещения инструмента в отверстии с вращением заготовки или без этого ее движения. Учитывается влияние режимов КМО на состояние остаточных напряжений, деформационное упрочнение и получаемую шероховатость поверхности в зависимости от обрабатываемого материала. В процессе моделирования при расчете силы раскатывания граничным условием является ее значение, при котором происходит разрушение поверхностного слоя. В качестве инструментов используются шарики или ролики. Шары могут быть установлены жестко и с возможностью вращения.

Шаровой инструмент выполняют из подшипниковой стали и других высокопрочных материалов [9]. Часто их применяют для обработки поверхностей сложного профиля [109, 120].

Инструмент для раскатывания и обкатывания изготавливается, как правило, из керамики или карбида вольфрама.

Такой метод успешно совмещается с электрическими процессами формообразования и результаты его использования полезны для формирования поверхностного слоя внутренних поверхностей при КМО. К преимуществам статических методов упрочнения также относится стабильность процесса и возможность получения высокого качества поверхности.

Такие сведения раскрыты в таблице 1.3 работы, и материалы рекомендуются к применению для внутренних поверхностей концевых участков деталей на рисунке 1.1 и 1.3 в составе инструмента для комбинированной обработки.

1.3.8 Ударные методы упрочнения

К ударным методам относится дробеструйная, ультразвуковая и другие виды обработки. Они характеризуются импульсным воздействием инструмента или среды на поверхность изделия.

Преимущество ударных методов – это: возможность получения более высокой степени упрочнения, обработка поверхностей сложной формы.

Эффективным методом воздействия при импульсном ударном упрочнении в составе КМО стала дробеструйная обработка с наложением электрического поля, исследованная в работе [38]. Этот процесс создает защитный слой сжимающих остаточных напряжений, который возникает из-за пластических деформаций поверхности, вызванных бомбардировкой небольшими частицами, называемыми гранулами. В результате такой бомбардировки создается равномерный слой остаточных сжимающих напряжений, препятствующих образованию трещин.

В случае использования в качестве инструмента электрода-щетки [30] ударное действие обеспечивает периферия инструмента за счет центробежных сил, возникающих при его вращении.

При ударном механическом упрочнении в случае использования КМО удалось совместить температурное и механическое воздействие в едином процессе и при применении электрода-щетке добиться положительных результатов при обработке наружных участков из разнородных металлических материалов [30], что показано в таблице 1.3 и на рисунке 1.3 «б».

1.3.9 Ультразвуковое упрочнение.

Ультразвуковое упрочнение в КМО является воздействием, обеспечивающим деформационную обработку наружной и внутренней

поверхности механическими ударами свободными или связанными элементами комбинированного инструмента с частотой 18–24 кГц и амплитудой 15–30 мкм.

Процесс обеспечивает создание сжимающих остаточных напряжений пластической деформацией обрабатываемой поверхности и снижение их концентрации путем выравнивания микропрофиля.

Механизм ультразвукового упрочнения [120, 144] осуществляется от генератора, который создает стоячую волну в преобразователе. Она усиливается в концентраторе, поступает на инструмент, создающий пластическую деформацию в обрабатываемой зоне.

Оптимальные условия обработки выбирают, изменяя перечисленные выше параметры, а также величины продольной и относительной подачи за один период колебаний.

В качестве инструмента используют стальные закаленные шары либо выглаживатели, выполненные из алмаза или других сверхтвердых материалов. Шары могут быть установлены жестко и с возможностью вращения.

При ультразвуковом упрочнении рабочая часть инструмента может иметь закругленный наконечник, к которому прикладываются статическая и ударная сила с заданной колебательной скоростью и амплитудой [144]. Статическая сила может быть приложена также с помощью пружины. Ударное воздействие создается ультразвуковым преобразователем и концентратором. При этом инструмент перемещают по поверхности обрабатываемого объекта.

На рисунке 1.4 приведены варианты крепления в инструменте рабочих элементов со сферическим профилем ударника.

Материалы, приведенные на рисунке 1.4, могут оказаться полезными при проектировании инструмента для КО с упрочнением внутренних поверхностей деталей при ограниченном доступе инструмента в зону окончательной обработки.

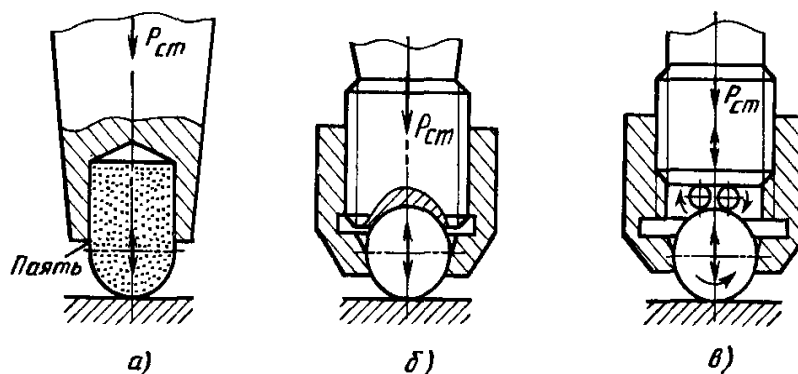


Рисунок 1.4 – Варианты крепления рабочей части инструмента:
а, б – жесткое, в – с обеспечением качения

Главным фактором, ограничивающим применение ультразвукового метода является необходимость применения инструмента небольшой массы, как правило, с одним ударником, что резко снижает производительность процесса. Кроме того применяемые устройства сложны в изготовлении и эксплуатации, быстро изнашиваются, имеют низкий коэффициент использования электрической энергии и пока не нашли широкого применения в машиностроении.

1.4 Производственная технологичность как инструмент качественной и количественной оценки применимости КМО.

Под технологичностью понимают степень соответствия конструкции изделия требованиям производства и эксплуатации. Производственная технологичность является частью общего показателя всей конструкции и применяется в процессе освоения объектов в производстве на всех стадиях, начиная с анализа, опытных образцов, до серийного выпуска и сопровождения в период эксплуатации. Процедура выполняется учеными технологической науки, инженерно-техническим и производственным персоналом предприятий с участием служб приемки, эксплуатации, ремонта техники, структур безопасности, утилизации, технико-экономического и организационного профиля. Критерием оценки эффективности проведения производственной технологичности в

машиностроении являются критериальные параметры, свойственные отрасли машиностроения, где базовые требования принадлежат наукоемкой продукции авиакосмического и энергетического направления. В [87] для качественной и количественной оценки исследуемых объектов предложен критерий полезности. При этом в последнем случае требуется учесть и выполнить ограничения по использованию КМО с упрочнением при выполнении работ в потенциально опасных для персонала зонах атомных станций [132, 133] и ремонтных операций для авиационной техники в полевых условиях [42, 136], где используются слабо механизированные и автоматизированные приемы единичного производства.

В процессе отработки технологичности конструкторы-разработчики при проектировании новых наукоемких изделий широко используют базу знаний по созданию и использованию аналогичных объектов в машиностроении страны и анализируют международный опыт. На этой стадии правильность принимаемых решений обосновывается путем моделирования и испытания головных изделий на имеющихся и создаваемых макетах. Полученный результат становится средством управления для повышения эксплуатационных показателей. Однако даже при положительных результатах испытаний трудно утверждать, что в конструкции задействован полный потенциал реализации технологических возможностей по повышению качества на таком этапе создания объекта. Это потребует для последующего освоения изделия при серийном производстве. Необходимо обосновать изменение требований к новому изделию, при необходимости доказать потребность в расширении сроков выпуска опытных образцов, внести предложения по объемам финансирования продукции. В процессе отработки производственной технологичности выявляется необходимость разработки новых способов обработки. Здесь могут успешно применяться комбинированные методы обработки с использованием в качестве воздействий физико-технических методов и упрочняющих технологий. На этом этапе главным экспертом становится технолог, который на базе достижений технологической науки [87, 129, 136, 103] планирует технологические мероприятия по достижению требуемых условий создания и эксплуатации изделий. Тогда одной из главных целей исследований

становится повышение качества изделий, показанное в работе на примерах наукоемких объектов авиакосмического и энергетического машиностроения.

1.5 Средства технологического оснащения для реализации созданных технологических процессов комбинированных методов обработки

Применение спроектированных комбинированных процессов с использованием физико-технических воздействий требует, как правило, приобретения или создания специального оборудования, инструмента и технологической оснастки. Анализ этого вопроса и рекомендации по производственной технологичности приведены в [109, 116, 120, 136].

1.5.1. Оборудование для комбинированной обработки: станки этого класса в большинстве случаев создают с модульной компоновкой, а собирают преимущественно из типовых узлов. Такая структура включает следующие модули: базовые узлы (станины, приводы, средства управления и др.); специфичные узлы для реализации электрических физико-технических воздействий, которые могут осуществляться в средах, агрессивных для материала оборудования и нежелательных для средств автоматики и управления. Однако многие элементы конструкции могут входить в состав специального оборудования при его компоновке, что, несомненно, удешевляет и ускоряет оснащение.

На этапе отработки производственной технологичности по методике [103] можно обосновать достоинства и выявить недостатки специальных станков, ограничить область их использования. провести технико-экономический анализ на стадиях выпуска продукции с использованием КМО, учетом обеспеченности производственным персоналом, выполнением мероприятий по технике безопасности.

Результаты анализа применимости станков для КМО при обработке рассматриваемых изделий показаны в [120].

1.5.2 Выбор и разработка **электродов-инструментов** для КМО с наложением полей:

Электроды-инструменты (ЭИ) для КМО выбирают, назначают, проектируют, комплектуют и изготавливают, как правило, в зависимости от вида обработки, станка, геометрии, характеристик и типоразмера детали. Здесь учитываются многие другие факторы, но они не являются определяющими. Из опыта предыдущего периода точность рабочей части ЭИ закладывается в документации на один квалитет выше, чем у обрабатываемой поверхности, что соответствует примерно 6...8 квалитету ГОСТ. Шероховатость поверхности рабочей части практически не влияет на показатели качества детали, но она способна вызвать увеличение межэлектродного зазора и нарушение точности получаемого профиля. Шероховатость рабочей поверхности обычно ограничена $R_a = 2,5$ мкм.

Основными достоинствами ЭИ для КМО каналов с упрочнением являются: снижение силы его протягивания, т.к. перед калибрующим элементом осуществляется удаление наклепанного слоя и устраняется сила резания для перемещения бесконтактной зоны действия анодного растворения, открывается возможность обработки труднодоступных и полужакрытых участков, экономии энергии на осуществление процесса упрочнения.

Такой вариант осуществим, если ЭИ имеет нежесткую конструкцию. При использовании в качестве инструмента дисковой щетки одновременно с удалением припуска и наклепом можно осуществить скругление кромок и удалять заусенцы, что при традиционной технологии требовало включения в процесс дополнительной операции и нередко выполнялось вручную. При КМО в зависимости от степени наклепа при упрочнении детали пучки электрода-щетки выполняют из металлической (стальной, медной, латунной) проволоки различной жесткости с диаметром 0,2-0,5 мм.

1.5.3 Станочные технологические **приспособления:** при создании приспособлений приходится учитывать требования, вытекающие из условий обработки деталей с подачей электрического тока и протеканием процесса в агрессивных средах, способных вызвать коррозию и разрушение материалов.

Кроме того часть конструкции может потребовать защиты от анодного растворения путем применения диэлектриков, стойких к рабочим средам и действию электрического поля.

Для приспособлений чаще используют конструкционные стали с антикоррозионным покрытием (лаки, краски, кадмирование, цинкование и др.), или нержавеющие сплавы. В последние годы, кроме того, начали применять титановые, медные сплавы, чугун, алюминий (как правило, с покрытием). Из диэлектриков используют капролон, стекло и углепластики, а для подвода тока применяют винтовые прижимы из металлов к зачищенным площадкам заготовок. При больших подводимых токах (J , А) приходится рассчитывать минимальную площадь (F , мм²) контакта между заготовкой и приспособлением. Она рассчитывается по формуле:

$$F = \frac{J}{j}, \quad (1.1)$$

где j – плотность тока в местах его подвода к заготовке (А/мм²).

Границей использования приспособления является предельная плотность технологического тока, которая не допускает перегрева металла в заготовке. В рассматриваемых случаях КО сила тока, как правило, не превышает предельных значений, поэтому токоподводы приспособлений не вызывают сложностей при их использовании.

Значительная часть приспособлений для КМО стала частью комплектации станков, где в частности используют имеющиеся на станке силовые приводы. В отдельных случаях проектируются и изготавливаются специальные (главным образом универсальные быстро переналаживаемые) приспособления.

1.6 Контроль и испытания объектов производства после КМО.

Операции по испытанию материалов и контролю после КМО не имеют принципиальных отличий от традиционных приемов и для их применения используются стандартные методы и средства, часть которых представлена в диссертации.

Дополнительно требуются приборы для контроля напряжения и силы технологического тока, параметров системы подачи рабочей среды, ее очистки, характеристики пневматических узлов, если они применяются в оборудовании; измерительные устройства для настройки положения ЭИ и контроля положения базовых участков; устройства для защиты исполнителей от воздействия тока, жидкостей и газов под высоким давлением, для удаления вредных и взрывоопасных компонентов (сероводорода, аммиака, хлора, водорода и др.).

Заключение по главе

1. Анализ типовых конструкций рассматриваемых объектов наукоемкого производства доказывает, что с учетом условий эксплуатации наибольшая концентрация напряжений имеет место на концевых участках длинномерных магистралей и местах стыковки элементов при неразъемной сборке, что ограничивает общий ресурс изделия. Поэтому постановка задачи выбора их для упрочнения при КМО является обоснованной.

2. Применение на современном этапе развития технологической науки в наукоемких производствах КМО с пластичным и ударным упрочнением является наиболее эффективным средством повышения качества, надежности и ресурса силовых трансмиссий и магистралей высокого давления, используемых в авиакосмическом и энергетическом машиностроении, что отражено в одной из задач, решаемой в работе.

3. Опыт использования механизма производственной технологичности дает основания утверждать, что она составляет доказательную базу для обоснованного выбора наиболее эффективных и перспективных технологических воздействий с учетом изменения предельных возможностей процесса в желаемую сторону путем управления процессом с применением теории производственной технологичности при обработке деталей с различным доступом инструмента к месту выполнения операции.

4. Применение новых методов и средств технологического оснащения КМО открывает возможность преодоления ограничений при проведении операций формообразования с упрочнением для силовых приводов и магистралей, что позволяет решить проблему повышения ресурса и надежности изделий на перспективу.

5. Результаты проведения испытаний материалов для изготовления трансмиссий и магистралей комбинированными методами с упрочнением позволяют обосновать перспективы повышения качества и установить границы для назначения предельного ресурса, допустимого с учетом условий эксплуатации изучаемых наукоемких изделий.

Анализ состояния вопроса дает возможность научно обосновать направления исследований для достижения цели, поставленной в работе.

Глава 2 Пути и методы решения поставленных задач и достижения поставленной в работе цели

2.1 Научные гипотезы для решения задач работы

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 разработки 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 процессом создания комбинированного процесса с использованием физико-технических воздействий может осуществляться по критерию полезности, представленным в [103] для отработки 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 может быть выполнена только снаружи. Здесь наилучший доступ к месту стыковки имеет непрофилированный инструмент в форме электрода-щетki, но для его использования требуется научное обоснование механизма упрочнения, создание режимов обработки и параметров инструмента. Управление процессом может осуществляться по закономерностям, близким к волновой теории ударно-динамического метода, приведенного в [9], с учетом различной обрабатываемости присадочных материалов и их составов в местах стыковки при электрических воздействиях в ЭМО, 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 на базе для сталей $2 \cdot 10^7$ циклов, что обоснованно 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.

2.2 Экспериментальное оборудование

При выполнении оценки правомерности полученных результатов использовалось действующее [109] и вновь созданное оборудование для подтверждения полученных результатов и возможности их применения для изучаемых объектов машиностроения. На рисунке 2.1 показана автоматизированная опытно-промышленная установка с адаптированным управлением режимами при обработке наружных поверхностей металлических деталей дисковым электродом-инструментом в форме щетки.



Рисунок 2.1 – Установка для обработки деталей электродом-щеткой

Установка на рисунке 2.1 имеет широкий диапазон изменения режимов обработки, включая частоты вращения инструмента до 15000 оборотов в минуту и предельную силу тока до 300 А.

Для изучения процесса упрочнения методом пластической деформации при постоянном контактном давлении без внешнего нагрева заготовки была использована установка, показанная на рисунке 2.2.



Рисунок 2.2 – Установка для исследования параметров упрочнения пластической деформацией поверхностного слоя

Установка на рисунке 2.2 снабжена стандартным блоком числового программного управления металлорежущего станка и обеспечивает обоснование режимов упрочнения при КМО, а также возможность сочетания параметров комбинированного процессов в едином блоке управления:

- а) 3-координатной силовой рамы (штатива);
- б) персонального компьютера;
- в) блока управления;

г) программного обеспечения и программных профилей настроек персонального компьютера.



Рисунок 2.3 – Установка для отработки параметров пластической деформации при проектировании режимов комбинированной обработки

Жесткая силовая рама установки выполнена в форме штатива с возможностью перемещения инструмента в 3 координатах. Конструкцию установки поясняет рисунок 2.4. На основании 1 на прямоугольных шариковых направляющих с предварительным натягом 3 установлен стол продольного перемещения 4. На силовой раме 2 на прямоугольных шариковых направляющих с предварительным натягом 5 установлена каретка поперечного перемещения 6, где на прямоугольных шариковых направляющих с предварительным натягом 7 смонтирован стол вертикального перемещения 8. Перемещение стола 4, каретки поперечного движения 6 и стола вертикального перемещения 8 осуществляется посредством шариковинтовых пар 9 с помощью шаговых двигателей 10. На столе 8 на кронштейне 11 установлен инструмент для упрочнения пластической деформацией в форме ролика 12.

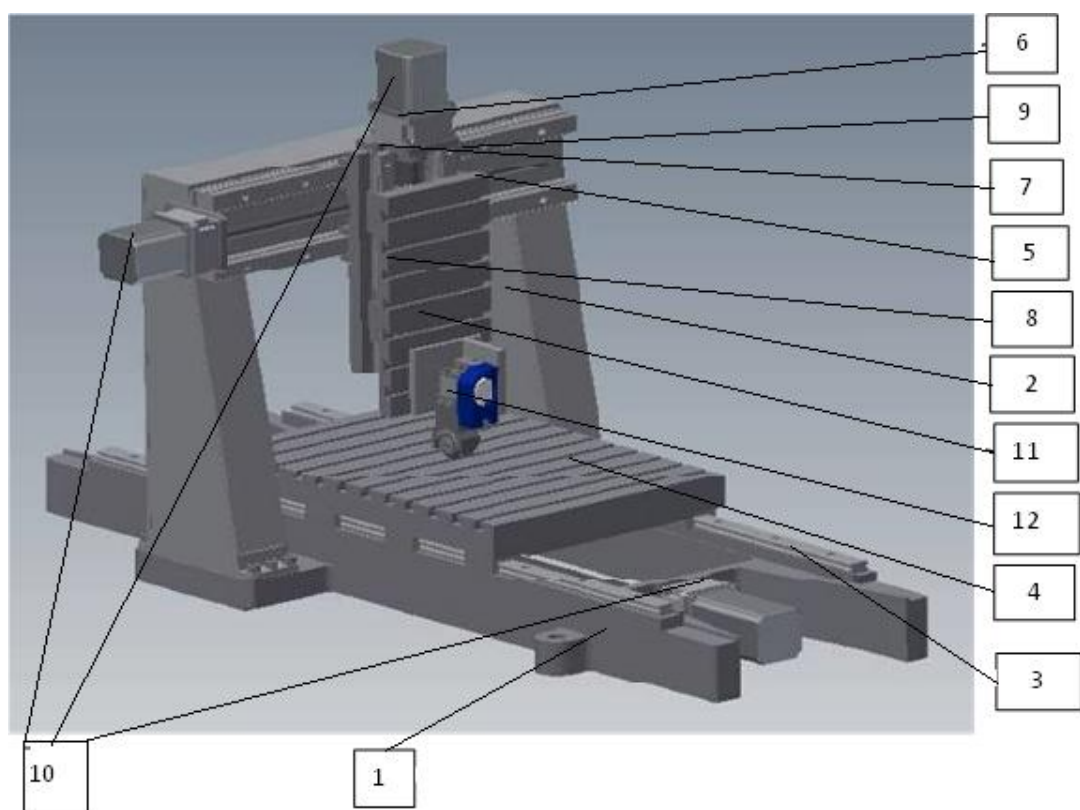


Рисунок 2.4 – Конструкция силовой рамы установки

1 – основание; 2 – рама; 3 – направляющая рейка; 4 – стол продольного перемещения; 5 – блок вертикального перемещения; 6 – каретка поперечного перемещения; 7 – направляющая; 8 – стол вертикального движения; 9 – шариковинтовые пары; 10 – шаговые двигатели; 11 – кронштейн; 12 – инструмент

Элементы перемещений защищены от попадания стружки двойной защитой (сальники + скребки), а ходовые винты дополнительно к этому защищены жалюзи. Максимальный статический момент (X, Y, Z) на ходовых винтах до 50 кг·см². Продольная подача 500 мм. Поперечная подача 370 мм. Вертикальная подача 160 мм. Масса 250 кг.

Вертикальная часть представляет собой направляющую, закрепленную на основании уголковым элементом. Она включает суппорт, фланец с концентрическим Т-образным пазом, проставку фланца, поворотный кронштейн крепления шпиндельной головки, узел ее быстрой подачи.

К суппорту через проставку крепится устройство для проведения операции пластической деформации, где в качестве инструмента установлен ролик, (рисунок 2.5).

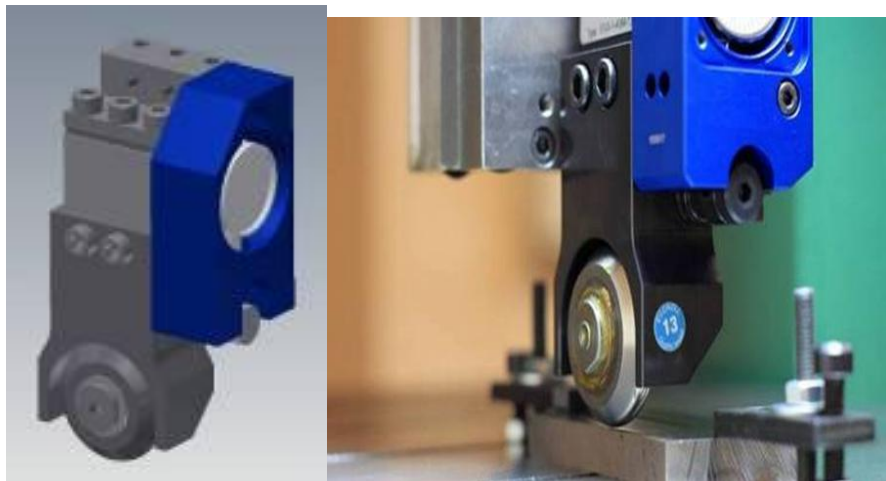


Рисунок 2.5 – Устройство для выполнения пластического упрочнения.
а) – конструкция; б) – внешний вид

По результатам проведенных исследований были установлены исходные данные для моделирования процесса упрочнения методом управляемой статической деформации поверхностного слоя; определения режимов упрочнения в комбинированной обработке: диапазона рабочих нагрузок – $P = 2\ 500 \div 3000\text{Н}$; скорости обкатки при перемещении инструмента – 1500 мм/мин и др.

2.3 Средства измерения и испытаний

2.3.1 Измерения остаточного **смещения** поверхностного слоя при пластической деформации выполнялись на 3D цифровом микроскопе Keyence VHX-600 (рисунок 2.6), с информацией на компьютере что позволило качественно выполнять анализ изображений. Использовались увеличения от 20 до 5000 крат с регулированием процесса при помощи моторизованного столика с компьютерным управлением, где микроскоп (рисунок 2.6) дает возможность получить трехмерное изучение объектов 3D профиля.



Рисунок 2.6 – Цифровой микроскоп VHX-600

2.3.2 Измерение микротвердости для оценки изменения состояния металла в зоне обработки по глубине проводили в соответствии с ГОСТ 9450-76 на полуавтоматическом минитвердомере Zwick ZHV10 (рисунок 2.7), который позволяет измерять твердость по Виккерсу, Кнупу и Бринеллю при нагрузках от 10 грамм до 10 кг. Испытания проводили путем вдавливания в образец алмазного наконечника в форме правильной четырехгранной пирамиды Виккерса под действием нагрузки в 200 грамм. Время выдержки под нагрузкой для полного прохождения процесса пластической деформации составляло 12 секунд. Измерение отпечатка проводилось оптическим методом на экране компьютера с последующим переводом размера отпечатка в единицы твердости с применением программного обеспечения твердомера.



Рисунок 2.7 – Твердомер Zwick ZHV10

2.3.3 Анализ микроструктуры приповерхностных слоев после ударного упрочнения проводили после изготовления образцов на высокоточном отрезном станке Labcut 250FM с водяным охлаждением. Операция выполнялась путем запрессовки их в оправку на автоматическом прессе Labpress 40P под давлением 90 Бар при температуре 450 К в специальной порошкообразной фенольной смоле. Далее проводилось шлифование образцов на шлифовально-полировальном станке Labpol 8-12 Auto 3/6 с водяным охлаждением в автоматическом режиме при стандартных параметрах с использованием шлифовальных абразивных бумажных дисков SiC диаметром 300 мм зернистостью от P120 (120 мкм) до P1200 (15 мкм) в несколько этапов. Все оборудование уникальное, было приобретено из США от фирмы Extec Corp.

2.4 Научно обоснованные методы и устройства для выбора и критериального обоснования методов и средств для КМО

2.4.1 Для измерения механических характеристик металлов после КМО с пластическим упрочнением применялся метод **инструментального индентирования**.

В основе метода лежит процедура вдавливания жесткого индентора в испытуемый материал с непрерывной записью значений глубины и силы вдавливания. Процесс выполняется по ГОСТ Р 8.748.

Наряду с определением твердости поверхностного слоя при использовании шарового индентора он может быть использован для оценки параметров диаграммы «напряжение – деформация» испытуемого материала и для измерения поверхностных остаточных напряжений в исследуемых металлических материалах.

Технология использования метода инструментального индентирования включает непрерывную автоматизированную регистрацию процесса вдавливания шарового индентора в испытуемый материал, что ускоряет и уточняет параметры испытаний. В ходе проведения процесса записывается диаграмма вдавливания,

представляющая собой зависимость нагрузки на индентор от глубины внедрения индентора в исследуемый материал. В качестве средства проведения измерений использовался автоматизированный прибор (рисунок 2.8) для измерения механических характеристик металлов по диаграмме вдавливания ТЕСТ-5У (РФ).



Рисунок 2.8 – Прибор для измерения механических характеристик металлов по диаграмме вдавливания

2.4.2 Метод измерения **остаточных напряжений** по результатам сверления отверстий

Метод сверления отверстий (рассверливания) основан на измерении изменения напряжений (деформаций), вызванных получением отверстий в поверхностях, имеющих остаточные напряжения. Измерения производятся либо розетками тензорезисторов, наклеиваемых на поверхность материала, либо методом спекл-интерферометрии. Метод сверления является одним из наиболее широко используемых методов определения остаточных напряжений. Метод часто относится к полуразрушающим, т.к. объем извлекаемого материала относительно невелик и возникающие при испытаниях повреждения могут быть устранены.

Определение остаточных напряжений [129] методом рассверливания, предложенного Соуэттом и Ванкромбрюгге, проводится по технологии испытаний, включающей следующие операции:

1. Наклейку на поверхность исследуемого образца специальной розетки тензорезисторов типа приведенной на рисунке 2.9.
2. Подключение тензорезисторов к считывающему оборудованию.
3. Позиционирование оси сверла с центром розетки тензорезисторов. Фиксирование позиции сверла при нулевой глубине сверления.
4. Сверление отверстия при ступенчатом увеличении глубины с записью показаний тензорезисторов на каждом из этапов сверления.
5. Определение распределения остаточных напряжений одним из возможных методов обработки полученных данных.

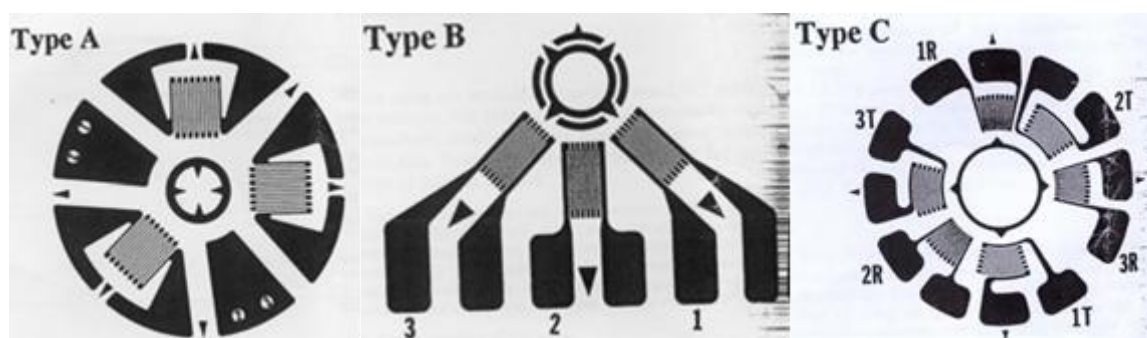


Рисунок 2.9 – Типовые виды розеток тензорезисторов, используемых в методе рассверливания

Особенности использования розеток на рисунке 2.9 рассмотрены в главе 5 работы при решении задач 4 и 5 работы, для чего при проведении экспериментов показания с тензодатчиков записывались как в процессе каждого из этапов сверления, так и после вывода сверла из отверстия на каждом из этапов для получения точных данных без влияния погрешностей сверильной установки. Для измерения диаметра, глубины и эксцентриситета отверстия использовался цифровой микроскоп VHX-600.

