

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Воронежский государственный технический университет»

На правах рукописи



Извеков Александр Андреевич

**Исследование процесса и разработка технологии комбинированных методов
обработки в рабочих средах с управляемыми физическими параметрами**

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

Научный руководитель

Смоленцев Владислав Павлович –
доктор технических наук, профессор

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Воронеж – 2025

Оглавление

Введение.....	6
Глава 1 ПУТИ И МЕТОДЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАУКОЕМКОЙ ПРОДУКЦИИ ПРИ РАЗРАБОТКЕ КОМБИНИРОВАННЫХ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ В ТЕОЛОГИЧЕСКИХ СРЕДАХ С РАЗЛИЧНЫМИ ФИЗИЧЕСКИМИ ПАРАМЕТРАМИ.....	13
1.1 Область исследований, выполненных в работе.....	13
1.2 Роль и место комбинированных воздействий в проектируемых комплексах.....	14
1.3 Виды используемых для комбинированных методов физических воздействий.....	15
1.4 Назначение и обоснование выбора технологических рабочих сред при проектировании комбинированных методов обработки с постоянным и переменным составом...	19
1.5 Оптимизация расчета, назначения и выбора структурных составляющих комбинированного процесса при проектировании технологических комплексов.....	23
1.6 Типовые технологии комбинированной обработки с принятыми составами технологических рабочих сред.....	28
1.7 Обзор результатов использования технологических рабочих сред в комбинированных методах обработке.....	31
1.8 Базовые технологические показатели, достигнутые с использованием комбинированных методов обработки.....	31
1.9 Стабилизация обеспечения качества изделий за счет комбинированных методов нанесения покрытий в различных технологических рабочих средах.....	35