2.4.3 Испытания на **циклическую прочность** мест стыковки участков трансмиссий и магистралей неподвижным соединением.

Для проведения испытания на циклическую прочность изготавливалось два вида образцов соединений: полномасштабные и корсетные, вырезанные из зоны стыковки (рисунок 2.10).



Рисунок 2.10 – Образцы для циклических испытаний

Образцы на рисунке 2.10 были обработаны методом пластического воздействия по единому режиму, где использовался упрочняющий инструмент при различной нагрузке в случае использования одного, а в отдельных случаях двух проходов. Тогда:

1. Первый проход осуществляется с нагрузкой инструмента от 2450 до 2900 Н со скоростью 1600 мм/мин.

2. Второй проход – с нагрузкой от 2450 до 2900 Н со скоростью 1600 мм/мин, но со смещением относительно первого прохода на величину половины подачи (0,1 мм).

После обработки методом пластической деформации образцы проходили испытания на длительную циклическую прочность по отраслевому стандарту «Обоснование прочности оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок», где используется укороченная база для испытаний $3 \cdot 10^4$ - $3 \cdot 10^5$ циклов.

Они выполнялись на универсальных машинах 1249УРС-2/30000, 1864УРС-2/30000 и 1254УРС-10/30000, которые предназначены для испытания на усталость образцов конструкционных материалов в симметричном и асимметричном цикле при постоянстве заданных напряжений или деформаций. Машины работают в автоколебательном режиме, в их состав входят: испытательная секция, пульт управления, усилитель мощности и насосная установка, а также электропечь и термокриокамера. Для создания циклических нагрузок используется электромагнитный силовой возбудитель, который обеспечивает требуемую частоту нагружения.

2.5 Алгоритмизация процесса достижения поставленной цели по критерию полезности

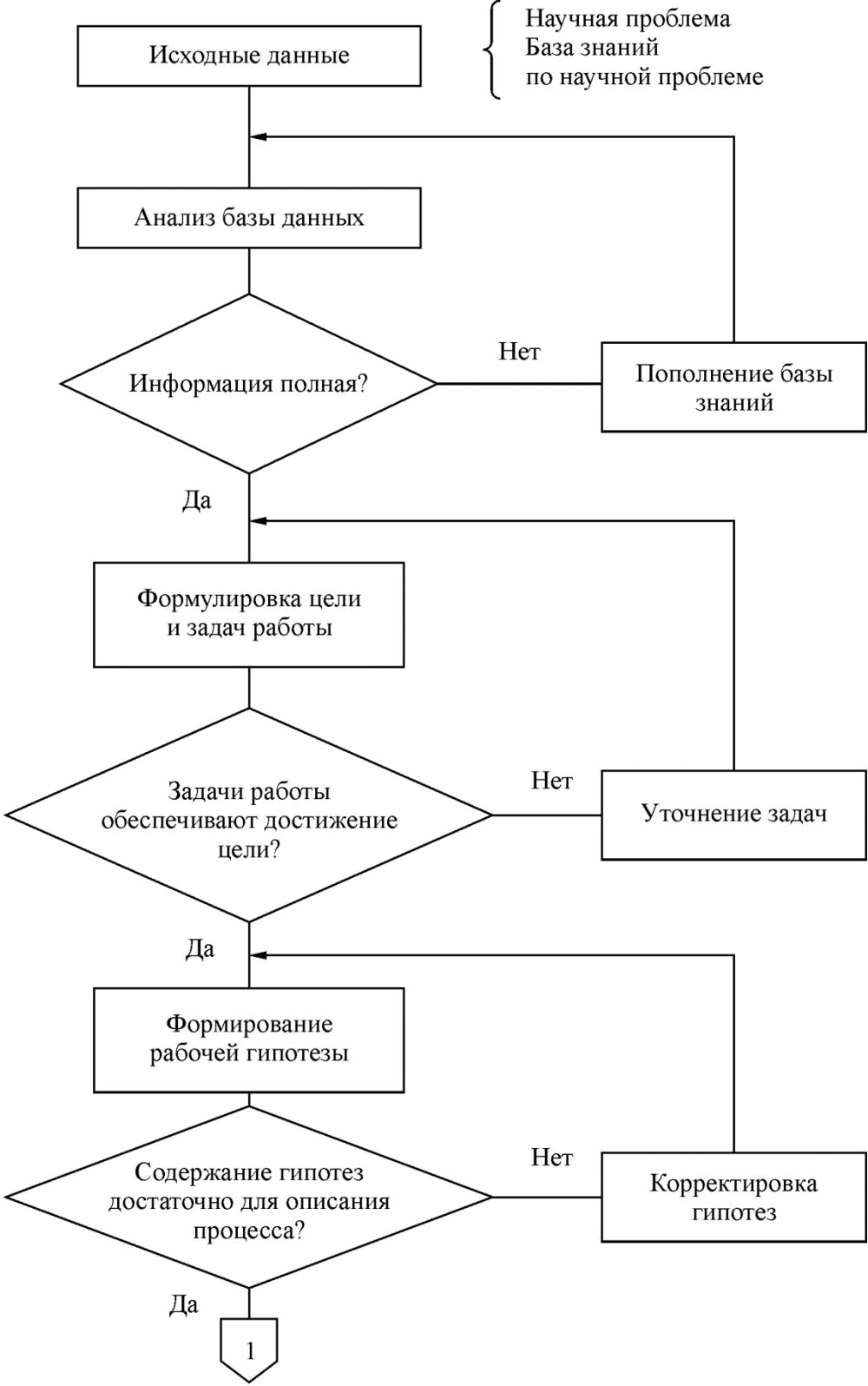
В алгоритме (рисунок 2.11) раскрыта система использования в работе предложенного в [87] принципа полезности для реализации программы решения поставленных задач и достижения цели работы, что позволяет сократить сроки обоснования и целесообразности назначения вида воздействий в комбинированном технологическом процессе для получения требуемого технологического результата.

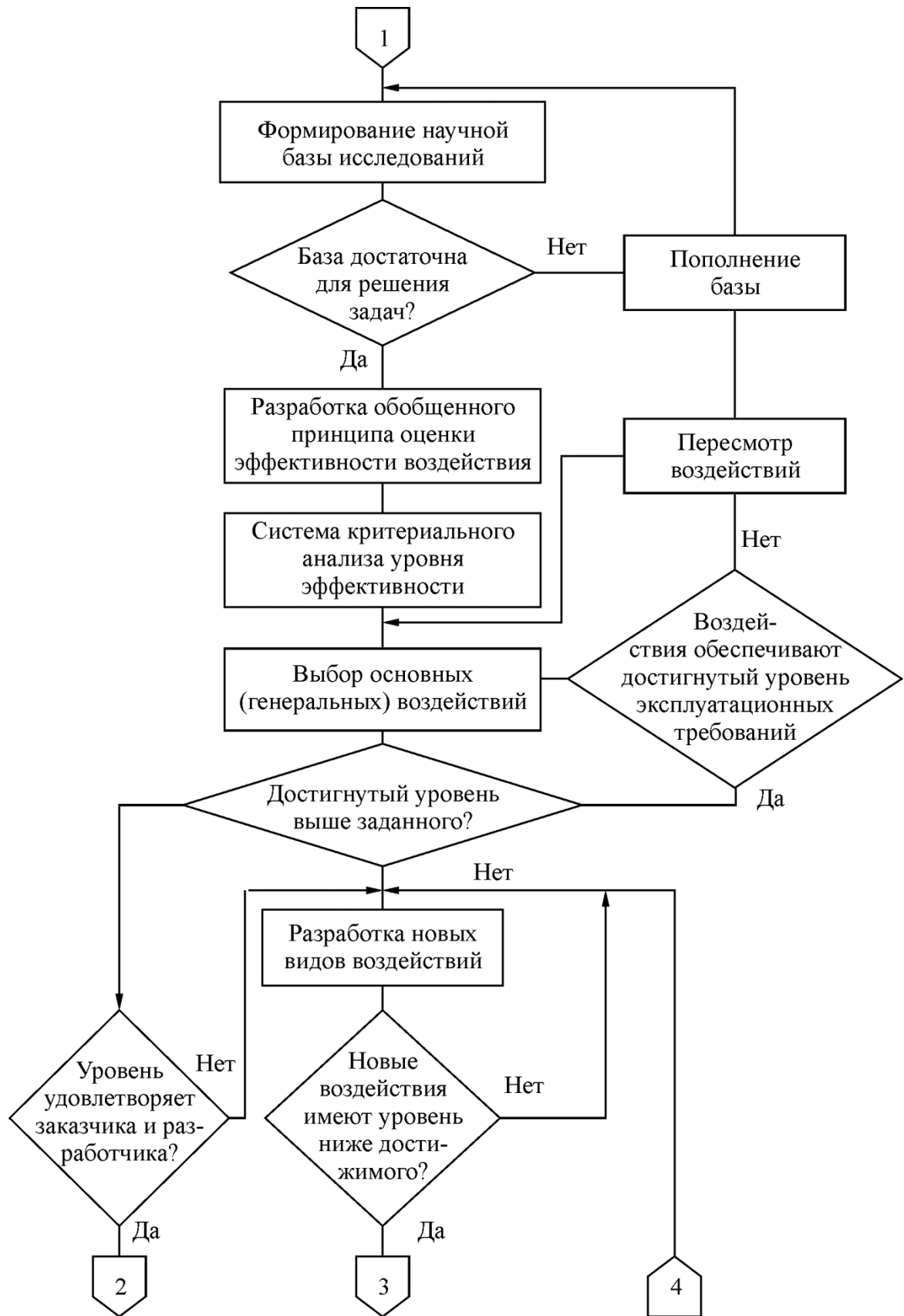
Алгоритм включает несколько последовательных этапов, позволяющих моделировать процесс с упрочнением зоны обработки при различных ограничениях для реализации вариантов проведения операций.

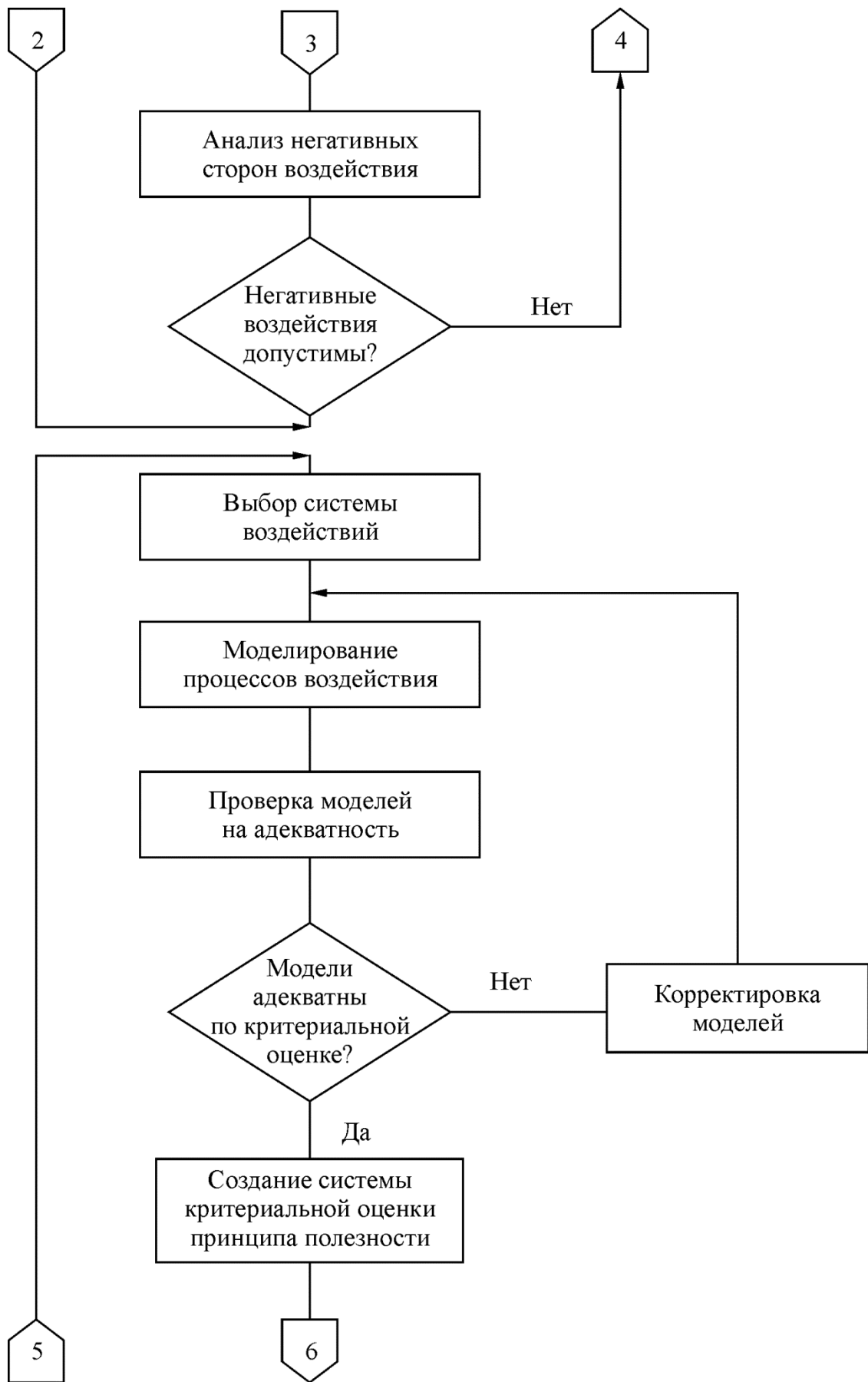
На первом этапе выполняется анализ выбора типового объекта, способы повышения эксплуатационных свойств изделий, где рассматривалось, в основном, возможность применения принципа полезности на стадии упрочнения поверхностного слоя, проанализированы недостатки известных способов и их значимость для используемых технологий.

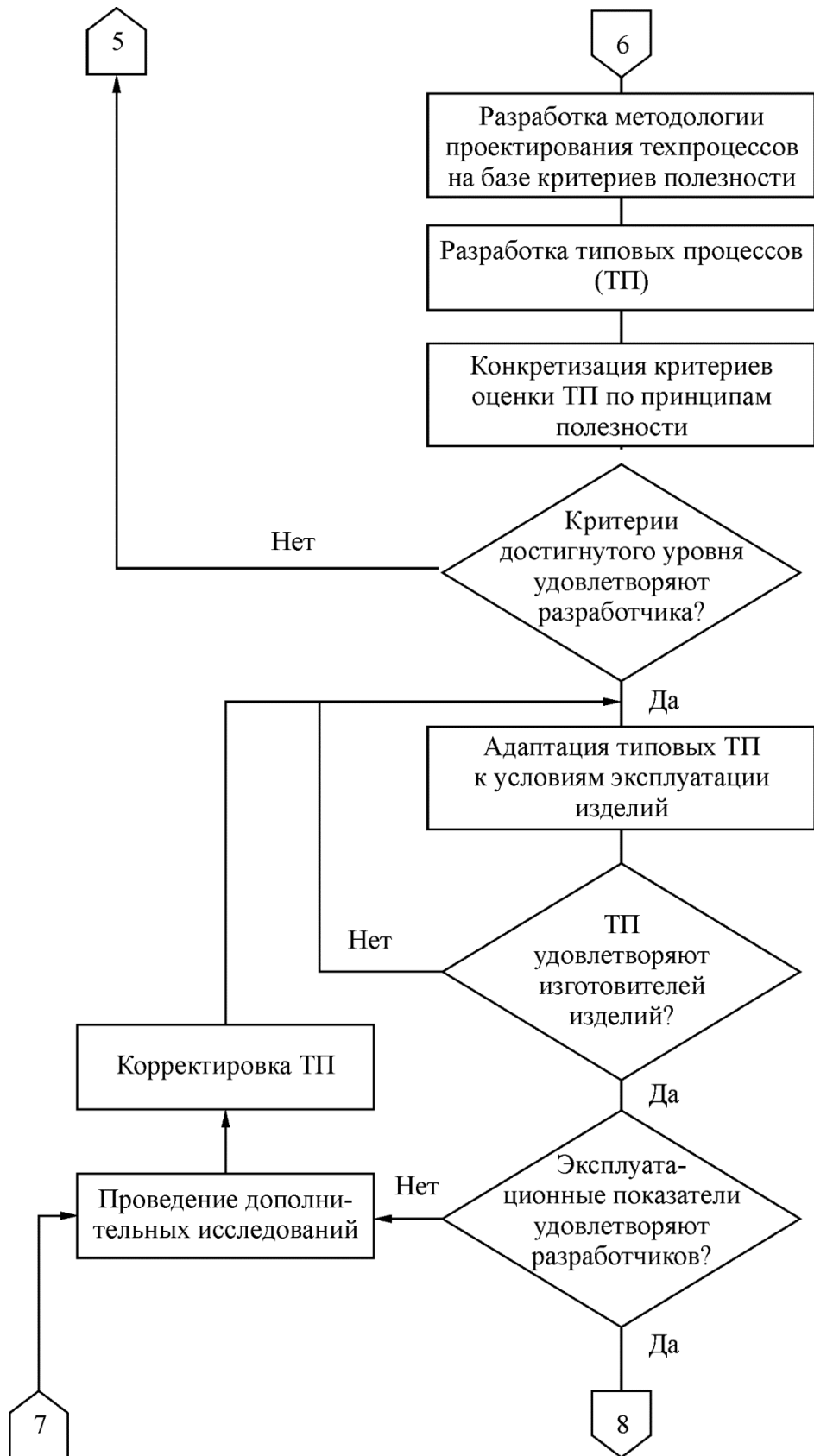
Далее обоснованы и научно доказаны эффективные направления проведения исследований для усиления роли каждого воздействия, включая упрочнение и его совместимость для комбинированного технологического

процесса, предложена процедура проектирования типовых технологических процессов, средств их технологического оснащения, объективные доказательства правомерности предложенных мероприятий, основанных на современных достижениях технологической науки, патентах на изобретения и опыте ведущих отраслей машиностроения в стране и за рубежом.









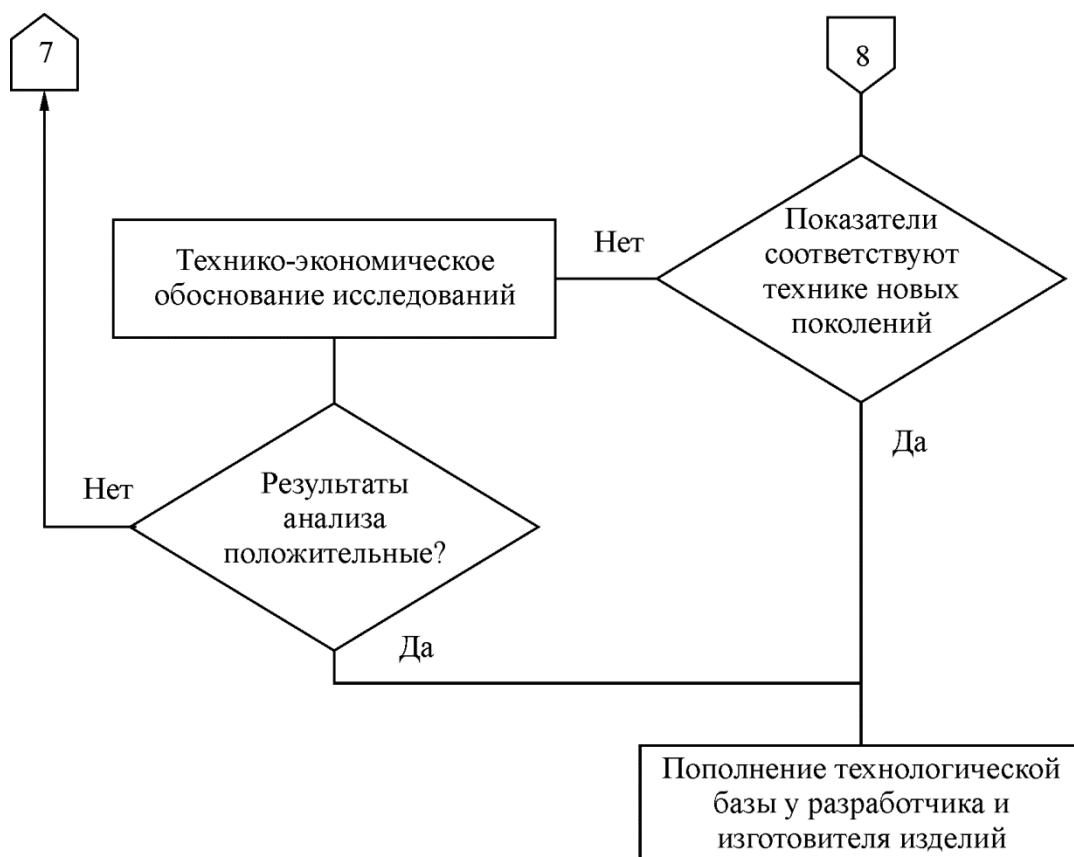


Рисунок 2.11– Алгоритм выполнения исследований для пополнения базы знаний по КМО с упрочнением и снижения негативных воздействий, затрудняющих расширение области использования КМО в авиакосмическом, энергетическом и общем машиностроении страны

Выводы по главе

1. Разработаны научные гипотезы, ускоряющие выполнение исследований для решения поставленных задач и достижения цели работы.
2. Применены научно обоснованные методы и устройства преимущественного отечественного производства для исследований КМО с упрочнением поверхностного слоя, для выбора наиболее эффективных мероприятий и перспективного планирования развития авиакосмической и энергетической атомной отрасли.

3. Разработаны и реализованы принципы выбора по критериям технологичности средств технологического оснащения для изучаемой отрасли с рекомендациями по источникам получения требуемой продукции.

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

Глава 3 Механизм и моделирование процесса комбинированной обработки с управляемым упрочнением концевых и контактирующих участков конструкций с учетом условий эксплуатации

3.1 Инструмент и механизм упрочнения

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 проведения 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.

3.1.1 Операции с упрочнением внутренних поверхностей

Был спроектирован и изготовлен электрод-инструмент для комбинированной обработки с упрочнением внутренних поверхностей. Электрод на рисунке 3.1 способен выполнять чистовую обработку с упрочнением длинномерных каналов, имеющих переменный диаметр и профиль по длине отверстий в деталях типа металлических силовых трансмиссий.



Рисунок 3.1 – Электрод-инструмент (ЭИ) с регулируемым диаметром рабочей части

Обработка ЭИ на рисунке 3.1 выполняется при его продольной подаче и вращении заготовки. Для изменения наружного диаметра в нем выполнено 3 равнорасположенных в сечении разрезов, 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 разрезы вмонтированы нетокопроводящие керамические шаровидные упрочняющие элементы, которые для диаметров отверстий менее 45 мм установлены неподвижно, а при больших размерах сечений могут иметь вращение вокруг оси типа приведенного на рисунке 1.4,в. 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 участка 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. По [13] эффективность однопроходного пластического упрочнения повышается, если зоны наклепа имеют просветы между соседними участками, поэтому при комбинированной обработке не требуется перенастройка режимов при прохождении концевых участков заготовки.



Рисунок 3.2 – Вал привода из стали 40ХНМА с упрочненной внутренней поверхностью

На рисунке 3.2 показан длинномерный вал привода агрегатов от редуктора изделия, где при комбинированной обработке диаметр отверстия упрочнен с концевых участков до 12-15 %, что позволило повысить его ресурс на величину свыше такого показателя для всего редуктора и создать возможность дальнейшей модернизации узла.

3.1.2 Обработка наружных поверхностей в местах **неподвижной неразъемной сборки** участков

Для выполнения операции преимущественно используется нежесткий инструмент для комбинированной обработки с упрочнением разнородных стыковочных металлических элементов, входящих в узел.

Сечение обрабатываемого узла приведено на рисунке 1.3,б, откуда следует, что при использовании в качестве инструмента металлического электрода-щеточки (ЭЩ) (рисунок 3.3) требуется подобрать параметры конструкции и режимы, позволяющие после сборки удалять припуск с контактных участков, имеющих различную обрабатываемость, вызывающую появление дефектов поверхности после чистовой обработки под упрочнение. Такие рекомендации даны в [3].

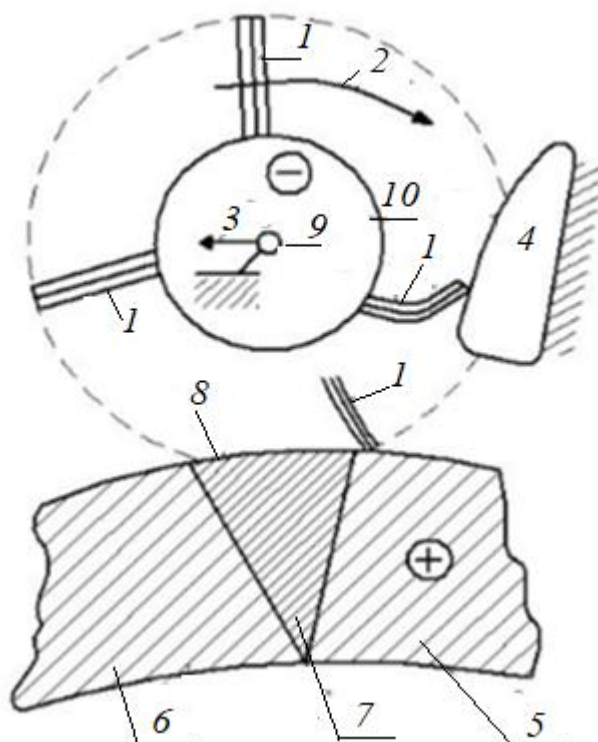


Рисунок 3.3 – Электрод-щеточка для комбинированной обработки с ударным пластическим упрочнением поверхности

- 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 3.3 выполнена по изобретению [3] предназначена 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 рисунке 1.3.б. ЭЩ имеет несколько пучков 1 (рисунок 3.3) 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 набегаящим пучком и деталью 5 на рисунке 3.3. 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, исключая возможность отгиба или перемещения магистрали для доступа инструмента (в рассмотренном примере сечение трубы из высоколегированных сталей имеет диаметр 426 мм, толщину стенки 40 мм).

3.2 Инструмент, механизм обработки, технические средства для чистовой операции с упрочнением участков объектов при ограниченном доступе инструмента

При рассмотрении технологии ремонта трансмиссий, магистралей, кроме регламентных работ, связанных с плановой заменой участков, необходимо учитывать возможность ремонтных операций, которые во многом носят случайный характер. Для этого используется минимальное количество типоразмеров требуемого инструмента, оборудования и оснастки, как правило универсального, чтобы снизить затраты на эти цели. Применительно к атомным электростанциям еще одним ограничением при ремонте становится длительность пребывания в зоне ремонта исполнителей и необходимость временного отключения ремонтируемого блока с потерей большого количества вырабатываемой энергии за период вывода, ремонта и запуска процесса. Здесь большую часть операции зачистки и упрочнения магистрали можно выполнить КМО, а относительно труднодоступный участок – путем выравнивания поверхности абразивным полотном на тканевой основе. По оценке эффективности использования производственной технологичности [103, 129, 87] было установлено, что для получения требуемого упрочнения, совместимого со всей магистралью, предпочтительнее для этой цели использовать обкатку с применением созданной достаточно простой оснастки.

По результатам ранее полученного анализа рассмотренных вариантов обкатки [132] установлено:

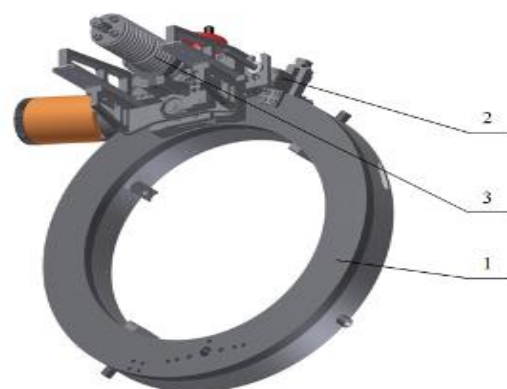
1. В принятом диапазоне параметров режимов обкатки (Нагрузка 2500÷3000Н, глубина вдавливания 0.04÷0.06мм, скорость подачи ролика до 25 м/мин) величины компонентов остаточных напряжений оказались практически идентичными для всех рассмотренных режимов для всех рассмотренных роликов, что обеспечивает стабильность усилий деформации и возможность расчета при единых показателях.

2. Глубина распределения остаточных напряжений слабо колеблется в пределах $1 \div 1.5$ мм. При этом величины максимальных нагрузок на ролик ограничены значением, ниже разрушающего предела. Последнее позволяет применять в расчетах осредненный диапазон выбора глубины вдавливания.

С учетом принятых допущений была разработана автоматизированная установка по упрочнению мест соединений трубопроводов большого диаметра (рисунок 3.4, а).



а)



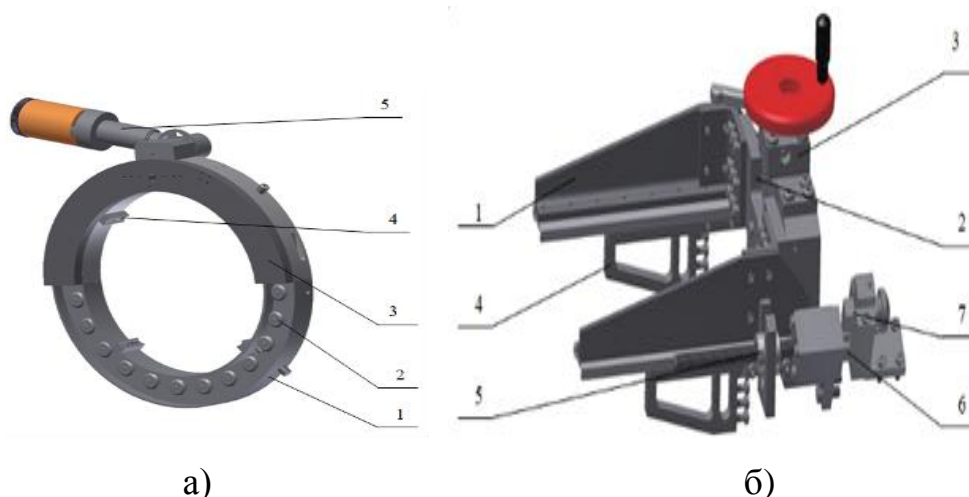
б)

Рисунок 3.4 – Установка для поверхностного упрочнения зоны предельного нагружения сварных соединений

Механическая часть установки (рисунок 3.4, б) состоит из:

- устройства кругового движения узла нагружения с деформирующим роликом вокруг трубопровода 1;
- устройства продольной подачи узла нагружения с деформирующим роликом вдоль оси трубопровода 2;
- узла нагружения с деформирующим роликом 3;
- электронного блока управления.

На рисунке 3.5,а приведено устройство кругового движения узла нагружения с деформирующим роликом вокруг трубопровода, которое представляет собой разъемную конструкцию и состоит из основания 1 с направляющими роликами 2, планшайбы с зубчатым венцом 3, опор крепления 4 и электропривода 5.



а) б)
Рисунок 3.5 – Компоненты механической части установки:

- а) – устройство кругового движения узла нагружения с деформирующим роликом вокруг трубопровода;
- б) – устройство продольной подачи узла нагружения с деформирующим роликом вдоль оси трубопровода

Устройство продольной подачи узла нагружения с деформирующим роликом вдоль оси трубопровода (рисунок 3.5, б) состоит из кронштейнов с направляющими 1, закрепленных на каретке 2 механизма радиального перемещения 3. На направляющих 1 установлены кронштейны 4, на которых крепится узел нагружения с деформирующим роликом 3 (рисунок 3.4, б). Осевое перемещение осуществляется посредством винтовой пары 5, на винте которой установлено зубчатое колесо 6, взаимодействующее с упором 7, закрепленным на основании 1.

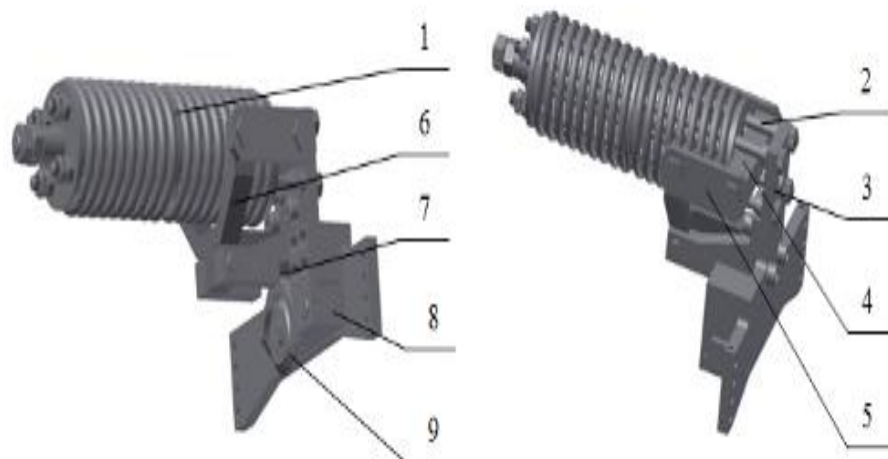


Рисунок 3.6. – Узел нагружения с деформирующим роликом

Узел нагружения с деформирующим роликом (рисунок 3.6) состоит из блока силовых пружин 1, установленного на направляющих 2, закрепленных на площадке 3. Площадка 3 крепится к кронштейнам 4. Усилие от блока силовых пружин 1 посредством коромысла 4 и тяг 5 передается через двуплечий рычаг 6 и сферический упор 7 рычагу 8 с деформирующим роликом 9.

Таким образом, предлагаемая технология поверхностного упрочнения металла композитных соединений труднодоступных участков трубопроводов ядерного блока обеспечена представленным специализированным техническим комплексом, позволяющем производить восстановительные работы без длительной остановки производственных процессов АЭС.

3.3 Моделирование процесса упрочнения пластическим деформированием

3.3.1 Процессы, происходящие при выполнении упрочнения с **пластической деформацией** контактной поверхности, и требующие обоснования при моделировании.

Из [129] известно, что предел прочности сталей увеличивается после отжига, с увеличением давления и числа проходов, а в закаленных материалах происходит обратное: в обоих случаях предел текучести снижается. Остаточные напряжения увеличиваются до определенной точки. С увеличением числа проходов и давления в отожженных сталях они увеличиваются до определенной величины и любое значение выше этого предела приводит к повреждению материала, хотя это, по-видимому, не относится к мартенситной стали. Здесь значения твердости увеличиваются при обработке давлением и любом количестве проходов. Учитывая изложенное, можно утверждать, что наибольший результат от применения пластического наклепа может достигаться для сталей, применяемых в исследуемых трансмиссиях и магистралях, после закалки и отпуска, где образуется мартенсит, что способствует повышению твердости поверхности и увеличению остаточных напряжений сжатия [129].

Для исследуемых аустенитных сталей пластический наклеп вызывает появление в поверхностном слое нанокристаллов, а вблизи поверхности – мартенсита с высокой плотностью дислокаций. Известно, что металлы, содержащие нанокристаллы, обладают большей твердостью, повышенной стойкостью к износу, образованию коррозии, микротрещин и других концентраторов напряжений, часть которых устраняется при пластическом упрочнении и это особенно проявляется при испытаниях на усталостную прочность и долговечность.

При изучении механизма упрочнения показано, что повышение температуры при деформации может приводить к снижению остаточных напряжений сжатия, особенно значительно вблизи поверхности. Однако деформационное упрочнение остается стабильным, поэтому долговечность изделий при многоцикловых эксплуатационных нагрузках остается удовлетворительным.

При анализе механизма пластического упрочнения следует учитывать факторы, обеспечивающие увеличение усталостной долговечности, принимаемые во внимание при моделировании процесса:

1. Упрочнение уменьшает степень локальной пластической деформации, предотвращая перемещение дислокаций, тем самым уменьшая вероятность возникновения трещинообразования.

2. Пластическая деформация уменьшает вероятность роста мелких трещин, которые зарождаются на поверхности или вблизи нее.

3. Тонкая микроструктура препятствует образованию трещин.

Для материалов с высоким пределом текучести деформационное упрочнение ограничено, поэтому здесь увеличение усталостной прочности в основном зависит от остаточных напряжений, снижения шероховатости поверхности локального (до 1000 К) нагрева упрочняемой поверхности, перенаклепа, вызывающего отслаивание материала в процессе упрочнения. Последнее обычно вызывается запредельными силовыми контактными давлениями от превышения назначенных припусков под операцию, поэтому

требует обоснования при моделировании упрочнения в комбинированном процессе.

3.3.2 Разработка модели процесса **пластического упрочнения**

Для определения, назначения, расчета оптимальных режимов пластического упрочнения разработана МКЭ-модель, позволяющая произвести 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 позволяет упростить расчеты за счет исключения из процесса менее значимых воздействий КМО. Кроме того материал обрабатываемого образца на первом этапе считается однородным как в исходном состоянии. Например, на рисунке 3.7 приведена диаграмма растяжения стали 10ГН2МФА, используемой в магистралях атомных станций. Экспериментальная диаграмма была получена на машине Zwick Z100 Allround-Line Materials Testing Machine.

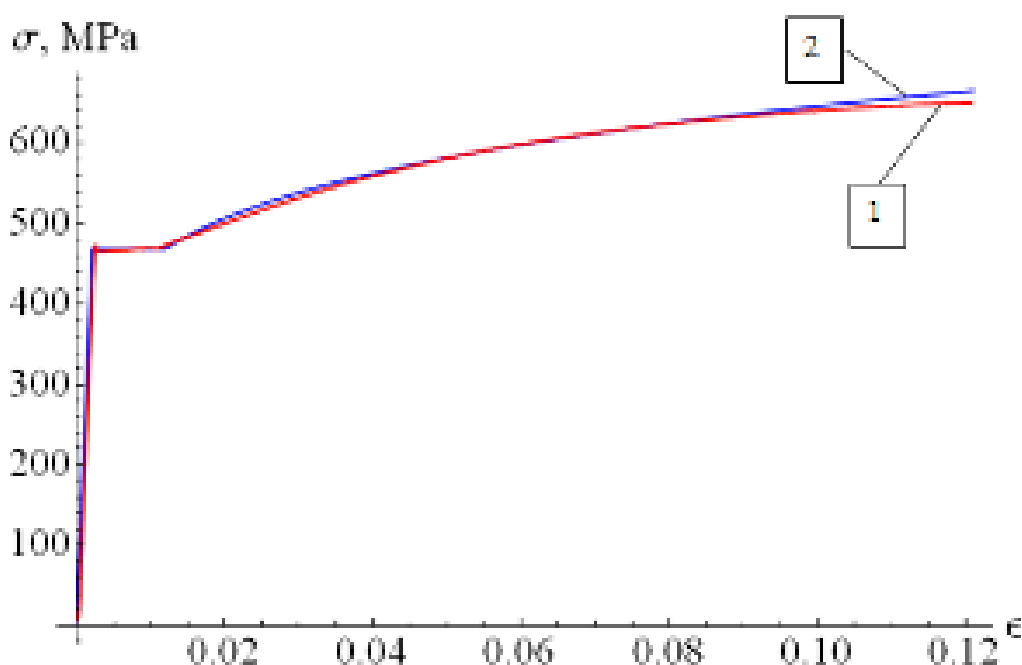


Рисунок 3.7 – Экспериментальная диаграмма степени растяжения стали 10ГН2МФА (1) и ее аппроксимация (2) с учетом свойств материалов соединения деталей

На рисунке 3.7 в созданной модели были учтены механические свойства компонентов сварного соединения, что не оказало влияния на закономерности изменения характера и величины растяжения и подтвердило обоснованность процедуры моделирования.

2. Принятая для расчета модель нагружения может производиться с управлением процессом по величине глубины вдавливания U [мм], либо с контролем по величине нагрузки или по подаче.

В разработанной МКЭ-модели использовались образцы, отвечающие начальным и граничным условиям. Так для случая на рисунке 3.7 при экспериментальном подтверждении модели изучались образцы толщиной 5мм, нижняя плоскость которых жестко закреплена. Боковые поверхности составляли симметричные граничные условия, благодаря которым обосновывается, что рассматриваемый образец ведет себя аналогично пластине бесконечных размеров по осям X и Y .

3. Для учета реальных геометрических характеристик сварного соединения, реального распределения свойств и учета сложного напряженно-деформированного состояния металла при взаимодействии в комбинированном процессе с инструментом, который принят в начальных условиях абсолютно жестким, была создана трехмерная конечно-элементная (КЭ) модель изучаемого сварного соединения. Общий вид конечно-элементной модели показан на рисунке 3.8.

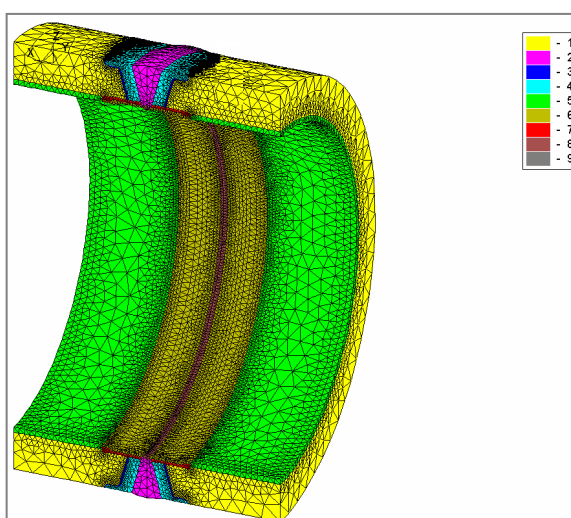


Рисунок 3.8 – Конечно-элементная модель трубопровода в разрезе

Для определения, назначения, расчета оптимальных режимов пластического упрочнения разработана МКЭ-модель, позволяющая произвести 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 позволяет упростить расчеты за счет исключения из процесса менее значимых воздействий КМО.

2. Материал обрабатываемого образца на первом этапе считается однородным как в исходном состоянии.

3. Модель содержит порядка 1 200 000 узлов. Она создана в программном комплексе UZOR 1.0, предназначенном для конечно-элементного расчета 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 $[K^{\alpha,\delta}]$ и 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 подробные поля деформаций и напряжений в процессе нагружения контактным узлом комбинированного инструмента.

Для получения распределения остаточных напряжений в металле исследуемого сварного соединения конечно-элементная модель (рисунок 2.10) дополнена моделью контактного инструмента, например, ролика в форме диска с радиусом, равным радиусу профиля ролика (приведен на рисунке 3.9).

Подобная пространственная конечно-элементная модель позволяет учитывать различные несовершенства реальных трубопроводов. Примером таких несовершенств являются ремонтные нарушения процесса в зонах сварных соединений.

Показанный на рисунке 3.9 механизм построения конечно-элементной модели обеспечивает определение участка максимальной эксплуатационной повреждаемости трубопровода, в котором установлен эффект стратификации теплового потока, что приводит к образованию существенной неравномерности температур и внутренних напряжений по сечению трубопровода, часть которых выравнивается при комбинированной обработке с упрочнением пластической деформацией.

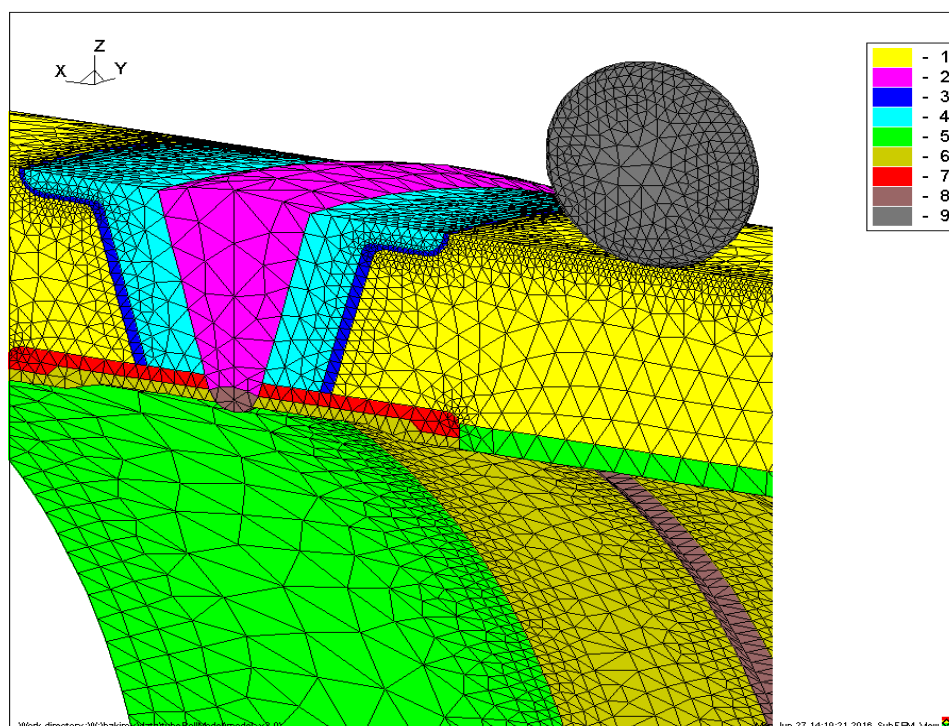
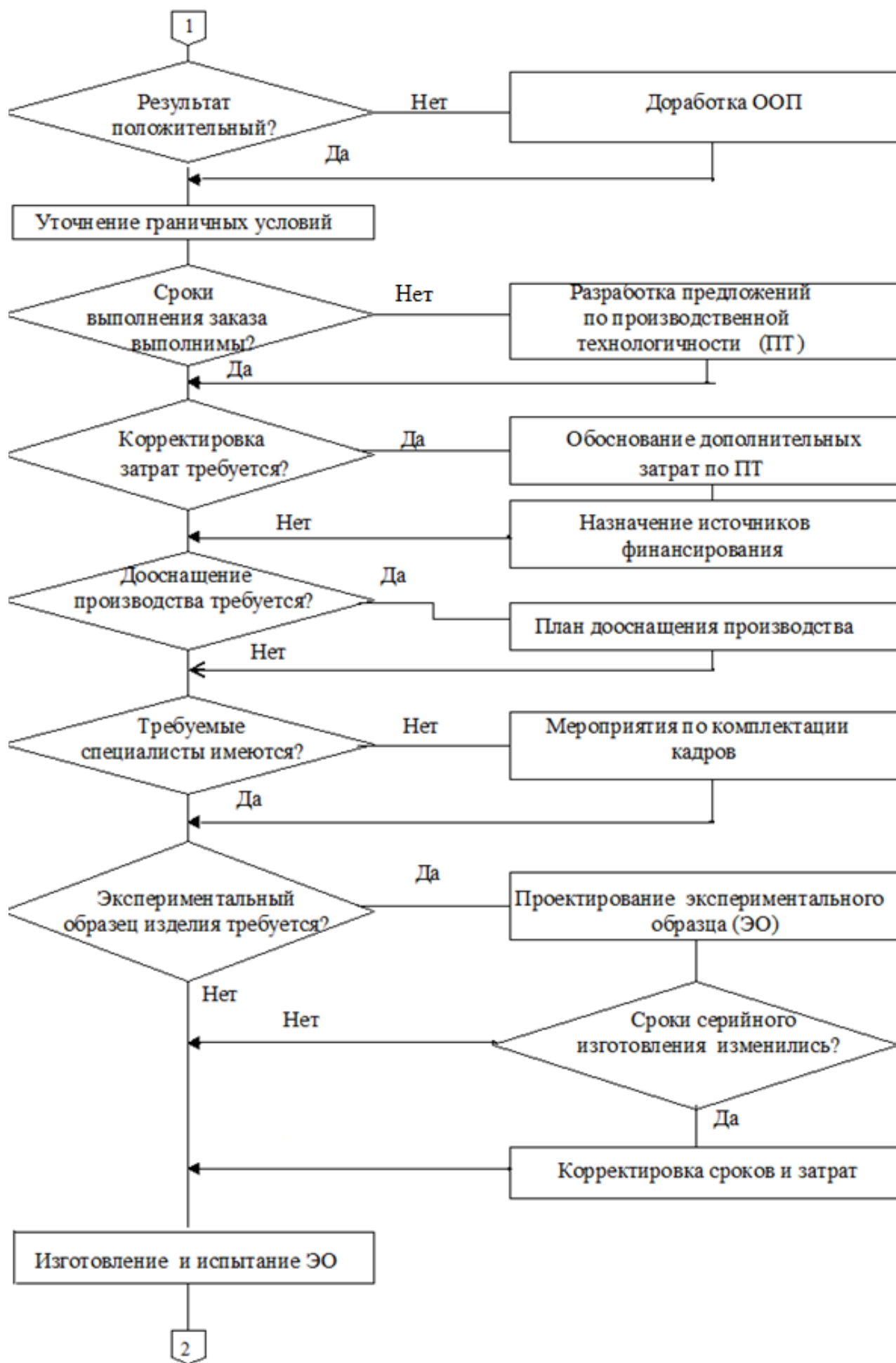
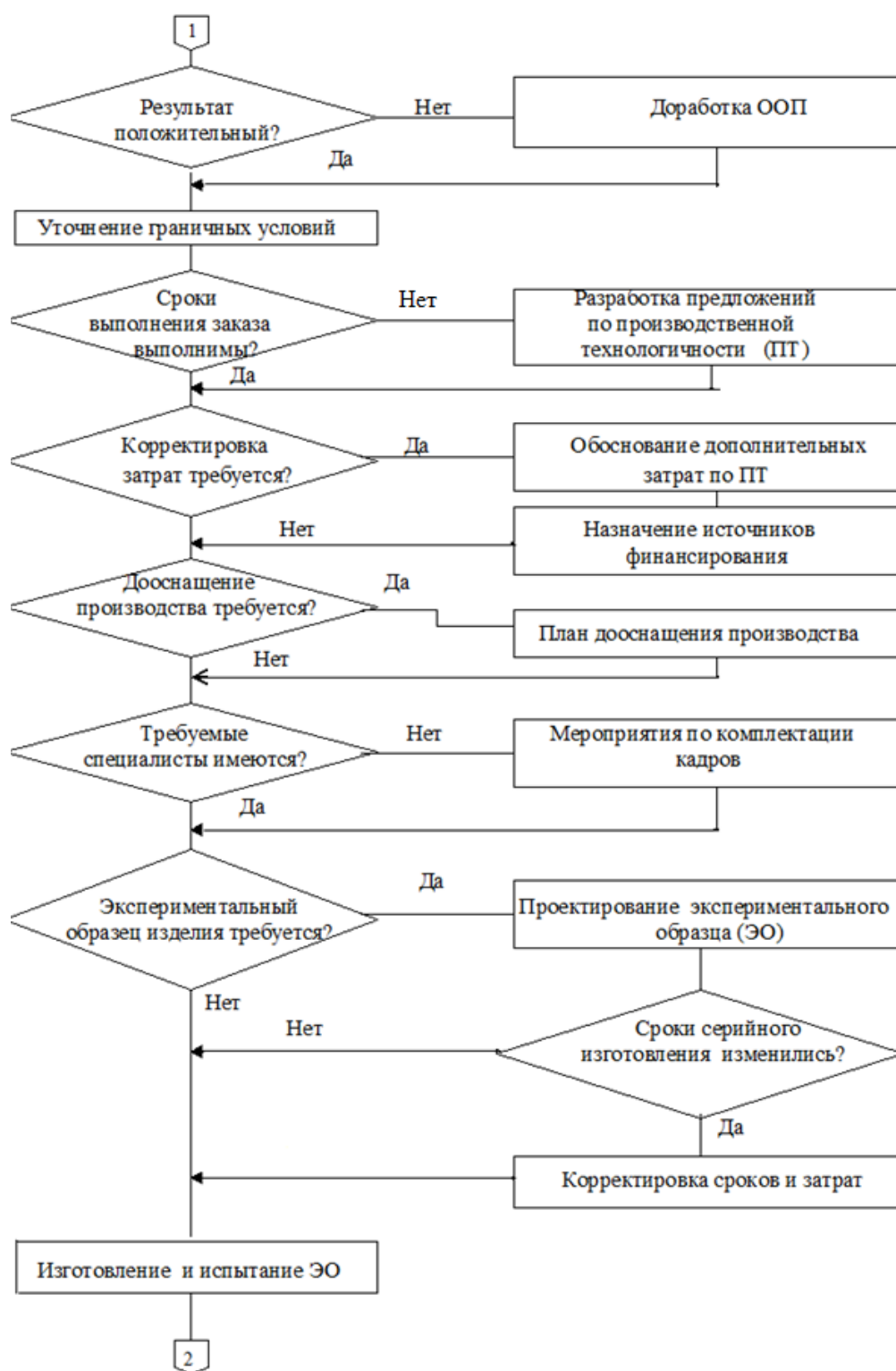


Рисунок 3.9 – Механизм упрочнения при моделировании процесса обработки высоконагруженного участка, например, сварного соединения

3.4 Алгоритм моделирования системы управления процессом отработки производственной технологичности при выпуске высокоресурсных, наукоемких изделий

В алгоритме моделирования системы управления процессом отработки производственной технологичности при выпуске высокоресурсных, наукоемких изделий, представленном на рисунке 3.10, показана структура механизма и модель процесса ее отработки за период жизненного цикла изделий авиакосмической и атомной энергетической отрасли машиностроения.





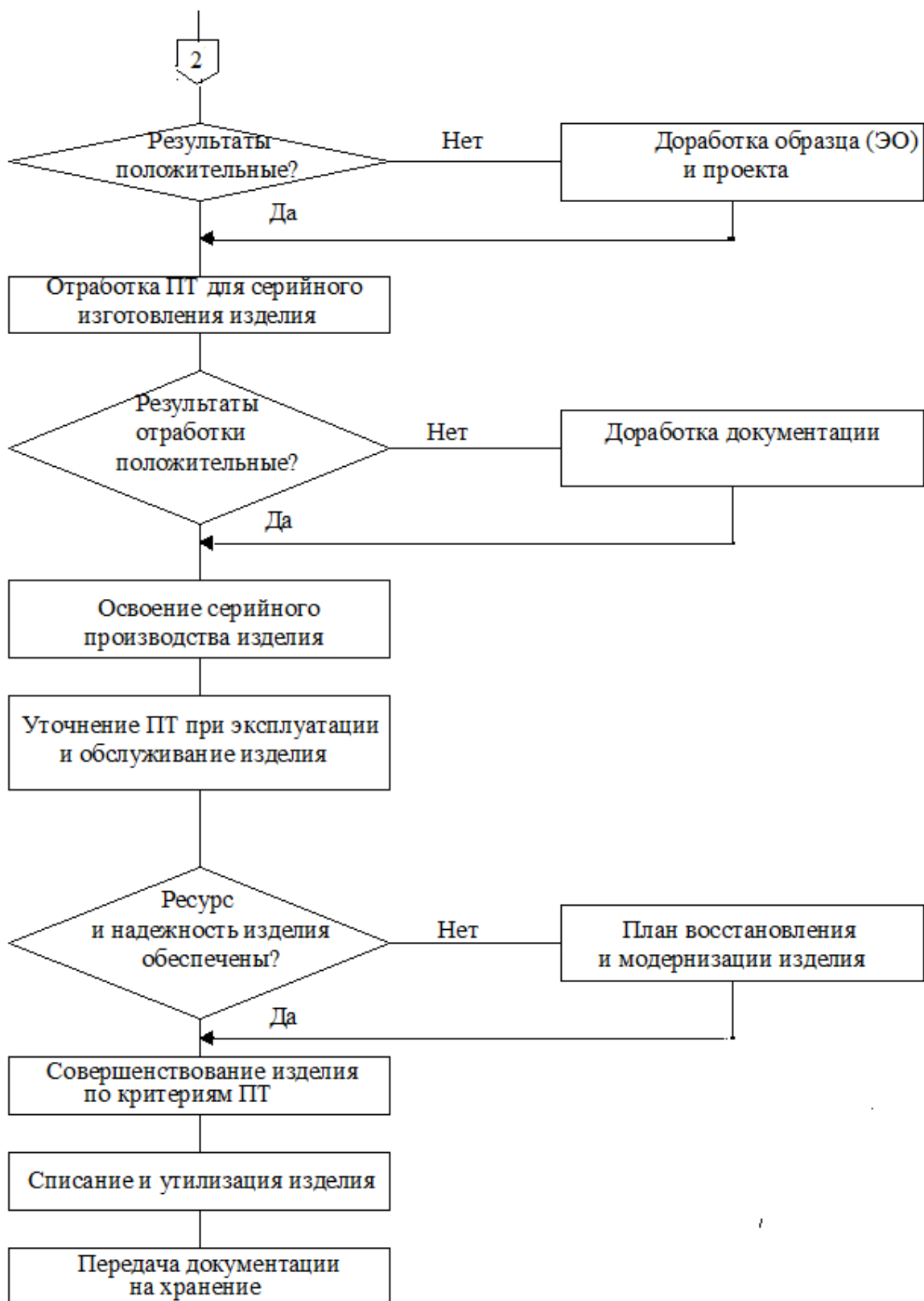


Рисунок 3.10 – Алгоритм модели для управления отработкой производственной технологичности при выпуске высокоресурсных наукоемких изделий

В качестве граничных условий для проектирования и использования модели на рисунке 3.10 были использованы численные показатели, приведенные в исходных данных, результаты научных исследований по отработке технологичности, показана возможность освоения выпуска продукции при различных видах производства в текущий момент времени и на перспективу.

По анализу материалов на рисунке 3.10 возможна корректировка и уточнение технического задания и тактико-технических требований, что может относиться к технологичности всего изделия и потребовать значительного пересмотра выполненных этапов отработки производственной технологичности. Это включает переоснащение предприятий под новую продукцию, решение вопросов комплектации изготовителей инженерно-техническими и рабочими кадрами, организационные действия по выбору, назначению внешних поставщиков, соисполнителей, мероприятия и планы по технике безопасности при работе с потенциально опасной продукцией.

В соответствии с требованиями технического задания (ТЗ) или тактико-техническими требованиями (ТТТ) к изделию оцениваются возможности и ограничения, которые требуется 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 на персонал, ограничения, связанные с техникой безопасности, особенностями утилизации материалов после замены объектов при ремонте и регламентном обслуживании, уровнем отработки технологичности всего объекта, а также производственного показателя 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 использовать 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 на рисунке 3.10 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.

3.5 Механизм отработки производственной технологичности наукоемких изделий машиностроения

3.5.1 Элементы 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. В последнем случае операции обычно проводятся на эксплуатируемых изделиях в полевых условиях при использовании минимального количества инструмента, оснастки и ограниченном доступе исполнителей в зону проведения операций. Здесь требуется на этапе отработки производственной технологичности обосновать минимально необходимое количество методов и средств, ускоряющих восстановление качества изделий. В сложных эксплуатационных условиях работают также длинномерные магистрали высокого давления, эксплуатируемые

на атомных станциях под большим давлением в зоне потенциально опасной для персонала, выполняющего ремонтно-восстановительные операции, в том числе с использованием упрочнения поверхностного слоя [1], в большинстве случаев в местах труднодоступных для выполнения операций, где нежелательно длительное присутствие исполнителей. Подобные сложности свойственны также магистралям современной техники, эксплуатируемой в авиакосмической отрасли, при ее модернизации и восстановлении эксплуатационных характеристик.

3.5.2 Научное обоснование выбора методов, средств, инструмента и оборудования

Для сокращения трудоемкости, ускорения сроков проведения операций при использовании ограниченного количества средств технологического оснащения потребовалось научное обоснование выбора методов и средств, инструмента и оборудования, что стало возможным при использовании механизма отработки производственной технологичности, рассмотренного в [2, 3], где применен 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 [4, 5], предложенных учеными нашей страны [6].

3.5.3 Процедура отработки производственной технологичности в машиностроении

Процесс отработки производственной технологичности необходимо использовать при создании наукоемких изделий в авиакосмическом машиностроении и при выполнении ремонтно-восстановительных работ магистралей энергетической техники. Он включает следующие этапы:

1. Для обоснования решения о полезности в наукоемком машиностроении рассматриваемого способа или устройства по результатам отработки производственной технологичности требуется обеспечить научное обоснование границ изменения рассматриваемого значимого параметра и доказать что он

является реальным инструментом управления технолога для назначения исходных условий, методов и средств изготовления, сборки и испытаний рассматриваемых вариантов мероприятий, их запуска в серийное производство, эксплуатацию и утилизацию. На этапе отработки производственной технологичности для реализации мероприятия технологам необходимо получить согласие заказчика нового или модернизируемого изделия, разработчика документации и согласовать вопросы обеспечения эксплуатационных показателей, заявленных заказчиком и детализированных разработчиком.

2. После согласования между технологическими службами предприятия с заказчиком и проектантами проводится отработка производственной технологичности, где используется имеющаяся документация и создается доказательная система, которая определяет возможность, целесообразность и эффективность изготовления технологическими службами предприятий предлагаемых разработчиком объектов для получения изделия с заданными заказчиком эксплуатационными характеристиками, либо обосновывает целесообразность выделения средств и назначения сроков для создания средств оснащения и проектирования новых комбинированных методов обработки, которые должны обеспечить условия совершенствования эксплуатационных показателей до заданного уровня.

3. При отработке производственной технологичности может проявиться вариант, при котором не оказалось предложений по достижению требуемого уровня эксплуатационных показателей создаваемого или улучшаемого изделия. Тогда может потребоваться корректировка технического задания и документации с количественным обоснованием его по критериям производственной технологичности и необходимость создания новых технологических методов и средств с возможностью увеличению времени на разработку таких технологий с выделением дополнительных средств финансирования на их разработку и освоение в серийном производстве, если это осуществимо на современном этапе развития технологической науки. Тогда количественную оценку сравнительных показателей производственной технологичности осуществляют по используемому

критерию полезности, где при опытном и осваиваемом серийном производстве обосновывается эффективность рассматриваемых технологических приемов и перспективы его расширенного применения в рассматриваемой отрасли и в целом в наукоемком машиностроении. Инструментом оценки служат цифровые технологии и система искусственного интеллекта с использованием базы знаний путем сравнения параметров предлагаемого технологического решения с достоверными результатами, достигнутыми на практике или на уровне изобретений. В текущий момент это возможно сделать в процессе обоснования при проектировании и использовании комбинированных методов обработки с широким применением механических и физико-технических воздействий.

3.5.4 Механизм управления комбинированными методами обработки

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

$$\begin{aligned} K_{o1}^p \Pi_{o1} &\geq \Pi_{p1}, \\ K_{o2}^p \Pi_{o2} &\geq \Pi_{p2}, \\ &\dots\dots\dots \\ K_{om}^p \Pi_{on} &\geq \Pi_{pn} \end{aligned} \quad (3.1)$$

С использованием критерия «принцип полезности» [87] можно достаточно убедительно прогнозировать достижимый и предельный уровень воздействия каждого технологического фактора $\Pi_{o1}, \Pi_{o2}, \dots, \Pi_{on}$ (n – количество изучаемых показателей) в создаваемом или модернизированном изделии относительно аналогичного объекта $(\Pi_{p1}; \Pi_{p2} \dots)$, освоенного в современном машиностроении, на получение объединенного технологического показателя $(\Pi_{o1}; \Pi_{o2} \dots)$ и управлять процессом до достижения предельных оценочных показателей в рассматриваемом комбинированном методе обработки. Здесь критерий полезности $K_{o1}; K_{o2}; \dots, K_{on}; K_{o1}; K_{o2}; \dots, K_{om}$ (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. Требуемая величина критерия зависит от многих факторов, включая характеристики зоны обработки, режимные параметры, наличие и качество технологической базы, организационные мероприятия. Она устанавливается для конкретных выбранных технологических воздействий в комбинированном процессе, где базой служит объем и содержание предшествующего опыта и структура, объем информационной базы.

3.6 Моделирование процесса выбора технологических методов и средств в машиностроении

Исходными данными для модели являются:

- принятые заказчиком наиболее значимые 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, полученных для конкретного мероприятия.

$$\begin{aligned} K_1^U, K_2^U, \dots, K_m^U &\rightarrow \max, \\ K_1^{\sigma'}, K_2^{\sigma'}, \dots, K_m^{\sigma'} &\rightarrow \min, \end{aligned} \quad (3.2)$$

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, оцениваемому по критерию полезности.

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

$$\begin{aligned}\vec{K}_{o1} \Pi_{o1} &\geq \Pi_{p1} \\ \vec{K}_{o2} \Pi_{o2} &\geq \Pi_{p2} \\ \vec{K}_{om} \Pi_{on} &\geq \Pi_{pn}.\end{aligned}\tag{3.3}$$

По зависимости (3.3) 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 [80] приведен алгоритм критериальной оценки уровня полезности технологических воздействий на эксплуатационные показатели изделий, позволяющий на примере охлаждаемой лопатки реактивного двигателя (рисунок 3.11) по модели с использованием принципа полезности доказать эффективность применения для этого случая прошивки отверстий переменного сечения и профиля комбинированной эрозионно-химической обработкой.

Результаты освоения процесса прошивки отверстий в детали на рисунок 3.11 показали не только возможность, но и эффективность выбора по принципу полезности принятого метода комбинированной обработки, значительно расширившего технологические возможности и область использования результатов исследования в других отраслях наукоемкого машиностроения.



Рисунок 3.11 – Рабочие лопатки турбины авиационного двигателя с продольными охлаждающими отверстиями переменного сечения

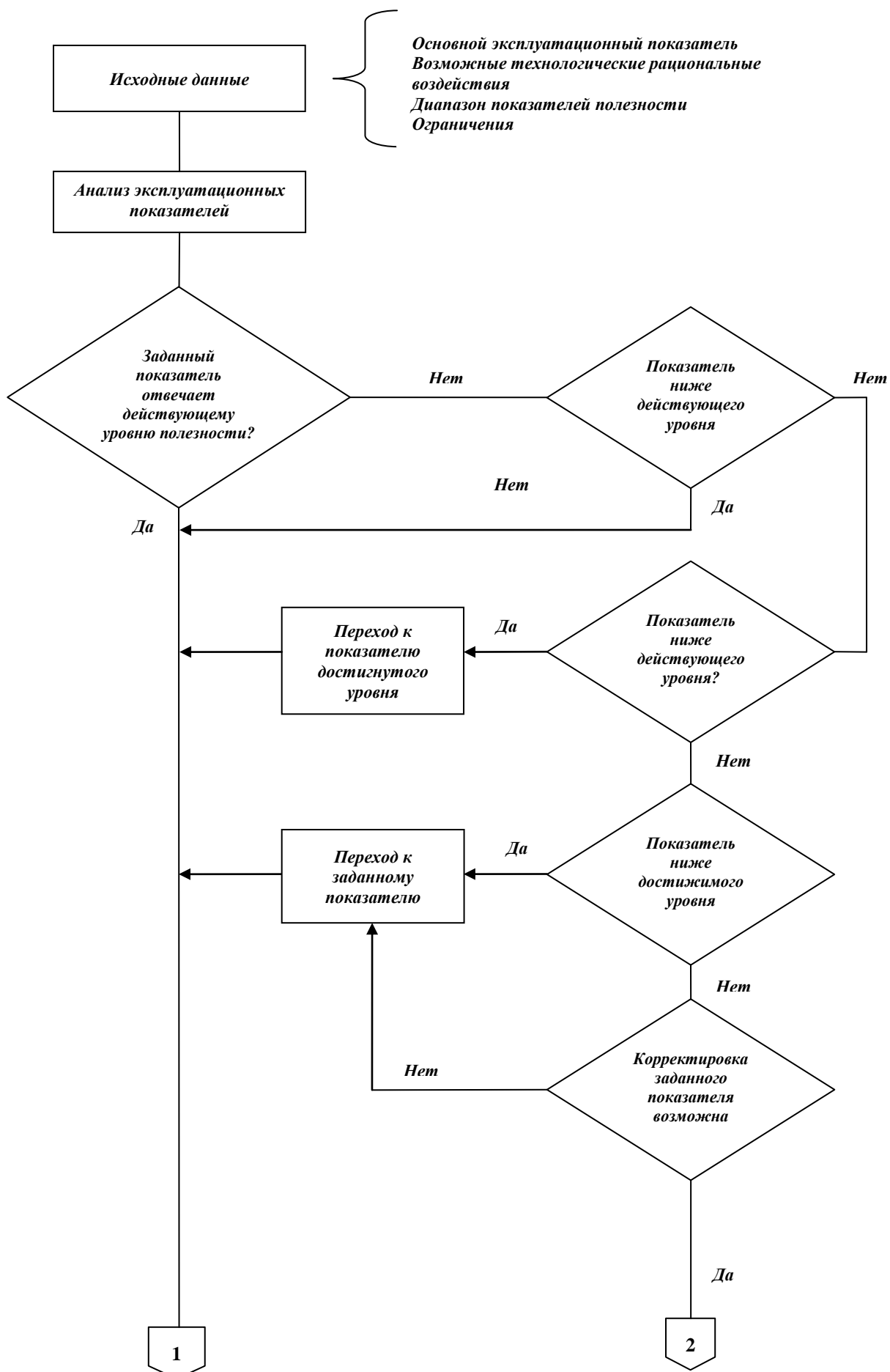
Эксплуатационные свойства объектов выпуска наукоемкой продукции в ведущих отраслях машиностроения зависят от состояния поверхностного слоя, в том числе от его свойств, получаемых после механического упрочнения. В ряде случаев усилия технологов могут быть направлены на создание требуемого слоя за счет покрытий, которые тоже требуется упрочнять. На показатели материала большое влияние оказывает состояние поверхности перед финишной операцией. Это особенно значимо при совершенствовании техники и в случае разработки наукоемких изделий, где требуется значительное повышение их эксплуатационных показателей.

Развивающиеся в авиакосмической и энергетической отраслях машиностроения цифровые технологии стали базой для освоения аддитивных процессов. Они стали одним из объектов исследования путем оценки уровня производственной технологичности и оказались эффективными при ремонте, восстановлении технических устройств, а особенно, в процессе создания новых объектов производства. Полезные свойства изделий, выполненных по аддитивным технологиям, возрастают по мере усложнения геометрических форм деталей. Установлено, что в последнем случае возможно снизить расход материала и энергии, и изделие формируется с минимальным удалением припуска, в основном на вспомогательных поверхностях в конце процесса.

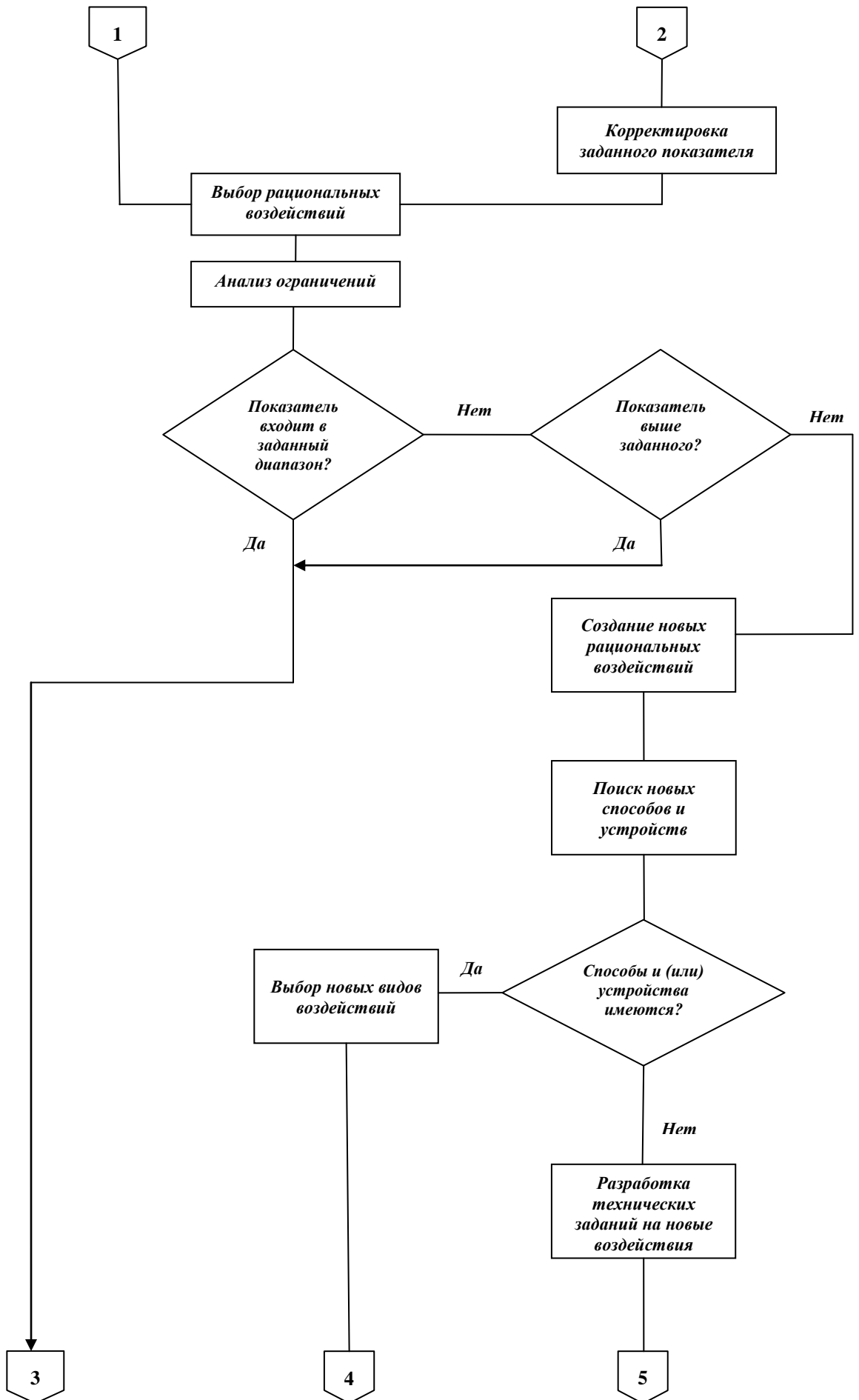
Основным средством изготовления деталей по аддитивной технологии являются 3D принтеры. Это универсальные устройства, хорошо освоенные на современных предприятиях, Здесь не возникает трудностей с их загрузкой и подготовкой персонала для обслуживания, т.к. технология производства практически едина при изготовлении большинства металлических и полимерных изделий, выпускаемых во всех отраслях современного машиностроения.

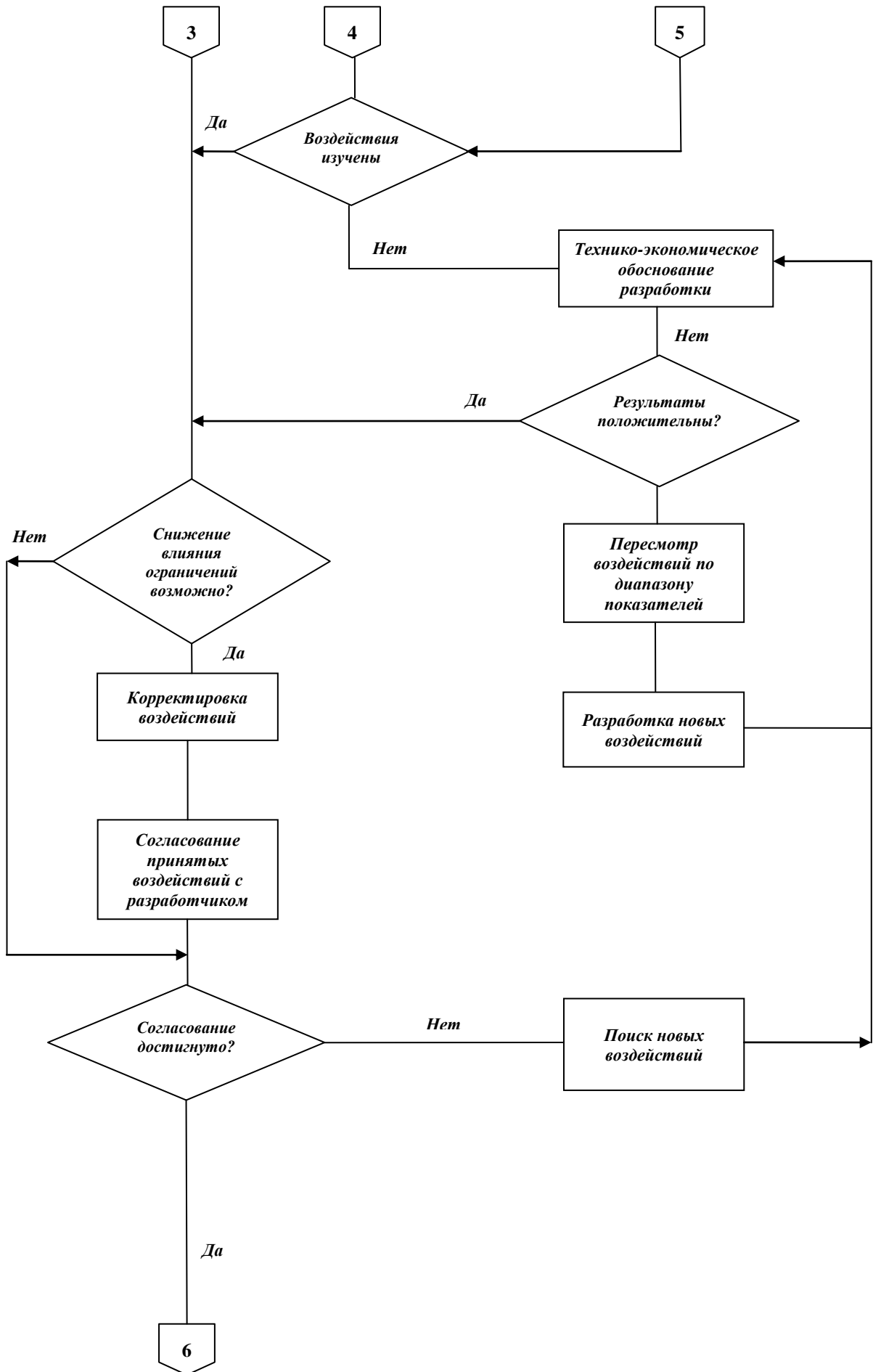
В результате анализа, выполненного по критериям уровня производственной технологичности, появилась возможность научно обоснованно назначать наиболее эффективный вариант воздействия в проектируемом процессе КМО с упрочнением поверхностного слоя, что способно повысить эксплуатационные характеристики до теоретически достижимого уровня.

Алгоритм на рисунке 3.12 дает технологическим службам предприятий и исследователям из вузов, НИИ возможность сформировать базу знаний отраслевого уровня для проектирования процессов и ускорить технологическую подготовку производства. Представленный алгоритм позволяет оценить работу в едином процессе нескольких воздействий с учетом возможности реализации их эксплуатационных показателей и путей снижения влияния технологических ограничений, значительная часть которых может быть устранена за счет использования патентов при проектировании комбинированных методов обработки.



Основной эксплуатационный показатель
 Возможные технологические рациональные воздействия
 Диапазон показателей полезности
 Ограничения





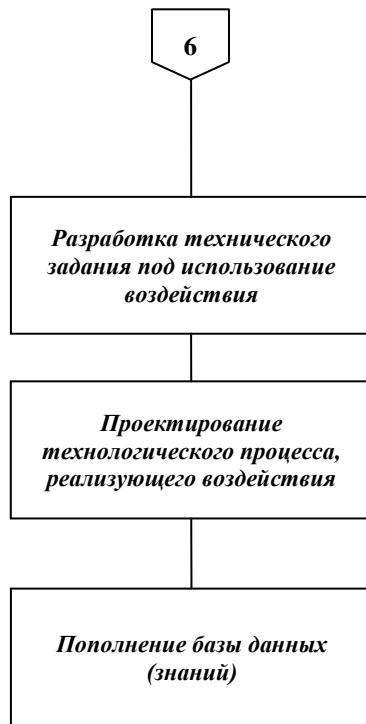


Рисунок 3.12 – Алгоритм обоснования и назначения технологических воздействий на генеральное эксплуатационное требование к объекту исследований

Выводы по главе

1. Созданы электроды для комбинированной обработки с упрочнением внутренних поверхностей деталей, имеющих ограничения для продольного перемещения инструмента. В них использован принцип управления размерами путем изменения при установке в начальное и рабочее положение диаметра рабочей части при обеспечении расчетного припуска на упрочнение, что позволило расширить область использования КМО на детали с осаженными концевыми элементами участков длинномерных приводов и магистралей типовых объектов.

2. Разработаны механизмы и на их базе проведено моделирование процессов упрочнения концевых и стыковочных участков длинномерных трансмиссий и магистралей с возможностью снижения или исключения ограничений при комбинированной обработке.

3. Обоснована возможность упрочнения пластической деформацией толстостенных магистралей, используемых на атомных электрических станциях, в том числе с ограниченным доступом инструмента в зону обработки, путем предложенного и обоснованного двухступенчатого метода воздействия на поверхность детали непрофилированным электродом-щеткой из материала, обладающего эффектом памяти формы, с локальной пластической деформацией и выравниванием напряжений в местах сопряжения обрабатываемых участков, что обеспечило доступность выполнения операции и требуемый период межремонтного обслуживания силовых приводов и высоконагруженных магистралей.

4. Разработан алгоритм проектирования комбинированных процессов с учетом специфики работы высокоресурсных узлов отраслевого машиностроения, что является базой для увеличения периода работоспособности приводов и магистралей авиакосмической и энергетической перспективной техники.

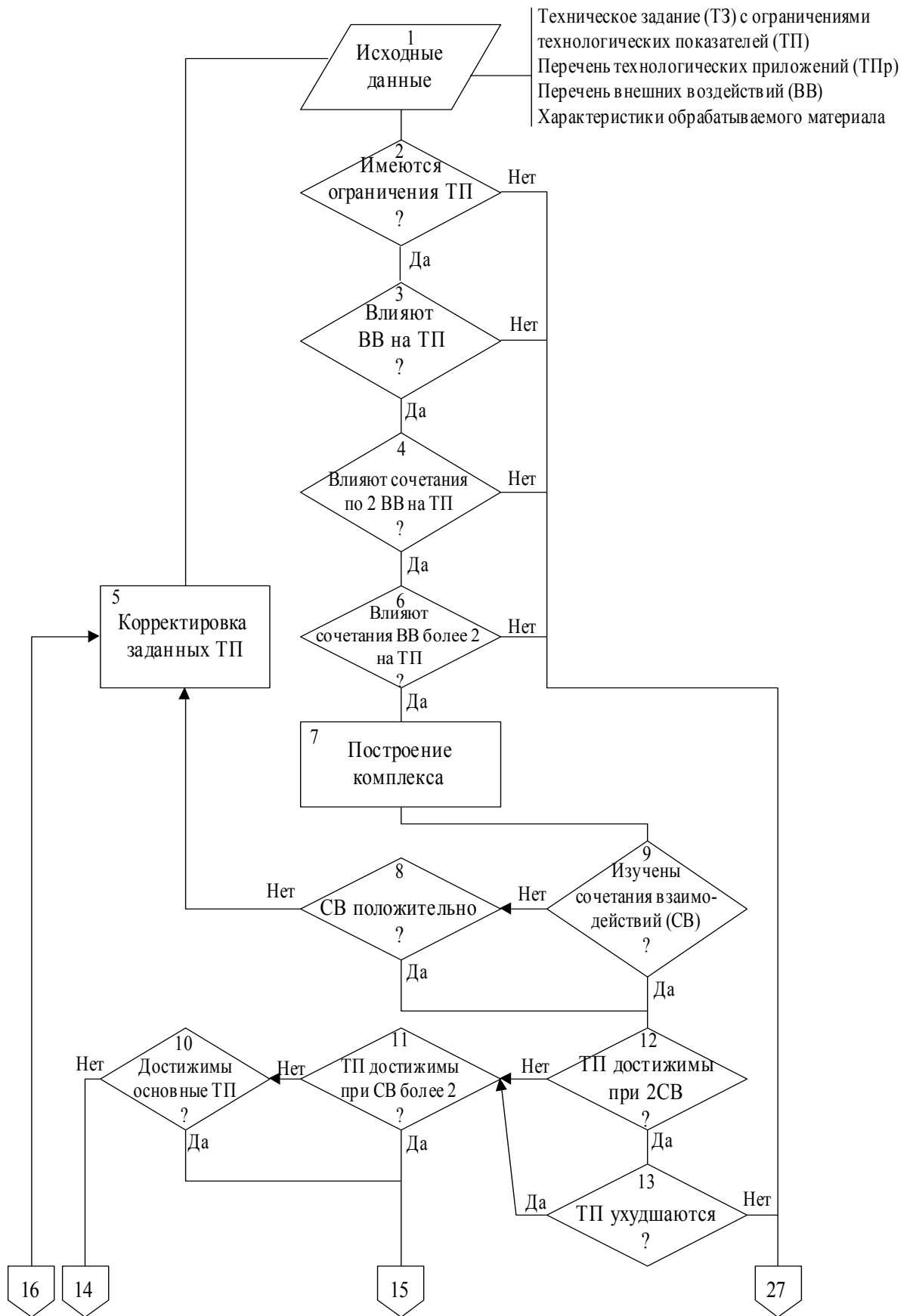
5. Приведен механизм моделирования процесса комбинированной обработки для научного обоснования синтеза наиболее эффективных физико-технических воздействий для проектирования КМО в машиностроении.

Глава 4 Разработка технологических методов и средств для КМО длинномерных силовых приводов и магистралей с учетом запросов авиакосмической и атомной энергетической отрасли

4.1 Процедура проектирования технологии КМО с использованием эффективного сочетания механических и физико-технических воздействий с упрочнением для типовых объектов машиностроения

При проектировании технологии обосновывается назначение взаимосвязанных физико-технических воздействий в процесс КМО. Воздействия исследуются с учетом сочетания различных факторов, формирующих структуру обеспечения параметров качества изделий, учитывающую взаимные требования, наиболее полно удовлетворяющие запросы заказчика. При поиске нужного решения оценивают отдельно взятые физико-технические воздействия и их взаимодействие с учетом ограничений, часть которых приведена в научных гипотезах. Принимаются во внимание требования по использованию в качестве исходных данных проверенные на практике сочетания в комбинированном технологическом процессе воздействий и использование вновь созданных методов и технологических средств, часть которых защищена охранными документами, в том числе полученных автором работы.

В основу алгоритма на рисунке 4.1 положены модели, приведенные в третьей главе, где показаны ограничения, устранение которых возможно с применением способов обработки с управляемым изменением выбранных воздействий. В их числе изучаемые методы упрочнения с пластической деформацией поверхностного слоя и импульсным ударным действием непрофилированного инструмента в форме металлической щетки из материала с эффектом памяти формы, которые впервые использованы для создания инструмента, обеспечивающего повышенный ресурс магистралей для атомных электростанций.



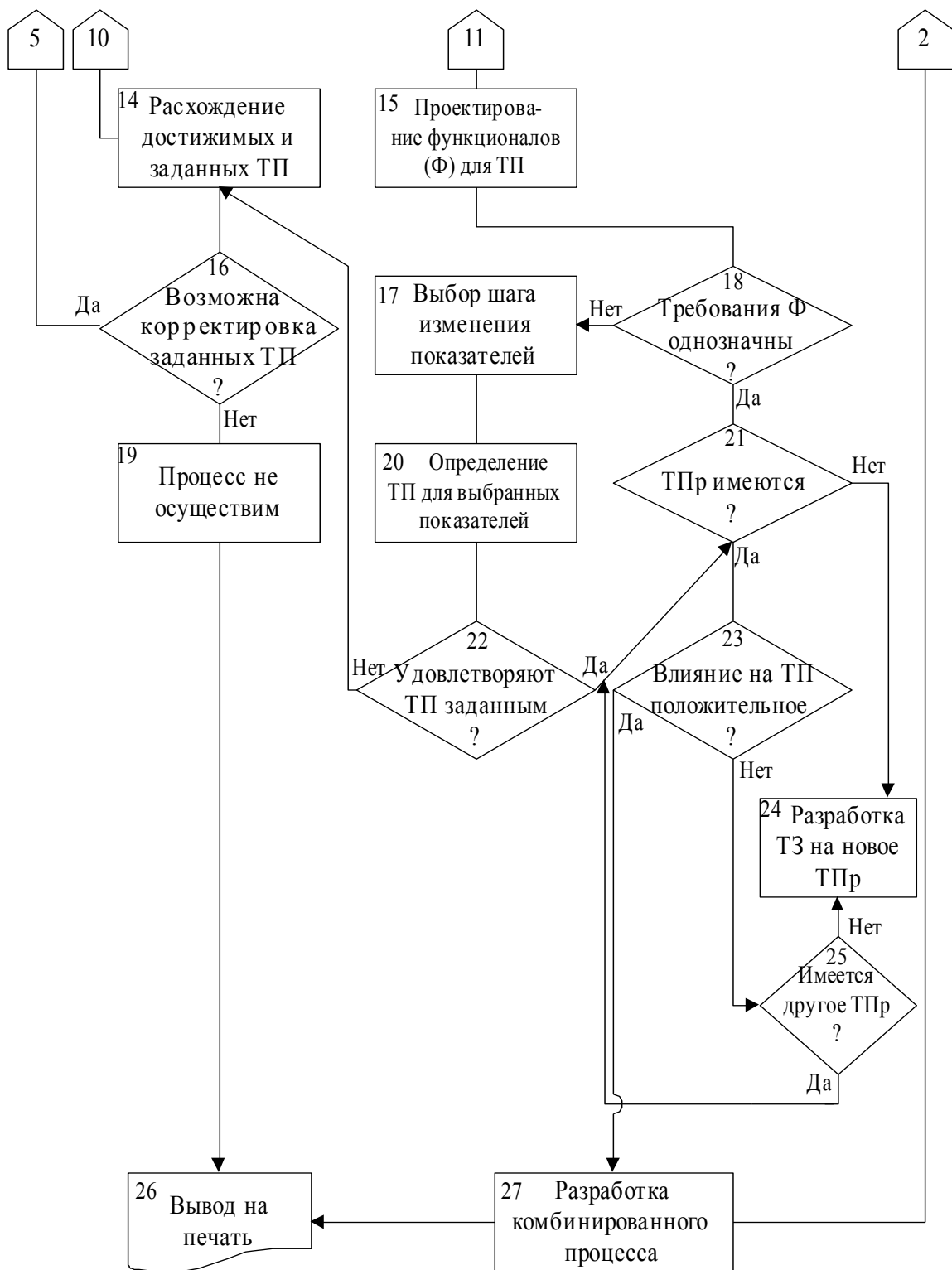


Рисунок 4.1 – Алгоритм проектирования комбинированных процессов с ограничениями доступа инструмента в зону обработки

Общий алгоритм на рисунке 4.1 позволяет повысить технологичность изделий за счет применения технологических процессов комбинированной

обработки трубчатых металлических заготовок с использованием упрочняющих воздействий вновь созданным инструментом с управляемым наклепом, где процесс регламентируется силой продольной подачи. Такие материалы исследуются в работе и находят расширенное применение, особенно в опытном производстве, дают существенный экономический выигрыш за счет исключения из использования сложного технологического оборудования и дорогой оснастки, ранее применяемой для этих операций.

4.2 Технологические режимы комбинированной обработки внутренних поверхностей трансмиссий

Способ упрочнения с использованием инструмента, приведенного на рисунке 3.1, включает режимы воздействия электрических и магнитных полей для формирования свойств поверхности под упрочняющее действие инструмента, то приведено в таблице 4.1.

Таблица 4.1. – Технологические режимы электрических воздействий освоенных КМО

№ п /	Способ комбинированной обработки	Основные режимные параметры КМО		Перемещение электродов	Преимущественная область эффективного применения
		Напряжение на электродах, В	Технологическая среда		
1	Эрозионно-химический	30 - 40	Токопроводящие эмульсии (СОЖ). Растворы соли с концентрацией 4 – 8% по массе с антикоррозионными добавками	Скорость подачи электрода инструмента до 26 мм/мин. Возможно вращение одного из электродов с частотой 100-120 Гц	КО деталей из конструкционных легированных сталей в транспортном машиностроении
2	Электроабразивный	15 – 32 (при черновой обработке), 3 – 15 (при чистовой обработке)	То же	Давление на заготовку 0,2 – 0,5 Мпа, скорость вращения инструмента 18 – 30 м/с	Обработка переходных участков сопряжения деталей с целью выравнивания остаточных напряжений

Продолжение таблицы 4.2

3	Обработка электродом-щеткой	4 – 10 (до 18 В)	Токопроводящие эмульсии, растворы солей с концентрацией 8 – 10% по массе с добавкой 15% масла индустриального	Окружная скорость электрода – щетки более 25 м/с; изгиб концов электрода-щеткой в месте обработки на периферийном участке 0,1 – 0,5 мм	Для чистовой подготовки поверхности под упрочнение в местах сопряжения элементов высокоресурсных ответственных конструкций транспортного и энергетического машиностроения
4	Электрохимический с наложением ультразвукового поля	10 - 15	Растворы солей с концентрацией 2 – 5% по массе	Амплитуда колебаний - до 40 мкм. Частота ультразвуковых колебаний - 18 – 22 кГц	Интенсификация процесса КО при обработке труднодоступных для инструмента участков магистралей
5	Динамическим потоком несвязанных твердых токопроводящих гранул	До 90 (в импульсе)	Токопроводящие эмульсии, растворы солей с концентрацией 1 – 3% по массе	Скорость подачи гранул до 15 м/с Рассчитывается по требуемой силе удара для поверхностного упрочнения	Обработка труднодоступных поверхностей гидравлических и транспортных систем с возможностью удаления от инструмента до 100 мм
6	Гидроабразивный в электрическом поле	До 50	То же	Скорость струи до 30 м/с	Удаление шаржированного слоя, снижение шероховатости поверхности и локальное упрочнение труднодоступных участков деталей

Приведенные в таблице 4.1 режимные параметры расширяют возможности технологов при проектировании процессов обработки типовых деталей на изделия других отраслей машиностроения, где требуемые эксплуатационные показатели могут быть эффективно достигнуты по результатам оценки уровня производственной технологичности.

Для расчета управляющего упрочнением параметра продольного силового воздействия на инструмент на рисунке 3.1 в главе 3 работы был сформирован

механизм комплексной обработки каналов, где сила протягивания P_c выполняется по схеме, сходной с подобной для дорнования, приведенной Исаевым А.Н. в [120]. Существенным отличием в механизме и расчетах режимов комбинированной обработки относительно дорнования является возможность 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 [120] экспериментальных коэффициентов, в частности K_σ , которые в рассматриваемом процессе устанавливаются индивидуально экспериментальными методами

$$P_c = \pi d_k P_k l_k (\alpha + \mu) \quad (4,1)$$

где P_c – сила продольного протягивания инструмента при КО;

d_k – наружный диаметр упрочняющего элемента инструмента (рисунок 3.1) после увеличения его рабочего диаметра 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 4.1 контактное давление инструмента

$$P_k = \beta \sigma_s \left\{ \ln m + \frac{2r_0}{l_k} \left[\frac{\pi \mu k_\sigma}{4(ar_0)} F_2 + F_1 \left(\frac{0,43}{(ar_0)} \cdot \frac{m-1}{m} - 0,7\mu(ar_0) F_3 \right) \right] \right\}, \quad (4.2)$$

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

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

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

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 4.1 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 [116] 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.

4.3 Технология комбинированной обработки электродом-щеткой

Электрод-щетка (ЭЩ), используемая в работе, представлена на рисунке 3.3. Она имеет наружный диаметр 50 мм, выполнена в виде трех пучков проволоки диаметром 0,5 мм из материала нитинол-55. Длина пучков 20 мм, величина прижима к упору до 5 мм.

В память металла с эффектом памяти формы (нитинол) заложен прямолинейный профиль пучков. За счет вращения ЭЩ возникают центробежные силы, удерживающие пучки в радиальном положении до соприкосновения с рядом размещенным, относительно места обработки, упором, имеющим аэродинамический профиль соприкасающейся поверхности. Последнее снижает величину соударения, отсечку периферийной части проволоки, ее износ. По мере

продвижения концов проволоки по поверхности упора расстояние между концами пучков и упором сокращается и происходит их загиб. При этом на ЭЩ действуют центробежные силы и сигналы от металла с эффектом памяти на переход его в заданное прямолинейное состояние. На подходе концов пучков к заготовке они резко выпрямляются, происходит ударное воздействие концов на обрабатываемую поверхность и ее наклеп, величина которого регулируется частотой вращения ЭЩ. Здесь часть режимов обработки назначается по рекомендациям в таблице 4.1, кроме частоты вращения, которая должна быть не менее 2000 оборотов в минуту для осуществления необходимого упрочнения поверхностного слоя. Тогда в рассматриваемой технологии подача будет в диапазоне 1,0-1,5 мм/сек. Процесс анодного растворения комбинированной обработкой протекает при постоянном напряжении на электродах в диапазоне 6-10 В при среднем потребляемом токе около 50 А.

Обработка конструкционных сталей рассмотренной ЭЩ позволила достичь шероховатости 0,63-1,25 мкм, обеспечить точность в пределах 0,1-0,2 мм. Износ концов пучков 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 по [132] возросла в 1,3-1,5 раза, что документально подтверждено в работе.

4.4 Технология упрочнения труднодоступных мест сопряжения деталей обкаткой

Эта часть технологического процесса особенно необходима, если операция ремонта и восстановления работоспособности магистралей на атомных электростанциях выполняется в период выполнения регламентных операций по замене участков труб. По [129] она выполняется сваркой с последующей пластическим упрочнением наружной поверхности на ограниченном шелевидном участке между границами зоны упрочнения ЭЩ, где операция может быть

осуществлена только накаткой инструментом (роликами) с диаметром в несколько миллиметров (обычно от 1,5 до 4 мм). Трудоемкость этой операции незначительна, но соблюдение режимных параметров необходимо, т.к. оно определяет качество всей процедуры восстановления работоспособности магистрали.

Основными параметрами режимов накатки, определяющих эффективность процесса упрочнения, являются: раскрытие механизма упрочнения и путей управления процессом, проектирование технологического процесса с научно обоснованными физико-техническими параметрами, а также скорости обработки, величины приложенного давления, количества проходов, диаметров шариков и/или роликов, скорости подачи инструмента. При изучении механизма протекания процесса упрочнения накаткой было установлено, что инструмент при нагружении статической или ударной силой деформирует поверхность материала, до возникновения упругой деформации.

На рисунке 4.2 по [129] представлены значения степени наклепа обрабатываемой поверхности для различных структур материала.

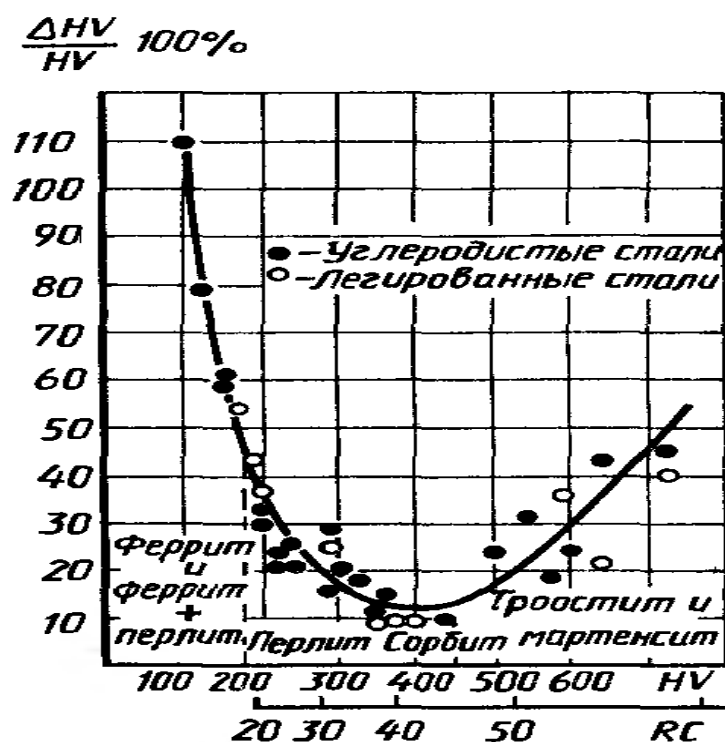


Рисунок 4.2 – Степень максимального наклепа для структур металла различной твердости

Наклеп оказывает различное воздействие на исследуемые материалы, что зависит от их свойств и условий эксплуатации. Состояние деформированного слоя материала оценивается по степени наклепа - относительному приращению твердости $\frac{\Delta HV}{HV} \cdot 100\%$, что приведено на рисунке 4.2.

Ширина заходного уклона между деталью и инструментом при одном проходе инструмента может быть оценена по формуле

$$2a = 4 \cdot \sqrt{\frac{P}{HB}} \quad (4.3)$$

где P – нагрузка на индентор,

HB – твердость обрабатываемого материала.

Зависимость (4.3) согласуется с результатами численного моделирования процесса вдавливания ролика в накатываемый материал, представленными в главе 3 (раздел 3.3) работы.

Диаграммы вдавливания роликов различных размеров в координатах: сила P – глубина вдавливания U , представлены на рисунке 4.3. Они приведены в координатах: сила P и ширина заходного уклона $2a$, представленных на рисунке 4.4.

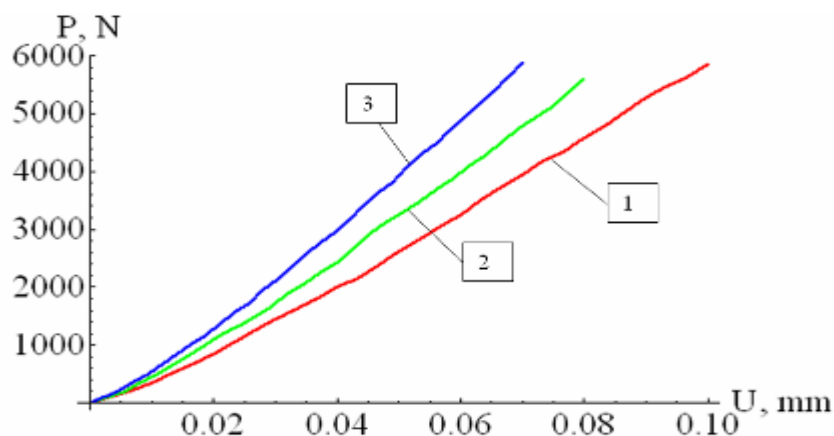


Рисунок 4.3 – Вдавливание ролика (U) с радиусом 1.6 мм(1), 2.5 мм (2) и 4 мм (3) при нагрузке P

На последнем графике изучен интервал нагрузок $\sim 2500 \div 3000$ Н, после которого для всех рассматриваемых размеров ролика диаграммы выглаживаются,

поэтому дальнейшее увеличение нагрузок не анализируется, а нагрузка ~ 2500÷3000 Н принята как базовая.

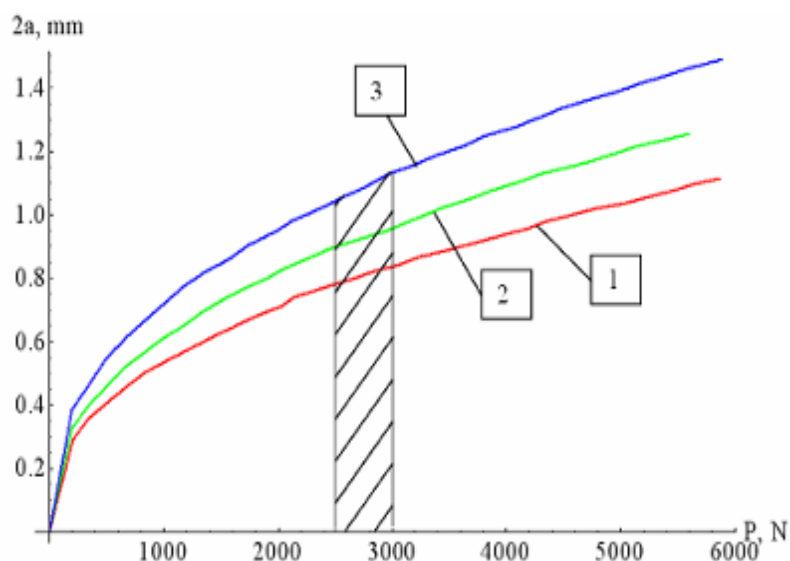


Рисунок 4.4 – Глубина вдавливания ролика с различной шириной заходного уклона и с радиусом 1.6 мм (1), 2.5 мм (2) и 4 мм (3) при рабочей нагрузке P

Глубины вдавливания для каждого из рассматриваемых упрочняющих инструментов при выбранных нагрузках (2500÷3000 Н) представлены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Расчетные значения глубины и ширины заходного уклона при вдавливании упрочняющего элемента в исследуемый материал

R_{DP} , мм	Глубина обработки U_1 , мм	Ширина заходного уклона $2a$, мм
1.6	0.05	0.75
2.5	0.044	0.85
4.0	0.035	1.0

Скорость деформации при обкатке роликом определяется изменением степени деформации в единицу времени. В изучаемом диапазоне деформирования поверхностного слоя она изменяется от 0.0001 до 10000 мм/мин. Влияние

скорости ограничивается тепловыми явлениями, допустимым биением инструмента, жесткостью и точностью применяемого оборудования.

Подача ролика S (рисунок 4.5) выбирается исходя из шероховатости поверхности после обкатки и ширины заходного уклона $2a$. В работе принято соотношение $2a/S=5$.

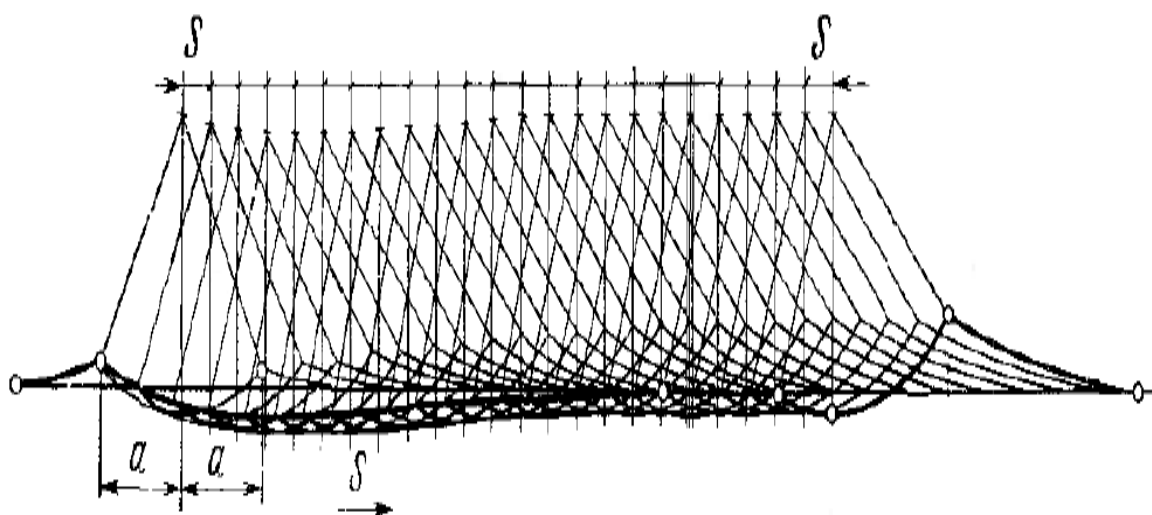


Рисунок 4.5 – Схема накатки с подачей S

Значения ширин заходного уклона $2a$ и максимальных нагрузок для исследуемых роликов при базовых нагрузках $2500\div 3000$ Н представлены в таблицах 4.3 и 4.4.

Таблица 4.3 – Подача роликов

$R_{\text{ПР}}$, мм	$2a$, мм	S , мм
1.6	0.75	$2a/5=0,15$
2.5	0.85	$2a/5=0,17$
4.0	1.0	$2a/5=0,2$

Таблица 4.4 – Максимальные нагрузки на инструмент при накатке

№ режима	Радиус профиля ролика $R_{\text{ПР}}$, мм	Подача S , мм	Глубина вдавливания U_1 , мм	Расчетное усилие			Остаточное смещение $U_{\text{ост}}$, мм
				F_x , Н	F_y , Н	F_z , Н	
1	2.5	0.1	0.044	108	40	2475	0.0244-0.0382
2	2.5	0.15	0.044	100	40	2004	0.022-0.038
3	2.5	0.2	0.044	97	40	2380	0.0197-0.0381
4	4	0.1	0.035	75	35	2255	0.0195-0.0293
5	4	0.2	0.035	70	35	2255	0.0154-0.0296
6	4	0.3	0.035	60	32	2200	0.015-0.0295

В работе выбраны режимы:

$S=0.15$ мм при $R_{\text{ПР}}=2.5$ мм

$S=0.2$ мм при $R_{\text{ПР}}=4.0$ мм.

4.5 Создание средств механизации и автоматизации для выполнения операций с пластическим упрочнением

В [75] предложены метод и автоматизированное устройство (рисунок 4.6) для чистовой обработки с наклепом мест соединения участков, где возможны повреждения сборочных соединений.

На последнем графике изучен интервал нагрузок $\sim 2500 \div 3000$ Н, после которого для всех рассматриваемых размеров ролика диаграммы выглаживаются, поэтому дальнейшее увеличение нагрузок не анализируется, а нагрузка $\sim 2500 \div 3000$ Н принята как базовая.

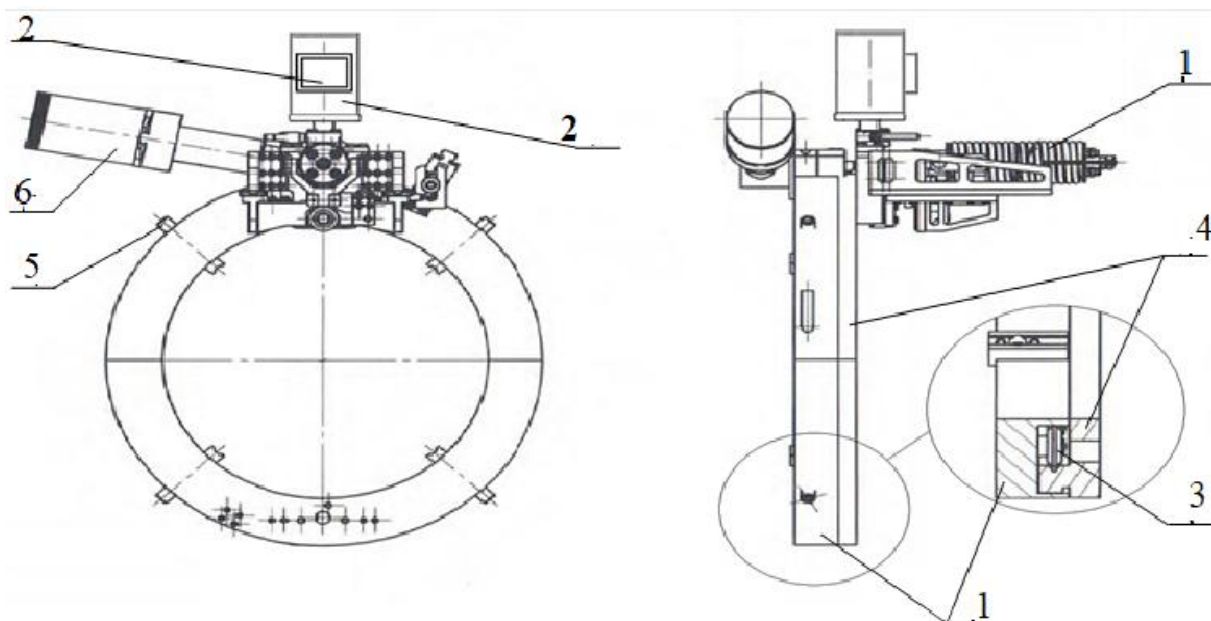


Рисунок 4.6 – Автоматизированное устройство для поверхностного упрочнения методом обкатки труднодоступных участков соединений магистралей.

1 – основание; 2 – блок управления; 3 – направляющие ролики; 4 – планшайба с зубчатым венцом; 5 – опора крепления; 6 – электропривод

Устройство на рисунке 4.6 предназначено для сокращения времени пребывания персонала в потенциально опасной зоне атомных станций при проведении восстановительного ремонта критических зон трубопроводов без остановки технологических процессов ядерных энергетических установок.

Предлагаемый механизм включает узел кругового движения элемента нагружения в форме разъемной конструкции, имеющий блок управления 2; основание 1 с направляющими роликами 3 и планшайбой 4 с зубчатым венцом, опоры крепления 5 и электропривод 6. За счет применения информации из патента [75] была достигнута возможность автоматизации процесса упрочнения зоны повреждения сварных соединений путем установки в конструкцию датчиков положения деформирующего элемента при работе с перемещением его в окружном и осевом направлениях, а также при использовании датчиков усилия на деформирующий ролик и шагового двигателя с регулированием скорости его подачи в пределах зоны упрочнения.

На рисунке 4.7 изображен механизм продольной подачи узла нагружения с деформирующим инструментом при перемещении его вдоль оси трубопровода.

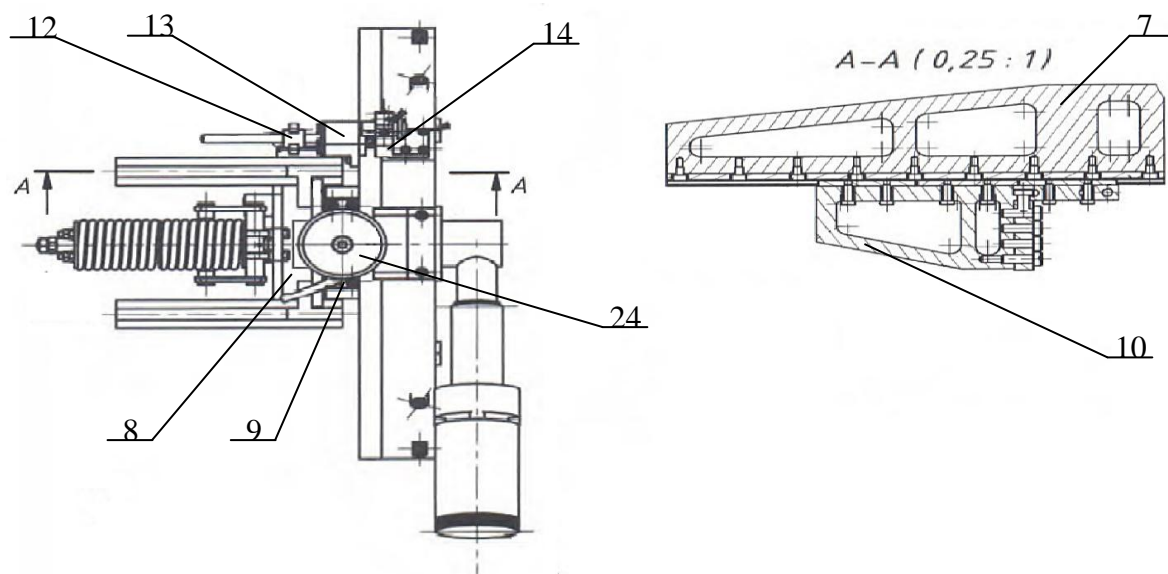


Рисунок 4.7 – Механизм продольной подачи узла нагружения с деформирующим инструментом:

7 – направляющие элементы; 8 – каретка; 9 – механизм радиального перемещения; 10 – кронштейны; 12 – винтовая пара; 13 – зубчатое колесо; 14 – упор; 24 – мотор-редуктор прецизионного позиционирования с шаговым электродвигателем

В предложенной на рисунке 4.7 конструкции был использован реверс перемещения инструмента для автоматической подачи сигналов от датчиков,двигающихся в продольном направлении, управляемых блоком беспроводной передачи и с получением информации по разработанной программе, приведенной в приложении.

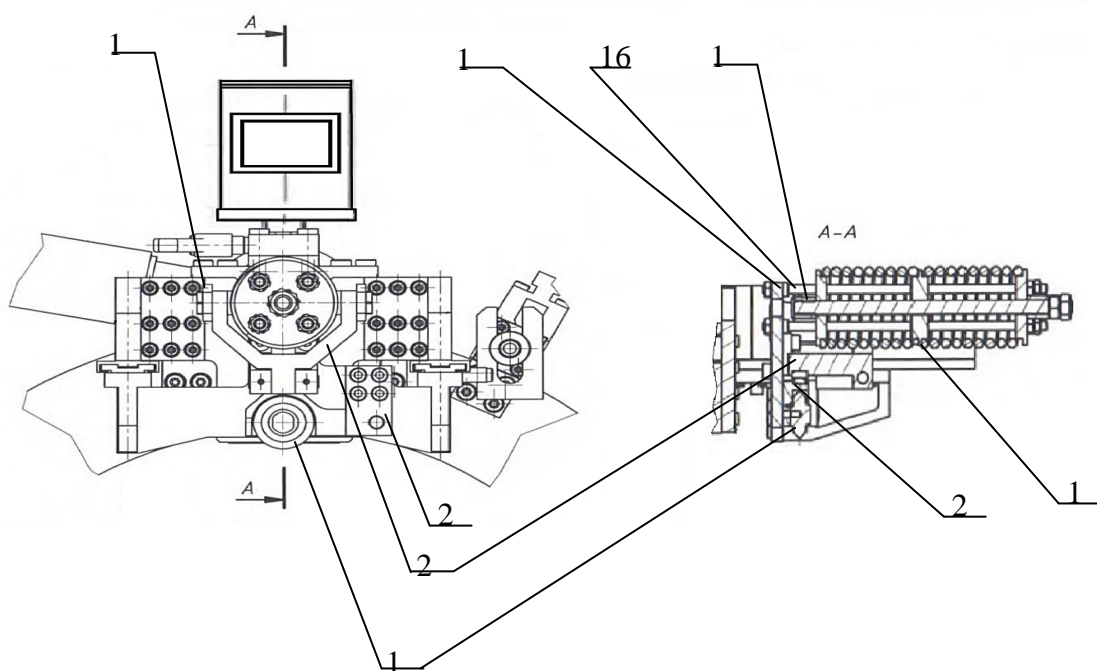


Рисунок 4.8 – Механизм нагружения инструмента с коромыслом тяги силовых пружин:

11 – деформирующий инструмент; 15 – блок силовых пружин; 16 – направляющие; 17 – площадка; 18 – коромысло; 19 – тяги; 20 – двуплечий рычаг; 21 – сферический упор; 22 – рычаг; 24 – мотор-редуктор прецизионного позиционирования с шаговым электродвигателем

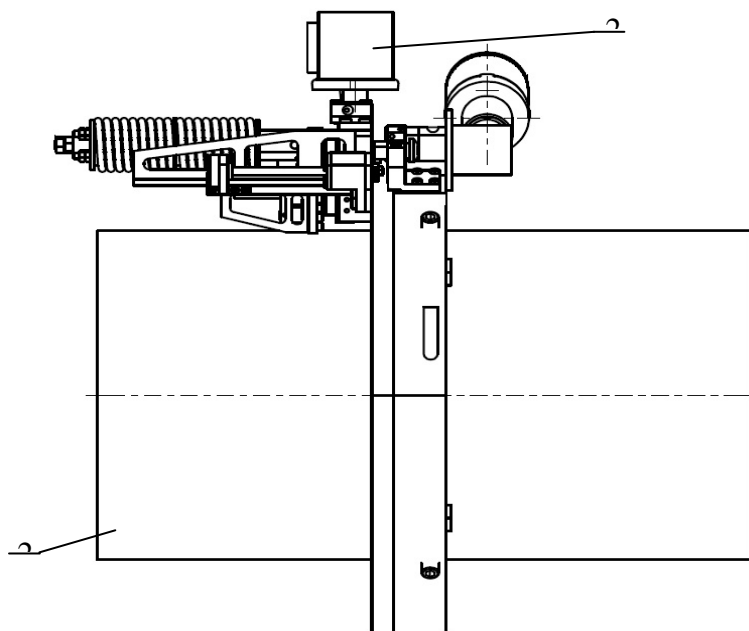


Рисунок 4.9 – Вид на трубопровод и мотор-редуктор прецизионного позиционирования

Устройства на рисунках 4.6 – 4.9 включают механизм кругового движения узла нагружения, который представляет собой разъемную конструкцию и состоит из основания 1 с направляющими роликами 3 и планшайбой с зубчатым венцом 4, опор крепления 5 и электропривода 6. Механизм продольной подачи узла нагружения включает направляющие 7, закрепленные на каретке 8, механизм радиального перемещения 9, на котором установлен (рисунок 4.9) мотор-редуктор прецизионного позиционирования с шаговым электродвигателем 24, закрепленный на механизме радиального перемещения 9, управляемый блоком управления 2 (рисунок 4.6), осуществляющим свою работу автоматически по программе. Блок управления 2 позволяет быстро сделать в автоматическом режиме перенастройку скорости подачи, установку размера зоны обкатки и, при необходимости, выполнить реверс, перемещаясь по направляющим 7. На них установлены кронштейны 10 (рисунок 4.7) с узлом нагружения и деформирующим инструментом (роликом) 11, осевое перемещение которого выполняется винтовой парой 12 с зубчатым колесом 13, перемещающим инструмент до упора 14 на основании 1. Механизм нагружения имеет закрепленные на площадке 17 силовые пружины 15 и направляющие 16.

Усилие от блока пружин 15 (рисунок 4.8) через коромысло 18 и тяги 19 передается двуплечему рычагу 20 на упор 21 рычагу 22 с инструментом 11, датчиками положения деформирующего инструмента в окружном и осевом направлениях и датчиком усилия, управляемым блоком 2 через беспроводную передачу и прием информации по разработанной программе.

Устройство работает следующим образом: на место повреждения трубопровода 23 устанавливаются механизм кругового движения, который крепится внутри основания 1 опорами крепления 5 (рисунок 4.6). От блока управления приводится в действие электропривод 6 и включается вращение механизма кругового движения узла нагружения, что приводит в круговое движение планшайбу с зубчатым венцом 4 по направляющим роликам 3 основания 1. После завершения цикла обкатки мотор-редуктор прецизионного позиционирования с

шаговым электродвигателем 24 осуществляет управляемое движение механизма продольной подачи узла нагружения. Цикл обкатки повторяется до полного прохождения инструмента через зону повреждения, после чего осуществляется радиальное перемещение 9 до получения новой глубины обкатки. Реверс шагового электродвигателя позволяет автоматически выполнять проходы по командам блока управления 2. После выполнения процедуры поверхностного упрочнения поврежденной зоны трубопровода 23 устройство демонтируется и осуществляется контроль остаточных напряжений на детали.

В результате применения автоматизированного устройства стало возможным выполнение ремонта критических зон длинномерных магистралей без остановки технологических процессов ядерных энергетических установок и осуществлять автоматизацию процесса упрочнения трубопроводов по сигналам обратной связи от датчиков положения инструмента в окружном и осевом направлениях; датчика усилия на деформирующем инструменте с использованием мотор-редуктора прецизионного позиционирования с шаговым электродвигателем, блока управления и беспроводной передачи и приема информации, осуществляющим работу с помощью программы.

Использование устройства, эффективность которого обоснована по принципу полезности, позволило до полутора раз расширить межремонтный период функционирования агрегатов выработки энергии атомной станции и за счет его расширенного применения в авиакосмическом машиностроении в целом получить многомиллионный экономический эффект.

Выводы по главе

1. Создана процедура научно обоснованного выбора и необходимости создания комбинированных технологических процессов с управляемым процессом механического упрочнения поверхностного слоя по критерию полезности, обеспечивающего заданные численные показатели объектов производства авиакосмической и энергетической техники. Работа выполнена для совершенствования изделий на стадиях их создания, модернизации, освоения в

серийном производстве, при ремонте и регламентном обслуживании трансмиссий и магистралей. Положительные результаты достигнуты путем изменения эксплуатационных свойств металлических материалов при комбинированной обработке внутренних и наружных поверхностей типовых элементов трансмиссий и магистралей, что обеспечивает на стадии отработки производственной технологичности согласование эксплуатационных свойств, полученных в производстве, с уровнем, заданным разработчиком, численно оцениваемым по предложенному принципу полезности и обеспечивающим получение требуемого качества изделия.

2. Предложен, новый способ и устройство для автоматизации процессов контроля и упрочнения магистралей атомных станций. Аналогичные операции могут автоматически выполняться при ремонте трансмиссий в транспортном и общем машиностроении. Их назначение делается по результатам оценки эффективности с использованием критерия полезности. Это обеспечивает возможность научного обоснования необходимости, объема, стоимости выполнения научных и производственных исследований, опыта эксплуатации и для реализации результатов разработки процессов с упрочнением поверхностного слоя с использованием требуемого сочетания механических, тепловых, химических и лучевых физико-технических воздействий.

Глава 5 Проведение комплексных испытаний результатов применения КМО с упрочнением для научного обоснования повышения качества перспективных изделий авиакосмической и энергетической атомной отраслей машиностроения

5.1 Обеспечение требуемой твердости поверхностного слоя после упрочнения

5.1.1 Твердость поверхностного слоя

Одним из значимых эксплуатационных показателей узлов привода и магистралей, оцениваемых при отработке производственной технологичности по критерию полезности, является достижение требуемой твердости поверхностного слоя после упрочнения, определяющего возможности комбинированных методов обработки по повышению качества, износостойкости, ресурса и надежности изделий. Для этого проводилось сравнение показателей твердости исходной и обработанной поверхности после измерения параметра твердомером с записью диаграмм индентирования и визуализацией полученных отпечатков.

Измерение твердости легированных сталей после комбинированной обработки с упрочнением для трансмиссий транспортных машин приведены в [109], а для ряда материалов магистралей энергетического машиностроения проводились на образцах из наиболее востребованной углеродистой стали перлитного класса 10ГН2МФА с аустенитной наплавкой (плакирующий слой) из материала 08Х19Н10Г2Б, на примере композитного сварного соединения дыхательного трубопровода энергоблока НВАЭС. Результаты испытаний приведены в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Результаты измерений твердости по Виккерсу (HV30)

Поверхность стали	HV30	Среднее значение HV30
Исходная	193; 187; 188; 189; 189.	189,2
Однопроходная упрочняющая обработка комбинированного технологического процесса	227; 224; 228; 222; 226.	225,4
Двухпроходная обработка	228; 226; 228; 233; 228.	228,6

По результатам исследований образцов и опыту применения комбинированных методов обработки с использованием электрических, магнитных полей и упрочняющего воздействия [116] была создана уточненная модель для описания механизма упруго-пластической деформации материала при различных режимах нагружения путем варьирования глубины упрочнения до момента совпадения по толщине распределения остаточных напряжений. Они получены при комбинированной обработке с наклепом, установленным экспериментально ступенчатым рассверливанием (рисунок 5.1), позволяющим создать картину распределения напряжений по глубине материала [129] с использованием позиционирования оси сверла с центром розетки тензорезисторов (рисунок 2.9).

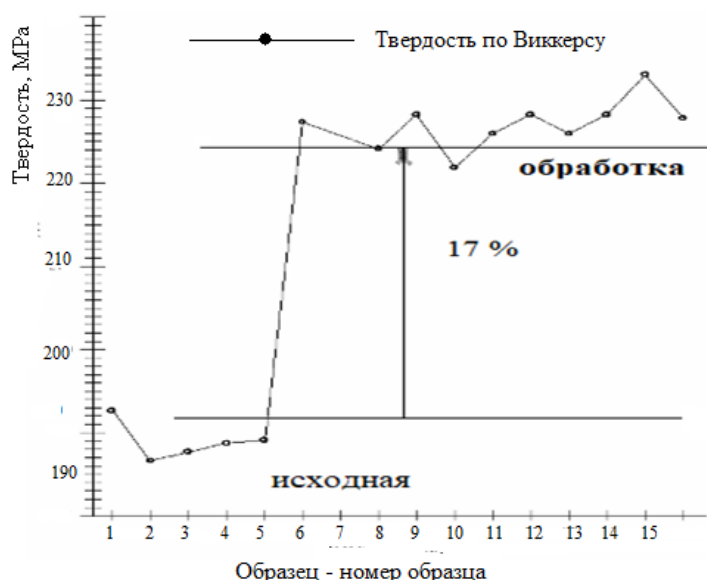


Рисунок 5.1 – Экспериментальные результаты измерения твердости

По результатам измерения твердости можно сделать заключение, что для однопроходного и двухпроходного режима они отличаются незначительно и повторный проход экономически не оправдан. При сравнении результатов упрочнения по твердости исходной и обработанной поверхности разница средних значений составляет около 17 %, что дает значительный эффект по повышению качества и работоспособности изделий в авиакосмическом, энергетическом и общем машиностроении.

5.1.2 Микротвердость Для анализа свойств поверхностных слоев после упрочнения более детальные результаты дает измерение микротвердости, которое позволяет установить послойную степень наклепа слоев и обосновать по этому показателю наиболее выигрышный и технологичный вариант мероприятия, а также обосновать эффективность нанесения упрочняющих покрытий. Такие исследования в нашем случае выполнялись на полуавтоматическом твердомере Zwick ZHV10 (гл.2), результаты которых для рассматриваемого случая приведены в таблице 5.2.

Таблица 5.2 – Результаты измерения микротвердости HV0,2 образцов после упрочнения

Измеряемая зона образца, мкм, от границы обработанной поверхности	HV0,2	Среднее значение HV0,2
Исходная область металла	207; 210; 212; 212; 210	210±2
60	231; 229; 243; 233; 229	233±6
210	230; 223; 228; 225; 226	227±3
360	228; 217; 218; 232; 223	224±6
510	204; 206; 212; 207; 215	209±5

Анализ твердости (таблица 5.1) и микротвердости в таблице 5.2 позволяет обосновать ресурс и назначать периоды работоспособности изделий при регламентном и аварийном обслуживании в условиях их эксплуатации, выполнять научно обоснованные заключения о необходимости пересмотра и об изменении

микроструктуры изучаемого материала. Анализом установлена практически полная идентичность микроструктуры под зоной обработанной поверхности по сравнению с исходной, что доказывает правомерность использования численных показателей критерия полезности при проведении процедуры отработки производственной технологичности.

В таблице 5.2 получены результаты, подтверждающие эффективность комбинированной обработки с механическим упрочнением. Изучены пластические методы с постоянным (внутренние поверхности трансмиссий и обкатка) и импульсным (обработка ЭЦ) воздействием. Для этого по методике, приведенной в главе 2, способом кинетического индентирования шара диаметром 1мм сняты многоцикловые диаграммы. Одна из них (рисунок 5.2) построена по результатам измерения 3 вдавливания в материал, обработанный в 1 (1П) и в 2 прохода (2П), Она достаточно точно раскрывает достоинства механизма одноосного растяжения, показанного на рисунке 5.2, относительно исходного (И) материала. Здесь анализ результатов испытаний служит убедительным доказательством возможности использования при КМО одноразового прохода для упрочнения всех участков стальных трансмиссий и магистралей, когда достигается значительный выигрыш по времени выполнения испытаний и затратам на них, что существенно влияет на конкурентоспособность изделий в машиностроении.

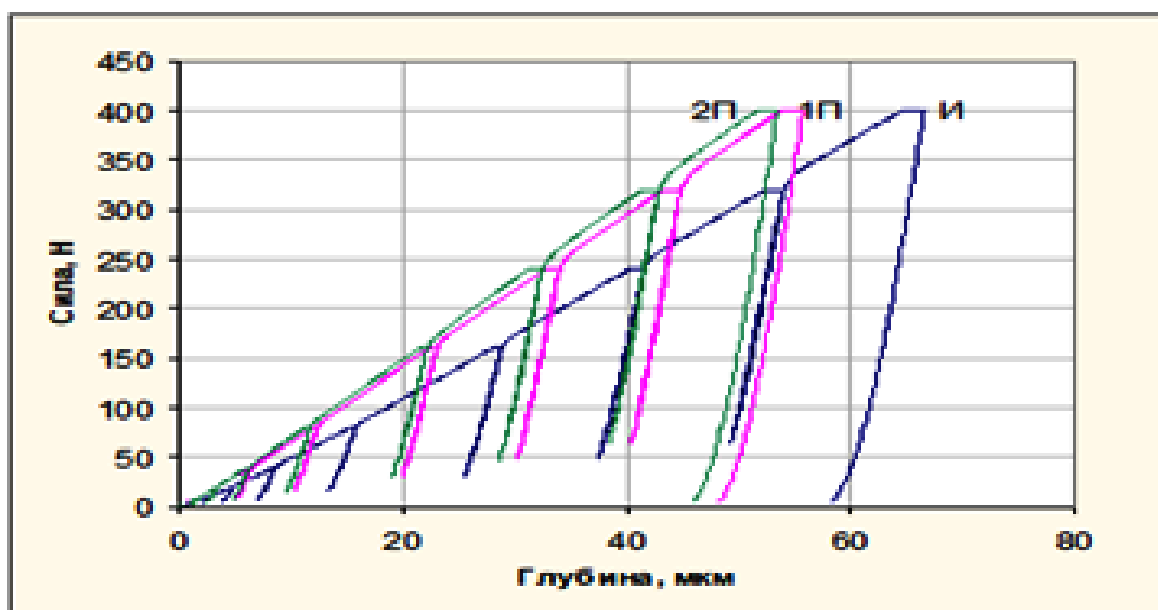


Рисунок 5.2 – Динамика индентирования шара в глубину участков упрочненных стальных образцов

5.2 Остаточные напряжения

В остаточных напряжениях перед упрочнением и после проведения операции комбинированной обработки их знак определяет работоспособность, эксплуатационные характеристики изделий и целесообразность использования упрочнения для изучаемых объектов производства. Они увеличиваются до определенного требуемого предела, а выше – возможно повреждение и разрушение материала.

Остаточные напряжения зависят от свойств и состояния материала перед обработкой. Они изменяются от режимов упрочнения и по глубине слоя, что определяет уровень производственной технологичности изделия и назначение воздействий в операцию.

Картини распределения остаточных напряжений по глубине материала при пластическом упрочнении представлены на рисунке 5.4.

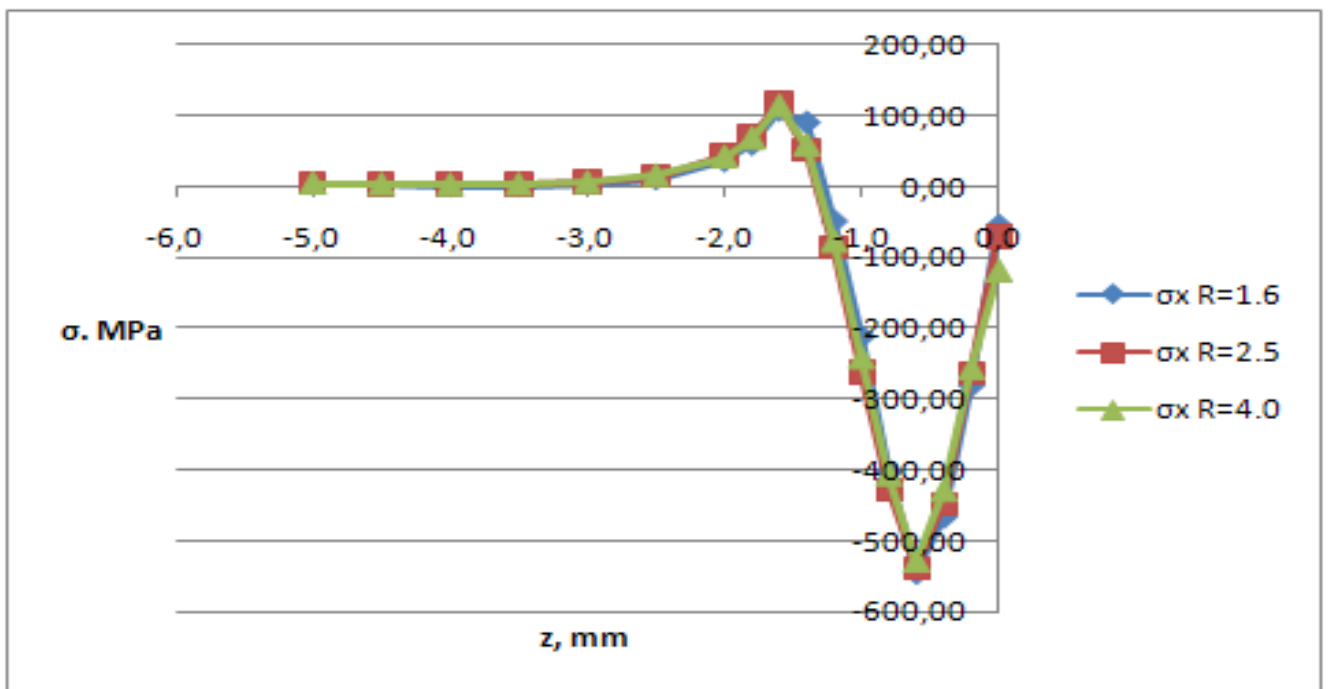


Рисунок 5.4 – Распределение остаточных напряжений по глубине

Испытания на рисунке 5.4 проводились индентором с радиусом скругления рабочей части 1,6; 2,5 и 4 мм. Установлено незначительное влияние геометрии

инструмента, что создает базу для оценки результатов испытаний различными независимыми исполнителями и расширяет область доказательства правомерности полученных результатов. Упрочнение дает возможность существенного (до 1,3 раз) уменьшения времени процесса испытаний.

5.3 Усталостная прочность и долговечность изделий

Основным положительным эффектом пластического упрочнения является увеличение усталостной прочности и долговечности изделий. В материалах с низким пределом текучести, используемых в трансмиссиях и магистралях, повышение усталостной прочности происходит главным образом за счет упрочнения. Сопутствующее процессу значительное повышение температуры может приводить к снижению остаточных напряжений сжатия, особенно вблизи поверхности [129]. Деформационное упрочнение имеет более стабильный характер изменения и даже при значительной релаксации остаточного напряжения сжатия срок службы изделий при усталостных нагрузках может оставаться достаточно большим.

Причинами увеличения усталостной прочности и долговечности упрочнением являются:

1. Снижение степени локальной пластической деформации, предотвращающей перемещение дислокаций, что уменьшает вероятность возникновения трещин;
2. При упрочнении снижается возможность раннего роста мелких трещин, которые появляются в приповерхностном слое;
3. Тонкая микроструктура препятствует образованию трещин.

Для сталей с высокими значениями предела текучести применение деформационного упрочнения ограничено, поэтому здесь управление процессом увеличения усталостной прочности и долговечности выполняется через остаточные напряжения.

При изучении метода пластического упрочнения было установлено, что при более низкой шероховатости поверхности происходит замедление образования трещин и повышение долговечности. Кроме того возможен перенаклеп, вызывающий отслаивание материала и нарушение характеристик изделия.

По результатам испытания образцов и опыту применения комбинированных методов обработки с использованием электрических, магнитных полей и упрочняющего воздействия [116] была создана уточненная модель для описания механизма упруго-пластической деформации материала при различных режимах нагружения путем варьирования глубины упрочнения до момента совпадения по толщине распределения остаточных напряжений, полученных при комбинированной обработке с наклепом, выполненным экспериментально ступенчатым рассверливанием, позволяющим создать картину распределения напряжений по глубине материала [136] с использованием тензорезисторов.

Исследуемые материалы применены в высоконагруженных конструкциях приводов авиакосмических аппаратов и на магистралях энергетических систем в условиях многократных импульсных механических нагрузок, осложненных тепловыми, магнитными и другими воздействиями, поэтому для установления ресурса и межремонтного цикла требуется провести усталостные испытания, которые осуществляются в авиакосмическом машиностроении на базе $2 \cdot 10^7$ циклов [109, 135], а в энергетической отрасли допускается проведение ускоренных испытаний на базе $3 \cdot 10^5$ и при другом количестве циклов. Результаты приведены на рисунке 5.5 и доказывают полезность для всех отраслей машиностроения мероприятий по отработке производственной технологичности с использованием комбинированных методов обработки металлических материалов с упрочняющими воздействиями и с численной оценкой их эффективности по критерию полезности [103, 87].

На рисунке 5.5 приведены осредненные результаты испытаний конструкционных легированных сталей типа 40ХНМА, 30ХГСА и др., преимущественно используемых в силовых приводах летательных аппаратов и их двигателях, Аналогичные сплавы применяются на магистралях в авиакосмическом машиностроении. В магистралях атомных станций используются в основном высоколегированные углеродистые стали типа 10ГН2МФА.

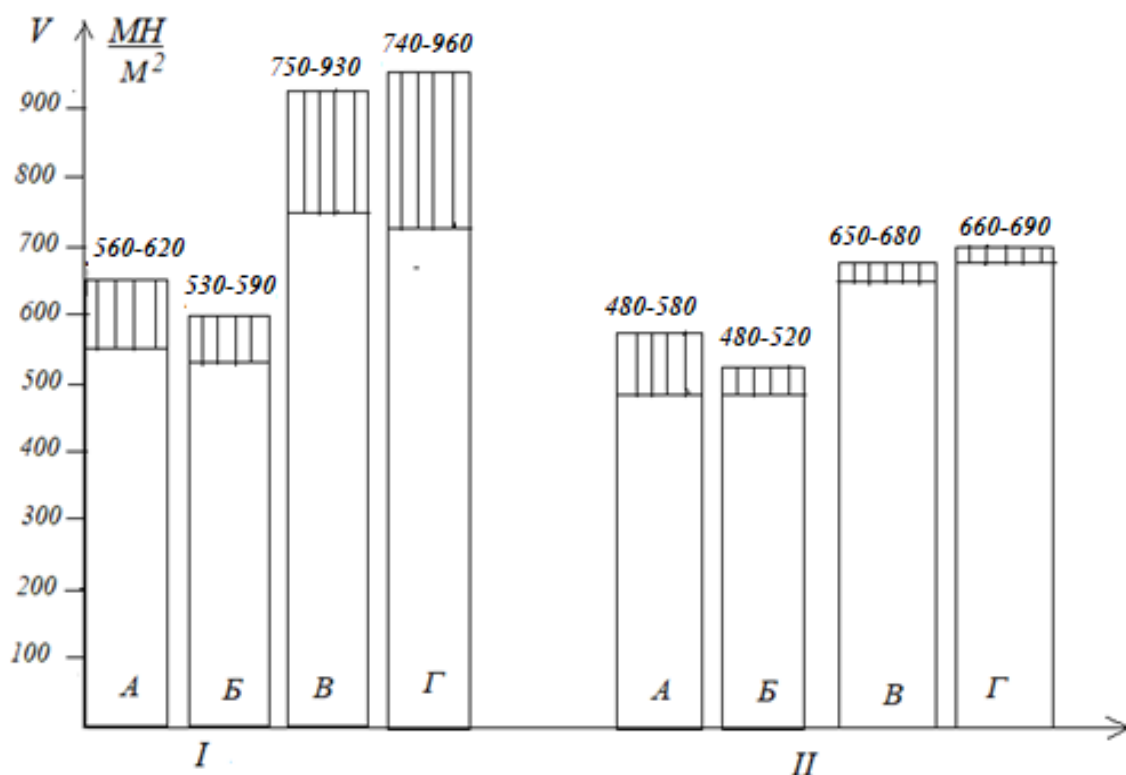


Рисунок 5.5 – Предел прочности (V) стальных/образцов при усталостных испытаниях на изгиб с кручением

I – Конструкционные легированные стали при испытании на базе $2 \cdot 10^7$ циклов;

II – Углеродистые и специальные стали после ускоренных испытаний на базе $5 \cdot 10^5$ циклов.

A – механическая обработка (шлифование) (МО);

Б – комбинированная эрозионно-химическая обработка (КМО) без упрочнения;

В – МО с ударным механическим поверхностным упрочнением (например, электродом-щеткой);

Г – КМО с постоянным механическим упрочнением поверхностного слоя

Испытания материалов для приводов на базе $2 \cdot 10^7$ циклов после комбинированной обработки (КО) с упрочнением не выявили существенных преимуществ известных комбинированных способов. Общий эффект по усталостной прочности для всех вариантов испытаний находится примерно на одном уровне. Нижняя граница предела выносливости в вариантах 1, В и Г практически полностью совпадает (явно находится в зоне разброса результатов испытаний), что подтверждает целесообразность использования в применяемых методах КО механических воздействий для управляемого упрочнения, назначаемого по численным оценкам критерия полезности.

Сопоставление результатов ускоренных испытаний на циклическую прочность исходных образцов и их аналогов по использованию, подвергнутых упрочнению (на рисунке 5.5, П) показало значительное повышение долговечности образцов обеих серий (более, чем в 10 раз), полученное при базе испытаний $N = 3,05 \cdot 10^4$ циклов для исходных и $N = 3 \cdot 10^5$ циклов для образцов, подвергнутых управляемому наклепу на глубину до 0,05-0,08 мм. При этом наблюдаемые в случае П, А, Б подповерхностные микротрещины и растравливания полностью устранялись, что даже при ускоренных испытаниях давало возможность пересмотреть ресурс магистралей в сторону его увеличения.

Для подтверждения полученных закономерностей механизма упрочнения при усталостных испытаниях комбинированными методами были изготовлены и испытаны партии образцов, часть которых прошла упрочнение по предложенной технологии. Полученные результаты по амплитудным напряжениям (рисунок 5.6) убедительно доказали правомерность полученных результатов для всех случаев комбинированной обработки при всех вариантах доступа инструмента в зону обработки.

Из рисунка 5.6 видно, что после упрочнения пластическим (ППД) методом образцов из материалов с $\sigma_a = 194-208$ МПа, используемых в атомной отрасли, они имеют преимущество по долговечности более чем в 10 раз:

$N = 3,05 \cdot 10^4$ циклов для исходных и $N = 3 \cdot 10^5$ циклов после упрочнения. Следует отметить, что в образцах после упрочнения, прошедших базу испытания, трещин

выявлено не было. Таким образом, доказана возможность увеличения усталостных характеристик материалов более чем в 17 раз по сравнению с исходными показателями.

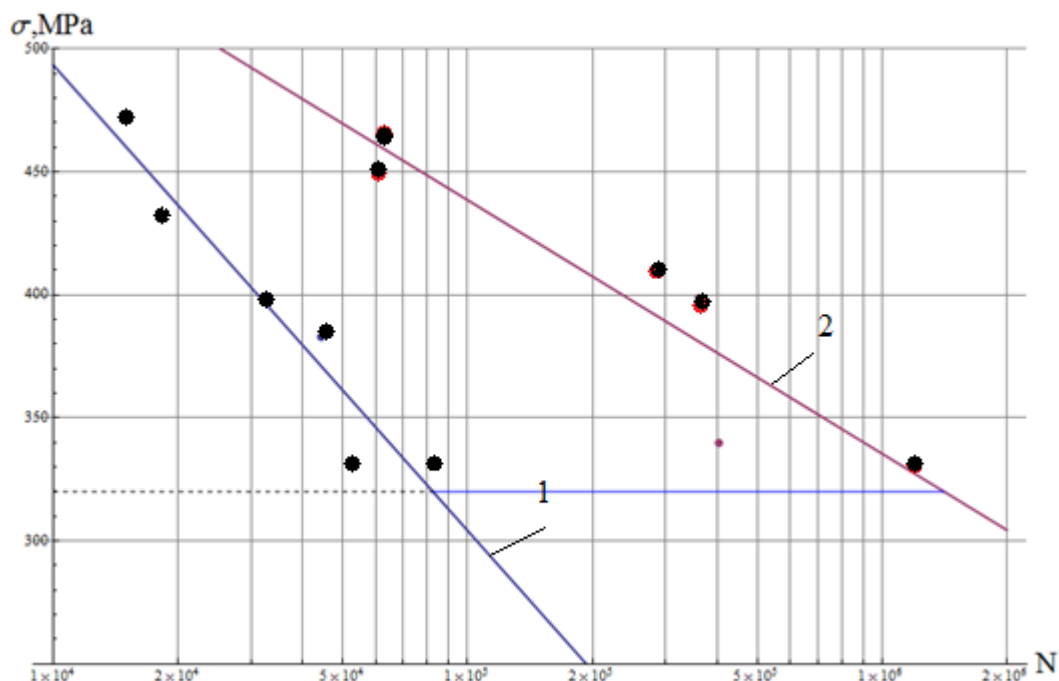


Рисунок 5.6 – Амплитудные напряжения для исходных (1) и упрочненных (2) образцов

Полученный результат подтверждает правомерность полученных технико-экономических показателей для других случаев оценки усталостной прочности и долговечности

Выводы по главе

1. Проведенные исследования и испытания базовых материалов для наукоемкого машиностроения показали обоснованность применения метода производственной технологичности при назначении физико-технических воздействий и механического пластичного упрочнения, обеспечивающих возможность повышения качества, ресурса, межремонтного периода и

восстановление работоспособности продукции, в том числе в единичном и мелкосерийном производстве.

2. Результаты проведенных испытаний подтвердили эффективность изученных вариантов пластического упрочнения материалов, используемых в наукоемких отраслях машиностроения, в том числе для объектов производств, имеющих ранее труднопреодолимые ограничения для осуществления технологических операций.

3. Подтверждены технико-экономические достоинства применения 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

С учетом требований к условиям эксплуатации авиакосмической и энергетической техники на базе критереальной 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 обработками с упрочняющими технологиями путем эффективного воздействия на наиболее нагруженные концевые и стыковочные участки длинномерных 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.

Из анализа результатов исследований сформированы выводы:

1. Выполнены исследования механизма и на базе нового подхода к проектированию технологического процесса обработки приводов с базированием объектов от внутренней поверхности 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 чистой 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 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 к оборудованию для КМО с целью использования их 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 от 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 изделий.

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.

Список литературы

1. Аверченков В.И. Автоматизация проектирования технологических процессов // Брянск: БИТМ, 1984 – 83 с.
2. Авторское свидетельство №875745 Электрод-инструмент для электрохимической обработки / А.А. Габагуев, З.Б. Садыков, В.П. Смоленцев, // 1981. – Бюл. изобр. № 18.
3. Авторское свидетельство № 914227. Способ электрохимической обработки / В.П. Смоленцев, З.Б. Садыков, И.М. Шаршаков, Т.П. Литвин // 1982, Бюл. изобр. № 11.
4. Авторское свидетельство № 1146155. Головка для электрохимикомеханической обработки / М.И. Чижов, В.П. Смоленцев // 1985. – Бюл. изобр. № 11.
5. Аддитивные технологии изготовления инструментов для комбинированных методов обработки / В.П. Смоленцев, Н.Н. Ненахов, А.А. Извеков, И. Г. Стародубцев // Научные технологии в машиностроении. – 2022. – № 7 (133). – С. 3-8.
6. Антипов Е.Л. Исследование и разработка комбинированного электроабразивного шлифования деталей авиадвигателя с циклическим восстановлением геометрии рабочей поверхности инструмента / Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. // М: НИИТ, 1986. – 26 с.
7. Альбом течений жидкости и газа: Пер. с англ. / Сост. М. Ван-Дейк // М.: Мир, 1986. – 184 с.
8. Алямовский А.А. SolidWorks. Компьютерное моделирование в инженерной практике / А.А. Алямовский, А.А. Собачкин, Е.В. Одинцов, А.И. Харитонович, Н.Б. Пономарев // СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 800 с.
9. Бабичев А.П. Основы вибрационной технологии / А.П. Бабичев, И. А. Бабичев // Ростов-на-Дону: Изд. центр ДГТУ, 1998. – 624 с.
10. Безъязычный В.Ф. Метод подобия в технологии машиностроения / В.Ф. Безъязычный. // М.: Машиностроение, 2012. – 320 с.

11. Бердник В.В. Шлифование токопроводящими кругами с наложением электрического поля // Киев: «Виша школа», 1984. – 124 с.
12. Бондарь А.В. Качество и надежность // М.: Машиностроение, 2007. – 326 с.
13. Вайнер Л.Г. Технологическое управление абразивной обработкой на основе моделирования процессов формообразования // Известия ВолгГТУ. – № 2. – 2018. – С. 7 – 20.
14. Воробей В.В. Технология производства жидкостных ракетных двигателей: учебник / В.В. Воробей, В.Е. Логинов // М.: Изд-во МАИ, 2001. – 496 с.
15. Высокоскоростное анодное растворение в условиях нестационарности электродных потенциалов / Зайцев А.Н., Житников В.П., Идрисов Т.Р. и др.; под ред. А.Н. Зайцева // Уфа: Гилем, 2005 – 220 с.
16. Газизуллин К.М. Электрохимическая размерная обработка крупногабаритных деталей в пульсирующих рабочих средах: Научное издание // Воронеж: Воронежский государственный университет, 2002. – 243 с.
17. Газизуллин К.М. Влияние температурного фактора при электрохимической размерной обработке на точность формообразования // Металлообработка. – 2002. – №2. – С. 11-12.
18. Гостев В.В. Алмазно-электролитическое и шлифование твердых сплавов // Харьков: «Виша школа», 1974 – 127 с.
19. Гостев В.В. Алмазно-электролитическое и шлифование твердых сплавов // Харьков: «Виша школа», 1974 – 127 с.
20. Григорянц А.Г. Основы лазерной обработки материалов // М: Машиностроение, 1989. – 304 с.
21. Гурвич Р.А. Алмазно-электролитическая обработка твердосплавного волочильного и холодновысадочного инструмента // Киев: Техника. 1992. – 142 с.
22. Долгих А.М. Основы абразивной обработки деталей в электрическом поле с биполярным электродом: автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук: А.М. Долгих. – Саратов, 2000 – 31 с.

23. Жачкин С.Ю. ГМХ как метод повышения физико-механических свойств хромовых покрытий при восстановлении деталей хромированием / С.Ю. Жачкин, В.П. Смоленцев // Новые процессы и оборудование для нанесения покрытий: тез. докл. семинара. – Крым, 1991. – С. 33-34.

24. Жачкин С.Ю. Холодное гальваноконтактное восстановление деталей / Воронеж : ВГТУ, 2002. – 138 с.

25. Иванов В.В. Вибрационные механохимические методы нанесения покрытий // Ростов-на-Дону: Издательский центр ДГТУ, 2007. – 140 с.

26. Извеков А.А., Смоленцев В.П., Кириллов О.Н. Пути совершенствования качества наукоемких изделий комбинированными методами // Наукоемкие технологии в машиностроении. – 2024. – № 9 (159). – С. 14-24.

27. Извеков А.А., Смоленцев В.П., Мандрыкин А.В. Стабилизация остаточных напряжений для повышения точности деталей / А.А. Извеков, В.П. Смоленцев, А.В. Мандрыкин // Справочник. Инженерный журнал.– 2026. – № 1.– С. 28-33.

28. Инженерные основы авиационной химмотологии : [монография] / [Л. С. Яновский и др.; науч. ред. В. Е. Алемасов]; М-во образования и науки Рос. Федерации, Федер. агентство по образованию, Казан. гос. техн. ун-т, Казан. гос. технол. ун-т. — Казань : Изд-во Казан. ун-та, 2005. — 713 с.

29. Каримов А.Х. Методы расчета электрохимического формообразования / А.Х. Каримов, В.В. Клоков, Е.И. Филатов // Казань: Из-во Казанского университета. 1990. – 388 с.

30. Кириллов О.Н. Технология комбинированной обработки непрофилированным электродом // Воронеж: ВГТУ, 2010. – 254 с.

31. Киричек А.В. Технология комбинированного упрочнения волной деформации и цементацией конструкционных низколегированных сталей / А.В. Киричек, Д.Л. Соловьев, С.А. Силантьев // Наукоемкие технологии в машиностроении. – 2017. – №8. – С. 30-35.

32. Клоков В.В. Аналитическое исследование стационарного размерного электрохимического формообразования / Современная электротехнология в машиностроении: сб. тр. ВНТК. – Тула: ТГУ, 1997. – С.42-45.

33. Коваленко В.С. Технология и оборудование электрофизических и электрохимических методов обработки материалов // Киев, «Вища школа», – 1983. – 176 с.

34. Коденцев С.Н. Технологический контроль качества комбинированной обработки деталей транспортных машин / С.Н. Коденцев, Е.Г. Сухочева // Перспективные технологии, транспортные средства и оборудование при производстве, эксплуатации, сервисе и ремонте: Межвуз. сб. науч. тр. – Воронеж: ВГЛТА, 2006. – Вып. 1. – С. 97 – 100.

35. Комбинированные методы обработки Учебное пособие. / Под ред. В.П. Смоленцева // Воронеж: ВГТУ, 2024. – 91 с.

36. Коровин А.А. Изготовление теплообменных профилей для изделий, работающих с газожидкостными рабочими средами : автореферат диссертации на соискание учёной степени кандидата технических наук: / А.А. Коровин, – Воронеж, 2012. – 123с.

37. Коровин А.А. Эффективные методы получения каналов охлаждения на поверхностях деталей жидкостных ракетных двигателей // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2011. Т. 7, № 11.2. – С. 29-32.

38. Кузовкин А.В., Садыков З.Б., Смоленцев В.П. Выбор рабочих сред для обработки рассыпающимся катодом / Технологические проблемы производства летательных аппаратов и двигателей: тез. докладов научно-техн. конф. – Казань: КГТУ, 1993. – С. 41.

39. Лилин С.А. Научные и прикладные аспекты применения водно-органических водных растворов электролитов для анодной электрохимической обработки металлов и сплавов : автореф. диссертации на соискание ученой степени д-ра техн. наук. / С.А. Лилин – Тамбов, ТГУ, 2001. – 38 с.

40. Львович И.Я. Вариационное моделирование и оптимизация проектных решений // Воронеж: Из-во ВГТУ, 1997. – 114 с.

41. Маннапов А.Р., Зайцев А.Н. Технологические показатели электрохимического формирования вставок щёточных уплотнений / А.Р. Маннапов, А.Н. Зайцев // Вестник УГАТУ. Уфа. – 2008. – Т. 11, № 2 (29). – С. 131-138.

42. Мелькумов Т.М. Ракетные двигатели / Т.М. Мелькумов, Н.И. Мелик-Пашаев, П.Г. Чистяков, А.Г. Шуиков // М.: Машиностроение, 1976. – 400 с.

43. Мельничук А.Ф. Формирование пористой структуры в изделиях на основе железа и титана с заданными физико-механическими и эксплуатационными свойствами : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. / А.Ф. Мельничук – Комсомольск на Амуре: КнАГТУ, 2009 - 24 с.

44. Мигай В.К. Моделирование теплообменного энергетического оборудования // Л.: Энергоатомиздат, 1981. – 263 с.

45. Моделирование распределения тока при электрохимической обработке и нанесении покрытий с использованием подвесочной оснастки: Учебное пособие / И.Н. Андреев, Ж.В. Межевич, К.А. Зотеев // Казань: Казан. гос. технол. ун-т. – 2006.– 122 с.

46. Мордехай В.М. Технологические особенности контактных комбинированных электрофизических и электрохимических методов обработки // Вопросы авиационной науки и техники: сб. научных тр. Москва : ЦИАМ.,1990. – Вып. 1. – С.24-29.

47. Мухин В.С. Поверхность: технологические аспекты прочности деталей ГТД / М.: Наука, 2005. – 296 с.

48. Назаров Ю.Ф. Нанотехнология в производстве РКТ / Ю.Ф. Назаров, В.В. Булавкин, В.В. Курченко // Аэрокосмическая техника и технология. – 1988. – № 4,

49. Нгуен Мань Тием. Повышение качества плоского шлифования деталей из высокопрочных коррозионностойких сталей высокопористыми нитридборовыми кругами // автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. / Нгуен Мань Тием. – Иркутск: ИрННТУ, 2017. – 20 с.

50. Научно-технические технологии в машиностроении. / Под ред. А.Г. Суслова // М.: Машиностроение, 2012. – 528 с.

51. Норман А.В. Конструкции форсунок и технологии их комбинированной обработки / А.В. Норман, В.П. Смоленцев, Е.А. Салтанаева, М.Г. Поташников // Современные технологии производства в машиностроении. Межвуз. сб. научн. тр. – Воронеж: Научная книга, 2021. – Вып. 14. – С. 105 – 112.

52. Норман А.В. Методика проектирования комбинированного электрода-инструмента аддитивными методами // А.В. Норман, А.В. Кузовкин, А.П. Суворов, М.Г. Поташников // Современные технологии производства в машиностроении. Межвуз. сб. научн. тр. – Воронеж: Научная книга, 2021. – Вып. 14. – С. 135 – 142.

53. Носенко В.А. Технология шлифования металлов / В.А. Носенко С.В. Носенко // Ст. Оскол: ТНТ, 2017. – 613 с.

54. Носов Н.В. Новый метод шлифования сквозных отверстий в условиях ограниченной жесткости технологической системы / Н.В. Носов, А.Ф. Денисенко // Современные технологии в машиностроении и литейном производстве: М-лы IV Межд. н-т. конф. – Чебоксары: ЧГУ им. И.Н. Ульянова, 2019. – С. 388-393.

55. Петров Ю.Н. Основы повышения точности электрохимического формообразования / Ю.Н. Петров, Г.Н. Корчагин, Г.Н. Зайдман, Б.П. Саушкин // Кишинев: Из-во «Штиинца», 1977. – 152 с.

56. Паничев Е.В. Комбинированная чистовая обработка переходных участков металлокерамических покрытий с диэлектрическими гранулами: Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Паничев Евгений Владимирович – Воронеж: ВГТУ, 2020 - 145 с.

57. Паничев Е.В. Подготовка поверхности под нанесение жаростойкого покрытия // Е.В. Паничев, В.П. Смоленцев // Упрочняющие технологии и покрытия – 2019. – Т.15, №11. – С 517-522.

58. Паничев Е.В. Способы и технологические приемы для создания системы охлаждения горячей зоны тепловых двигателей / Е.В. Паничев, В.П. Смоленцев, А.В. Щеднов // Справочник. Инженерный журнал. – 2000. – №10 – С.10-14.

59. Патент на полезную модель № 119663 Российская Федерация, МПК 23Н 11/00 (2006.01) Имитатор для определения оптимальных технологических режимов при получении турбулизаторов в каналах охлаждения электрохимическим методом: опубликовано 28.08.2012 / Смоленцев В. П., Коптев И. Т., Коровин А. А., Климова Г. Н.; – Бюл. № 24, - 2 с.

60. Патент на полезную модель № 135561 U1 Российская Федерация, В23Н7/36, В23Н11. Высоконапорное устройство для подачи рабочей среды: опубл. 20.12.2013 / В.П. Смоленцев, С.В. Сафонов, Е.В. Смоленцев; – Бюл. изобр. № 35.– 1 с.

61. Патент №1797533 Российская Федерация, В23Н 7/36 (2000.01) Способ электрообработки вращающимся электродом-инструментом: опубл. 23.02.1993 / В.П. Смоленцев, О.Н. Кириллов, С.В. Кретинин, Б.А. Голоденко; Бюл. изобр. № 7.

62. Патент № 2191664 Российская Федерация. В23Н 5/06 (2000.01). Устройство для электрохимикомеханической обработки: опубл. 27.10.2002 / В.П. Смоленцев, Г.П. Смоленцев, В.Ю. Склокин, – Бюл. № 30 – 5 с.

63. Патент № 2257981 Российская Федерация, Способ электрохимической обработки: № 2004107811/02: опубл. 10.08.2005 / А.Р. Закирова, З.Б. Садыков, В.П. Смоленцев, К.М. Газизуллин; – Бюл. № 22. – 8 с.

64. Патент № 2261164 Российская Федерация, В 24 В 53/10, В 23 Н 5/00. Способ очистки абразивной ленты на металлической основе и устройство для его реализации: опубл. 27.09.2005 / В.П. Смоленцев, Г.П. Смоленцев, Г.М. Климова: – Бюл. № 27 – 4 с.

65. Патент №2277163 Российская Федерация, В23Н 3/00 (2006.01) В23Н 5/06 (2006.01). Способ электрохимической обработки: опубл. 27.05.2006 / В.Г. Грицюк, В.П. Смоленцев, А.Н. Некрасов, А.С. Ревин; – Бюл. изобр. № 15.– 6 с.

66. Патент №2333821 Российская Федерация, В23Н 3/10 (2006.01) В23Н 7/38 (2006.01) С23F 1/00 (2006.01). Способ электрохимической размерной обработки и устройство для его реализации: опубл. 20.09.2008 / В.П. Смоленцев, А.М. Гренькова, Е.В. Смоленцев, А.В. Перова; – Бюл. № 26. – 6 с.

67. Патент № 2405662 Российская Федерация, В23Н. Способ нанесения чугунного покрытия на деталь из алюминиевого сплава: опубл. 10.12.2010 / В. П. Смоленцев, А.В. Гребенщиков, А.В. Перова, Б.И. Омигов. – Бюл. № 34.

68. Патент №2466835 Российская Федерация. Способ эрозионно-технической обработки: опубл. 20.11.2012. / С.Н. Коденцев, В.П. Смоленцев, Г.А. Сухочев, М.А. Уваров. – Бюл. №32. – 4 с.

69. Патент № 2470749 Российская Федерация. Способ электрохимической обработки локальных участков и устройство для его использования: опубл. 27.12.2012 / И.Т. Коптев, В.П. Смоленцев, А.А. Коровин и др. – Бюл. изобр. № 36.

70. Патент №2621511 Российская Федерация. Электрод для изготовления конфузорного участка в отверстии форсунки: опубл. 06.06.2017 / В.П. Смоленцев, С.В. Сафонов, Б.И. Омигов. – Бюл. изобр. № 16. – 2 с.

71. Патент № 2625378 Российская Федерация. Способ групповой прошивки и устройство для его реализации: опубл. 13.07.2017 / Смоленцев В.П., Кузовкин А.В., Шаров Ю.В., Золотарев В.В. – Бюл. № 20. – 7 с.

72. Патент №2656628 Российская Федерация. Способ подачи рабочей среды: опубл. 06.06.2018 / В.П. Смоленцев, О.Н. Кириллов, А.Ю. Рязанцев: – Бюл. изобр. № 16. – 2 с.

73. Патент № 2693283 Российская Федерация, С23С 4/04, С23С 30/00, С23С 4/134. Способ получения эрозионно-стойких теплозащитных покрытий: опубл. 02.07.2019/ А.И. Портных, Е.В. Паничев. – Бюл. изобр. № 19. – 2 с.

74. Патент № 2778809 Российская Федерация, В23Н /600. Способ гальваноконтактного восстановления металлических деталей и инструмент для выглаживания и раскатки слоев гальванического покрытия; опубл. 25.08.2022 / Смоленцев В.П., Ненахов Н.Н., Стародубцев И.Г.; – Бюл. № 24. –10 с.

75. Патент на полезную модель № RU 231708 U1, 06.02.2025, МПК В24В 39/04. Автоматизированное устройство для поверхностного упрочнения зоны повреждения сварных соединений: опубл. 06.02. 2025 / Данилов А.Д., Уразов О.В.; – Бюл. № 4.

76. Патент 2809681, Российская Федерация МПК В23Н. Электрод-инструмент и способ электроабразивной обработки полужакрытой полости детали: опубл. 14.12.23. / Н. Н. Ненахов, В. П. Смоленцев, О. Н. Кириллов, Д. Е. Крохин. – Бюл. № 35.

77. Патент 2829178 Российская Федерация, Способ изготовления гибкого металлического корпуса детали: опубл.25.10.24 / А.А.Извеков, В.П. Смоленцев, А.Е. Малявин, И.Г. Стародубцев. – Бюл. № 30.

78. Переладов Н.П. Разработка и исследование процесса электроэрозионного упрочнения инструмента в жидком азоте //Диссертация (в форме научного доклада) на соискание ученой степени кандидата технических наук / Переладов Н.П. Воронеж, Воронежский государственный технический университет, 1994. – 20 с.

79. Переладов Н.П. Качество поверхности после электроэрозионной и комбинированной обработки / Н.П. Переладов // Электронная обработка материалов. – 1993. – №6. – С.13-15.

80. Перспективы развития комбинированных методов обработки в наукоемком машиностроении / В. П. Смоленцев, Т. В. Цымбал, А. А. Извеков, С. С. Юхневич // Современные технологии производства в машиностроении : Межвузовский сборник научных трудов. – Воронеж : Издательско-полиграфический центр "Научная книга", 2025. – С. 4-16.

81. Петров Ю.Н., Нистрян А.З., Саушкин Б.П. Исследование анодного поведения титановых сплавов при ЭХРО. Двухкомпонентные водные растворы солей / Ю.Н. Петров, А.З. Нистрян, Б.П. Саушкин // Электронная обработка материалов. – 1983. – № 6. – С.18-22.

82. Печагин А.П. Повышение точности сборных корпусных деталей путем искусственного старения методом магнитно-импульсной обработки / А.П. Печагин, В.П. Смоленцев, А.И. Найденов // Сборка в машиностроении и приборостроении.– 2009. – №6. – С.41-46.

83. Повышение качества деталей из легкоплавких материалов путем нанесения покрытий из чугуна / Норман А.В., Смоленцев В.П., Норман А.В.,

Кондратьев М.В. // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2023. – Т.19, № 3. – С. 120-126.

84. Портных А.И. Технология плазменного нанесения эрозионностойких термозащитных покрытий, обеспечивающих многоразовую эксплуатацию изделий: Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Портных Александр Иванович – Воронеж: ВГТУ, 2019. – 155 с.

85. Поташникова Н.С. Аддитивная технология создания инструмента для электроабразивной обработки / Н.С. Поташникова, В.П. Смоленцев, М.Г. Поташников // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2021. – Т.17, № 3 (195). – С.138-144.

86. Саушкин Б.П. Выбор и применение электролитов для электрохимической обработки / Б.П. Саушкин // М:ВНИИТЭМП, 1992. – 80 с.

87. Сафонов С.В. Технологическое обеспечение эксплуатационных характеристик изделий: Монография / С.В. Сафонов // Воронеж: Издательский дом ВГУ, 2015. – 232 с.

88. Саушкин Б.П. Научно-технологическая основа технологического суверенитета страны / Научно-технологическая основа машиностроения и приборостроения: сб. научн. тр. / Воронеж: Изд. ВГТУ, 1997. – С.7-23.

89. Седыкин Ф.В. Размерная электрохимическая обработка деталей машин / Седыкин Ф.В. // М.: Машиностроение, 1975. – 301 с.

90. Скрыгин О.В. Интенсификация массовыноса при комбинированных методах обработки материалов / О.В. Скрыгин, В.П. Смоленцев, А.В Щеднов // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2019. – Т.15, № 8. – С. 369 – 374.

91. Смоленцев В.П. Аддитивные технологии изготовления инструмента для комбинированных методов обработки / В.П. Смоленцев, Н.Н. Ненахов, А.А. Извеков, И.Г. Стародубцев // Научно-технологическая основа машиностроения. – 2022. – №7 (133). – С. 3-8.

92. Смоленцев В.П., Извеков А.А. Комбинированные технологии изготовления деталей в твердых электролитах // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2021. – Т. 17, № 6. – С. 107-110.

93 Смоленцев В.П., Кириллов О.Н., Извеков А.А. Расширение области использования в машиностроении комбинированных наукоемких технологий / В.П. Смоленцев, О.Н. Кириллов, А.А. Извеков // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2024. – Т.20, № 2. – С.179-183.

94. Смоленцев В.П. Расчет, проектирование и аддитивные технологии изготовления каналов в электродах-инструментах / В.П. Смоленцев, Н.С. Поташникова, А.А. Извеков, М.Г. Поташников // Справочник. Инженерный журнал, – 2024. – № 4. –С. 3-10.

95. Смоленцев В.П., Извеков А.А. Обеспечение качества наукоемких изделий комбинированными методами / В.П. Смоленцев, А.А. Извеков // Справочник. Инженерный журнал. – 2025. – №7. – С.8-15.

96. Смоленцев В.П., Извеков А.А., Стародубцев И.Г. Состояние и пути развития комбинированных методов обработки наукоемких изделий / Смоленцев В.П., Извеков А.А., Стародубцев И.Г. // Воронежский научно-технический Вестник. – 2024. – №4 (50). – С. 20-30.

97. Смоленцев В.П. Изготовление инструмента непрофилированным электродом / В.П. Смоленцев // М.: Машиностроение, 1967.– 180 с.

98. Смоленцев В.П. Комбинированная прошивка глубоких каналов переменного сечения / В.П. Смоленцев, А.А. Широкожухова, Н.С. Поташникова // Инженерный журнал. Справочник. – 2020. – №8 (281). – С.10 – 13.

99. Смоленцев В.П. Комбинированные способы удаления заусенцев с деталей // Электронная обработка материалов. – 1995.– № 4. – С.57-60.

100. Смоленцев В.П. Нетрадиционные методы обработки в точном машиностроении. / В.П. Смоленцев, И.Т. Коптев // Студент, специалист, профессионал «ССП-2012»: Междунар. научно-технич. конф. // Воронеж: ВГКПТЭС, 2012. – С.114-124.

101. Смоленцев В.П. Технологические возможности и перспективы развития электроэрозионной и электрохимической размерной обработки / В.П. Смоленцев, И.Т. Коптев, К.М. Газизуллин // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии – 2012. – №2-5 (292). – С. 7 – 12.

102. Смоленцев В.П. Управление системами и процессами / В.П. Смоленцев, В.П. Мельников, А.Г. Схиртладзе // М: Академия, 2010. – 336 с.

103. Смоленцев В.П., Сафонов С.В., Смоленцев Е.В.. Обеспечение качества продукции авиационно-космического машиностроения на этапах отработки технологичности изделий // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2025. №6(168). – С. 11-18.

104. Смоленцев В.П. Эффективные методы удаления недорезов фрезерования при изготовлении перекрещивающихся пазов / В.П. Смоленцев, А.А. Коровин // Студент, специалист, профессионал: сб. тр. 3-й междунар. науч.-техн. конф. // Воронеж: ГОУ ВПО «Воронежский государственный технический университет», 2010. – 122 с.

105. Смоленцев В.П. Обеспечение точности сопрягаемых поверхностей / В.П. Смоленцев, В.Н. Сухоруков // Нетрадиционные технологии в машиностроении и приборостроении: Межвуз. сб. науч. тр. – Воронеж: Изд-во ВГТУ, 1999. – Вып. 3. – С. 94 – 98.

106. Смоленцев В.П., Сухоруков В.Н. Процесс обработки сопрягаемых пазов // Нетрадиционные технологии в машиностроении и приборостроении: Межвуз. сб. науч. тр. – Воронеж: Изд-во ВГТУ, 1999. – Вып. 3. – С. 91-98.

107. Смоленцев В.П. Теория электрических и физико-химических методов обработки. В 2 ч.: Учеб. пособие / В.П. Смоленцев, А.И. Болдырев, Е.В. Смоленцев и др. // Воронеж: ВГТУ, 2008. – Ч. 2. – 223 с.

108. Смоленцев В.П. Технологические методы повышения ресурса наукоемких изделий / В.П. Смоленцев, С.В. Ковалёв, Н.С. Поташникова // Научно-технические технологии в машиностроении. 2021. – №7. – С. 3 – 11.

109. Смоленцев В.П. Технология электрохимической обработки внутренних поверхностей / В.П. Смоленцев // М.: Машиностроение, 1978. – 176 с.

110. Смоленцев В.П. Управление качеством наукоемких изделий по результатам испытаний / В.П. Смоленцев, С.В. Сафонов, Б.И. Омигов // Вестник Брянского Государственного технического университета. – 2019. - №1. – С. 20-28.

111. Смоленцев В.П., Смоленцев Г.П. Садыков З.Б. Электрохимическое маркирование деталей / В.П. Смоленцев, Г.П. Смоленцев. З.Б. Садыков // М.: Машиностроение, 1983. – 72 с.

112. Смоленцев В.П., Часовских А.И. Отработка конструкций электрохимического оборудования на технологичность / В.П. Смоленцев, А.И. Часовских // Проектирование технологических машин: сб. научн. тр. – М.: СТАНКИН, 1997. – Вып. 5. – С.77-82.

113. Смоленцев В.П., Сафонов С.В., Катуков В.И. Поддержание качества поверхностного слоя изделий в процессе их очистки от загрязнений / В.П. Смоленцев, С.В. Сафонов, В.И. Катуков // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2014. – № 7. – С.21-23.

114. Смоленцев В.П., Переладов Н.П. Качество поверхности после электроэрозионной и комбинированной обработки / В.П. Смоленцев, С.В. Сафонов, В.И. Катуков // Электронная обработка материалов. – 1993. – № 6. – С. 13-15.

115. Смоленцев Г.П. Теория электрохимической обработки в нестационарном режиме / Г.П. Смоленцев, И.Т. Коптев, В.П. Смоленцев. // Воронежский государственный технический университет, 2000. – 104 с.

116. Смоленцев Е.В. Проектирование электрических и комбинированных методов обработки / Смоленцев Е.В. // М: Машиностроение, 2005. – 511 с.

117. Современная электротехнология в машиностроении. / Современная электротехнология в машиностроении: труды международной научно-технической конференции. – Тула: ТГУ, 2002. – 471 с.

118. Справочник по процессам поверхностного пластического деформирования. Гальваноконтактное восстановление геометрии деталей с использованием поверхностного пластического деформирования: монография в 2 т. / В.П. Смоленцев, М.В. Кондратьев, И.Г. Стародубцев, Н.Н. Ненахов; под ред. С.А. Зайдеса // Иркутск: Из-во ИРНИТУ, 2022. – Т. 2 – Гл. 23. – С. 475–479.

119. Справочник технолога-машиностроителя: в 2 т. под ред. А.С. Васильева, А.А. Кутина // М.: «Инновационное машиностроение», 2018. Т. 2. – 818 с.
120. Справочник технолога под ред. А.Г. Сулова // М.: «Инновационное машиностроение», – 2019. – 800 с.
121. Суворов А.П. Особенности расчета комбинированного электрода-инструмента для электрических методов обработки, изготавливаемого на основе аддитивных технологий / А.П. Суворов, А.В. Кузовкин // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2018. – Т. 14, № 6 – С. 158 – 162.
122. Сурьев А.А. Повышение качества поверхностного слоя деталей за счет совершенствования процесса комбинированного электроалмазного шлифования: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / А.А. Сурьев. – Брянск, 2008. – 20 с.
123. Сулов А.Г. Технологическое обеспечение и повышение эксплуатационных свойств деталей и их соединений / А.Г. Сулов, В.П. Федоров, О.А. Горленко и др // М.: Машиностроение, 2006. – 448 с.
124. Сулов А.Г., Федонин О.Н., Медведев Д.М. Проектирование функционально ориентированных технологических процессов / А.Г. Сулов, О.Н. Федонин, Д.М. Медведев // Вестник машиностроения. – 2019. № 9. – С. 66-91.
125. Сухочев Г.А. Управление качеством изделий, работающих в экстремальных условиях при нестационарных воздействиях / Г.А. Сухочев // М: Машиностроение, 2004. – 287 с.
126. Теоретические основы проектирования технологических комплексов / А. М. Русецкий и др.; под. общ. ред. А.М. Русецкого // Минск: Беларус. навука. – 2012. – 239 с.
127. Технология комбинированной импульсной обработки в кавитационной жидкой среде / В.П. Смоленцев, О.В.Скрыгин, Н.Н.Ненахов, С.В.Сафонов // Перспективные направления развития финишных и виброволновых технологий / Под ред. В.А. Лебедева: сб. тр. семинара технологов-машиностроителей // Ростов-на-Дону: ДГТУ, 2021, – С. 342-345.

128. Уразов О.В., Данилов А.Д. 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.

129. 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, И Г. Дроздов // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2022. – Т. 18, № 3. – С. 124-132.

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

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

132. 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.

133. Усов С.В. Исследование влияния комбинированных методов обработки на трибологические характеристики поверхностного слоя деталей машин / С.В. Усов, Д.С. Свириденко, Е.В. Смоленцев, А.С. Белякин // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2012. – Т. 8, – №5. – С. 138 – 141.

134. Ушомирская Л.А. Опыт электроконтактной обработки металлов / Л.А. Ушомирская // Ленинград, – ЛДНТП. –. 1979. – 22 с.

135. Усталостная прочность конструкционных сталей после электрохимической размерной обработки / В.П. Смоленцев, И.Н. Шканов, Н.З.

Логинов и др. // Электрофизические и электрохимические методы обработки, 1970. – №3. – С 35-40.

136. Физико-химические методы обработки в производстве газотурбинных двигателей / Под ред. Б.П. Саушкина // М.: Дрофа, 2002. – 656 с.

137. Повышение производительности алмазного глубинного шлифования монолитного твердосплавного инструмента: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук, / Б.В. Цветков. – Рыбинск: РГАТУ им., П.А. Соловьева. 2017. – 16 с.

138. Чернин И.М. Расчеты деталей машин / И.М. Чернин, А.В. Кузьмин, Г.М. Ицкович // Минск: «Вышэйшая школа». 1974. – 592 с.

139. Чижов М.И. Разработка комбинированного процесса получения беспористых хромовых покрытий для высокоресурсных изделий // Автореф. дис. докт. техн. наук. Воронеж: ВГТУ, 1999. – 32 с.

140. Чижов М.И., Смоленцев В.П. Гальваномеханическое хромирование деталей машин // Воронеж: ВГТУ, 1998. – 162 с.

141. Шкарбан А.Ю. Разработка методов расчета электрохимического формообразования и гидродинамики течения электролита в зазоре // Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата физ-мат. наук. – Казань: КГУ. 2000 – 24 с.

142. Щеднов А.В., Технология комбинированной обработки каналов по многослойным шаблонам / А.В. Щеднов, В.П. Смоленцев, Н.С. Поташникова // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2021. – Т. 17, № 1. – С. 89 –96.

143. Электродные процессы и процессы переноса при электрохимической размерной обработке материалов / А.И. Дикусар, Г.Р. Энгельгардт, В.И. Петренко, Ю.Н. Петров // Кишинев; «Штиица». 1983. – 208 с.

144. Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов. В 2т. / Под ред. В.П. Смоленцева // М.: Высш.шк., 1983. – 208с.

145. Электрохимическая размерная обработка деталей сложной формы / В.А. Головачов, Б.И. Петров, В.Г. Филимошин, В.А. Шманев // М: Машиностроение. 1969. – 198 с.

146. Ямпольский В.В. Электроалмазное шлифование быстрорежущей стали Р6М5 с применением асимметричных биполярных импульсов // Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Новосибирск: НГТУ. 2006. – 18 с.

147. Янюшкин А.С. Комбинированная электроалмазная обработка инструментальных сталей / А.С. Янюшкин, В.Ю. Попов, Е.В. Васильев, А.Ю. Попов // Братск: БрГУ. 2009. – 228 с.

148. Янюшкин А.С., Шоркин В.С. Контактные процессы при электроалмазном шлифовании // М: Машиностроение. 2004. – 230 с.

149. Izvekov Alexandr., The field of use of additive technologies /A. Izvekov, V. Smolentsev, N. Nenahov, I.Starodubtsev // Journal of Clinical Review & Case Reports, Volume 7, Issue 8, 2022 - pp.103-106.

150. Smolentsev V. P. Protection of Medical Instruments from Infection with Protective Nanocoating's/ Vladislav Smolentsev, Andrei Mandrykin and Natalia Potashnikova // Determinations Nanomed Nanotechnol.1(2). DNN.000509.2019. Copyright©. pp 11-15.

151. Skrygin, O. V. The mass transfer intensification of combined treatment products / O.V. Skrygin, V.P. Smolentsev, A.V. Schednov // MATEC Web of Conferences Volume 1 (2019), X International Scientific and Practical Conference “Innovations in Mechanical Engineering” (ISPCIME-2019) Kemerovo, Russia, November 26-29, 2019 DOI: <https://doi.org/10.1051/matecconf/201929701002>

152. Smolentsev V., Izvekov A., Nenahov N / Performance Characteristics of Coatings for Medical Instruments and Equipment // Pharmaceutical Sciences & Analytical Research Journal – 2023, Volume 3, Issue 1. pp. 415-419.

153. Smolentsev V., Izvekov A., Scope of application technology of processing and separation of sheet materials using photomasks// Aeronautics Journal, 2023. Vol.12. pp. 612-619.

154. Smolentsev V., Izvekov A., Starodubtsev I. Production of sheet blanks without stamping using disposable templates // *Pharmaceutical Sciences & Analytical Research*, Volume 3, Issue 1, 2024. Pp. 176.

155. Smolentsev V.P. Technology of combined treatment of engine cooling elements / V.P. Smolentsev, Shchednov A.V., Smolentseva J.S // *Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2019) Volume 1*. pp. 134-136.

156. Wege zur Leistungssteigerung bei den elektrischadtragenden Bearbeitungsverfahren. Diskussionsbeiträge // *Industrie-Anzeiger*, 1971, Jg. 93, Nr. 60. 157 p.

157. Willson J.F. *Practice and Theory of Electrochemical Machining*. New York, 1971. 171 p.

158. Smolentsev V., Smolentsev E. Quality assurance of aerospace engineering products at the stages of products performance development test. *American Journal of Mechanical and Materials Engineering*. USA, 2026, USA, №1. pp. 326-341.

159. 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. pp. 42-53.

160. 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. 1-6.

Акты о внедрении



АКТ

внедрения полезной модели к патенту Российской Федерации № 231708 (заявлено 25.10.2024, опубликовано 06.02.2025. Бюл. № 4) «Автоматизированное устройство для поверхностного упрочнения зоны повреждения сварных соединений». Авторы: Данилов А.Д., Уразов О.В.

Комиссия в составе: председатель - главный металлург АО КБХА, к.т.н. Портных А.И.;

- члены: - д.т.н., профессор ВГТУ Данилов А.Д.;
- инженер-исследователь Уразов О.В.;
 - зам. заведующего кафедрой ТМ ВГТУ, чл.-корр. Академии космонавтики, д.т.н., профессор Смоленцев Е.В.;
 - д.т.н., профессор кафедры ТМ Сафонов С.В.

составили настоящий акт о результатах внедрения и использования в производстве на Воронежском конструкторском бюро химавтоматики (АО КБХА) патента № 231708. Начало внедрения – январь 2023 г.

Патент включает механическое упрочнение вдоль оси толстостенного трубопровода в процессе комбинированной чистовой обработки локальных участков и отличается тем, что он содержит механизм продольной подачи узла нагружения, механизм радиального перемещения с мотор-редуктором прецизионного позиционирования с шаговым электродвигателем, управляемым по скорости подачи и размерам зоны обработки, а узел нагружения включает блок пружин с регулированием усилия силового воздействия на упрочняющий инструмент по датчику положения деформирующего элемента на мотор-редуктор по командам блока управления по программе на ЭВМ.






Использование патента в цехах ВМЗ и АО КБХА позволило автоматизировать технологический процесс комбинированной чистовой обработки с упрочнением контактных элементов, полученных неподвижной сборкой в магистральных приводах и подачи рабочих сред.

В результате достигнутого снижения времени на выполнение технологических операций на 15-20%, исключена необходимость многократного контроля операций и проведения усталостных испытаний узлов и материалов конструкций отраслевых наукоемких изделий, повышения качества и ресурса силовых и транспортных магистралей.

Общий экономический эффект от внедрения за период использования патента составил более 2,8 млн. рублей.

С учетом перспектив расширения области применения предлагаемого устройства при ремонте магистралей атомных электростанций ожидаемый эффект составит свыше 5 млн. рублей.

Комиссия: председатель
 члены:

	А.И. Портных
	А.Д. Данилов
	О.В. Уразов
	Е.В. Смоленцев
	С.В. Сафонов

положения деформирующего элемента на мотор-редукторе по командам блока управления в соответствии с программой ЭВМ.

Использование патента в ремонтных подразделениях НВАЭС позволило автоматизировать технологический процесс комбинированной чистовой обработки магистралей с упрочнением контактных элементов, полученных неподвижной сборкой в магистралах подачи рабочих сред.

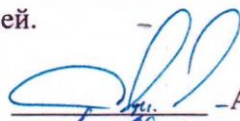




В результате достигнутого снижения времени на выполнение технологических операций исключена необходимость многократного контроля операций и проведения усталостных испытаний узлов и материалов конструкций отраслевых наукоемких изделий, повышения качества и ресурса силовых и транспортных магистралей.

В соответствии с экспертной оценкой экономический эффект от применения патента составил 825 440,44 рублей в год. При этом за счет сокращения простоя энергоблока ежегодно на 14 суток, получено дополнительное количество произведенной электроэнергии, что дало возможность увеличить выручку предприятия более чем на 400 млн. рублей ежегодно.

Общий экономический эффект от внедрения за период использования патента составил более 3,5 млн. рублей.

С учетом перспектив расширения области применения предлагаемого устройства при ремонте магистралей атомных электростанций ожидаемый эффект составит свыше 6 млн. рублей.

Комиссия: председатель
члены:

	- А.Н. Казьмин
	А.Д. Данилов
	О.В. Уразов
	Е.В. Смоленцев
	С.В. Сафонов

Расчетные программы

Цифровая технология обработки внутренних поверхностей комбинированными методами на многокоординатном станке для детали на рисунке 3.2

M9	X19.89
G28 U0. V0. W0. M05 G0 Z4.5	Z-26.935
X24.256	G0 Z4.5
G1 Z2.5	X28.223
Z-28.935	G1 Z2.5
X19.89	Z-28.935
Z-26.935	X23.856
G0 Z4.5	Z-26.935
X28.223	G0 Z4.5
G1 Z2.5	X32.189
Z-28.935	G1 Z2.5
X23.856	Z-28.935
Z-26.935	X29.385
G0 Z4.5	X27.823
X32.189	Z-26.935
G1 Z2.5	G0 Z4.5
Z-28.935	X36.155
X29.385	G1 Z2.5
X27.823	Z-28.935
Z-26.935	X33.8
G0 Z4.5	X31.789
X36.155	Z-26.935
G1 Z2.5	G0 Z4.5
Z-28.935	X40.121
X33.8	G1 Z2.5
X31.789	Z-28.935
Z-26.935	X35.755
G0 Z4.5	Z-26.935
X40.121	G0 Z4.5
G1 Z2.5	X44.087
Z-28.935	G1 Z2.5
X35.755	Z-28.935
Z-26.935	X39.721
G0 Z4.5	Z-26.935
X44.087	G0 Z4.5
G1 Z2.5	X48.053
Z-28.935	G1 Z2.5
X39.721	Z-28.935
Z-26.935	X43.687
G0 Z4.5	Z-26.935
X48.053	G0 Z4.5
G1 Z2.5	X52.019
Z-28.935	G1 Z2.5
X43.687	Z-19.398
Z-26.935	X49.8
G0 Z4.5	G18 G2 X48.6 Z-19.998 K-.6
X52.019	G1 Z-28.935

G1 Z2.5
Z-19.398
X49.8
G18 G2 X48.6 Z-19.998 K-.6
G1 Z-28.935
X47.653
T0100
M01
(TOOL - 135 OFFSET - 135)
(END MILL 15. DIA. - 0.5 R)
G28 U0. V0. W0.
G50 X250. Y0. Z250.
G0 T13635
G18
G97 S2000 M03
G0 X0. Z5. M8
Z2.
G1 Z-29.135 F.1
G0 Z5.
M9
G28 U0. V0. W0. M05
T13500
M01
(TOOL - 72 OFFSET - 72)
(ID ROUGH MIN. 20. DIA. -
80 DEG. INSERT - CCMT 09 T3 04)
G28 U0. V0. W0.
G50 X250. Y0. Z250.
G0 T7272
G18
G97 S3600 M04
G0 X20.29 Z4.5 M8
G50 S3600
G96 S550
G1 Z2.5 F.2
Z-28.935
X16.324
Z-26.935
G0 Z4.5
X24.256
G1 Z2.5
Z-28.935

X47.653
Z-26.935
G0 Z4.5
X55.985
G1 Z2.5
Z-1.959
X55.951 Z-1.976
G2 X55.6 Z-2.4 I.424 K-.424
G1 Z-10.239
X52.761 Z-12.698
G2 X52.6 Z-12.998 I.519 K-.3
G1 Z-19.398
X51.619
Z-17.398
G0 Z3.792
X63.487
G1 Z1.792
X55.951 Z-1.976
G2 X55.6 Z-2.4 I.424 K-.424
G1 Z-10.239
X55.585 Z-10.252
Z-8.252
G18
G50 S2000
G96 S2000
G0 Z3.792
X63.487
G1 Z1.792 F.05
X55.951 Z-1.976
G18 G2 X55.6 Z-2.4 I.424 K-.424
G1 Z-10.239
X52.761 Z-12.698
G2 X52.6 Z-12.998 I.519 K-.3
G1 Z-19.398
X49.8
G2 X48.6 Z-19.998 K-.6
G1 Z-28.935
X33.8
X29.385
X16.324
Z-26.935
G0 Z1.25
M9
G28 U0. V0. W0. M05
T7200
M30

Приложение 3

Программа построения множества упругих состояний в задаче кручения транспортного вала типа представленного на рисунке 3.2.

Фрагмент исходного текста программы Листов 04 Инициализация исходного базиса внутренних состояний *L ksiBAS = 80, 8<<; SetDirectory@dWORKD; If @ToString@FileType@"BasicKSI.x"DD "File", HDeleteFile@"BasicKSI.x"D; Save@"BasicKSI.x", ksiBASDL, Save@"BasicKSI.x", ksiBASDD; SetDirectory@dINPUTD; mantissa = 400; upPar = StringJoin@8"UprugParameters.x"< = Get@upParD; SetDirectory@dWORKD; complPar = StringJoin@8"ComplexParameters.x"< = Get@complParD; garmP = Get@"GarmonPolinom Bas.x"D; ksiBAS = Get@"BasicKSI.x"D; PrintA"В базисе гармонических многочленов содержится элементов: ", garmPP1TE; Print@"В базисе содержится гармонических векторов: ", ksiBASP1TD; PrintA"Максимальный порядок гармонических многочленов: ", garmPP2TE; oOpol = garmP@@@2DD; Basξ1 = garmP@@@3DD; Basξ2 = garmP@@@4DD; Basξ3 = garmP@@@5DD; If@ksiBAS@@@1DD 0, SostRab = Input@"Введите количество генерируемых векторов"D, Hpr = Input@" Введите приращение генерируемых векторов"D; SostRab = ksiBAS@@@1DD + prrLD; numb = 0; ots = 0; filt = Input@"Использовать фильтр при генерации базиса постранично 1–да, 0–нет"D; If@filt 1, Print@" Выберите фильтр:"D; Print@" Чередование элементов в базисе при последующей ортогонализации:"D; Print@1, ":\t", "независимый–зависимый–независимый–зависимый–..."D; Print@2, ":\t", "зависимый–независимый–зависимый–независимый–..."D; Print@3, ":\t", "независимый–независимый–зависимый–зависимый–..."D; numb = Input@"Выберите позицию"DD; IfBSostRab ê 6 > oOpol, PrintB"ПРЕВЫШЕНИЕ ЗАРЕЗЕРВИРОВАННОГО ПОРЯДКА!"F, Print@"Рабочий порядок гармонических многочленов: ", SostRab ê 4DF; NPolinRab = 6 garmPP2T; H* Базис гармонических векторов *L F@i_, j_ D = 0; garm = Array@F, 8NPolinRab, 3 z ê γ1 + y; Ψ2 = ∂ξ2 φ2 ê. ξ2 → z ê γ2 + y; Ψ3 = ∂ξ3 φ3 ê. ξ3 → z ê γ3 + y; H* Базис векторов перемещений *L uxP = ComplexExpand@Re@p1 Hφ1 ê. ξ1 → z ê γ1 + yL

$\text{Get@upParD}; \text{rRU} = \text{Array@Null}, \text{8SostRab}, \text{3} < = \text{Sij}@@\text{nDD}; \text{rRU}@@\text{n}, \text{1DD} =$
 $\text{Chop@TrigToExp}@\partial z \text{ Szz} + \partial r \text{ Szz} + 1 \hat{=} r \partial \text{fi} \text{ Sz}\theta + \text{Szz} \hat{=} \text{rDD}; \text{rRU}@@\text{n}, \text{2DD} =$
 $\text{Chop@TrigToExp}@\partial z \text{ Szz} + \partial r \text{ Srr} + 1 \hat{=} r \partial \text{fi} \text{ Sr}\theta + \text{HSrr} - \text{S}\theta\theta\text{L} \hat{=} \text{rDD}; \text{rRU}@@\text{n},$
 $\text{3DD} = \text{Chop@TrigToExp}@\partial z \text{ Sz}\theta + \partial r \text{ Sr}\theta + 1 \hat{=} r \partial \text{fi} \text{ S}\theta\theta + 2 \text{ Sr}\theta \hat{=} \text{rDD LD};$
 $\text{N@Chop@rRUDD} \text{ H}^* \text{ 2.Уравнения совместности деформаций } *L \text{ def} =$
 $\text{Array@Null}, \text{8SostRab}, \text{6} < = \text{ksiBAS}@@\text{3}, \text{nDD}; \text{defPn}, \text{1T} = \text{ChopATrigToExpA1} \hat{=} r$
 $\partial \text{fi}, \text{fi} \text{ Err} + 1 \hat{=} r \partial r \text{ Ir} \text{ 2} \partial r \text{ E}\theta\theta\text{M} - \partial r \text{ Err} - 2 \hat{=} r \partial r, \text{fi} \text{ Hr} \text{ Er}\theta\text{LEE}; \text{defPn}, \text{2T} =$
 $\text{Chop@TrigToExp}@\partial z, z \text{ Err} + \partial r, r \text{ Ezz} - 2 \partial r, z \text{ EzrDD}; \text{defPn}, \text{3T} =$
 $\text{ChopATrigToExpA}\partial z, z \text{ E}\theta\theta + 1 \hat{=} r \text{ 2} \partial \text{fi}, \text{fi} \text{ Ezz} + 1 \hat{=} r \partial r \text{ Ezz} - 2 \hat{=} r \partial z \text{ H}\partial \text{fi} \text{ Ez}\theta +$
 $\text{EzrLEE}; \text{defPn}, \text{4T} = \text{ChopATrigToExpA1} \hat{=} r \partial \text{fi}, z \text{ Err} + \partial r \text{ H1} \hat{=} r \partial r \text{ Hr} \text{ Ez}\theta\text{LL} - 1 \hat{=} r$
 $\text{2} \partial r, z \text{ Ir} \text{ 2} \text{ Er}\theta\text{M} - \partial r, \text{fi} \text{ HEzr} \hat{=} \text{rLEE}; \text{defPn}, \text{5T} = \text{Chop@TrigToExp}@r \partial z \text{ HErr} - \partial r \text{ Hr}$
 $\text{E}\theta\theta\text{LL} - \partial \text{fi}, \text{fi} \text{ Ezr} + \partial r, \text{fi} \text{ Hr} \text{ Ez}\theta\text{L} + \partial z, \text{fi} \text{ Hr} \text{ Er}\theta\text{LDD}; \text{defPn}, \text{6T} =$
 $\text{Chop@TrigToExp}@\partial \text{fi}, r \text{ HEzz} \hat{=} \text{rL} + \partial z, z \text{ Er}\theta - r \partial r, z \text{ HEz}\theta \hat{=} \text{rL} - 1 \hat{=} r \partial \text{fi}, z \text{ EzrDD}$
 $\text{ME}; \text{N@Chop@defDD} \text{ H}^* \text{ 3.Закон Гука } *L \text{ zG} = \text{Array@Null}, \text{8SostRab}, \text{6} < =$
 $\text{Sij}@@\text{nDD}; \text{8Err}, \text{E}\theta\theta, \text{Ezz}, \text{Er}\theta, \text{Ezr}, \text{Ez}\theta < = \text{Eij}@@\text{nDD}; \text{zGPn}, \text{1T} =$
 $\text{Chop@TrigToExp}@Err\text{D} \text{ TrigToExp}@1 \hat{=} \text{er} \text{ HSrr} - \text{vr} \text{ S}\theta\theta\text{L} - \text{vz} \hat{=} \text{ez} \text{ SzzDD};$
 $\text{zGPn}, \text{2T} = \text{Chop@TrigToExp}@E}\theta\theta\text{D} \text{ TrigToExp}@1 \hat{=} \text{er} \text{ HS}\theta\theta - \text{vr} \text{ SrrL} - \text{vz} \hat{=} \text{ez}$
 $\text{SzzDD}; \text{zGPn}, \text{3T} = \text{Chop@TrigToExp}@Ezz\text{D} \text{ TrigToExp}@1 \hat{=} \text{ez} \text{ HSzz} - \text{vz} \text{ HSrr} +$
 $\text{S}\theta\theta\text{LLDD}; \text{zGPn}, \text{4T} = \text{Chop@TrigToExp}@Er}\theta\text{D} \text{ TrigToExp}@1 \hat{=} \text{H2} \text{ grL} \text{ Sr}\theta\text{DD};$
 $\text{zGPn}, \text{5T} = \text{Chop@TrigToExp}@Ezr\text{D} \text{ TrigToExp}@1 \hat{=} \text{H2} \text{ gzL} \text{ SzzDD}; \text{zGPn}, \text{6T} =$
 $\text{Chop@TrigToExp}@Ez}\theta\text{D} \text{ TrigToExp}@1 \hat{=} \text{H2} \text{ gzL} \text{ Sz}\theta\text{DD LD}; \text{N@Chop@zGDD} \text{ H}^*$
 Просмотр множества частных решений *L Print@"Базисный набор векторов
 перемещений:" D; N@Chop@ksiBAS@@@2DDDDD $\hat{=} \text{MatrixForm}$ Print@
 "Базисный набор тензоров напряжений:" D; N@Chop@ksiBAS@@@4DDDD
 $\hat{=} \text{MatrixForm}$ Print@" Базисный набор тензоров деформаций: "D;
 N@Chop@ksiBAS@@@3DDDDD $\hat{=} \text{MatrixForm}$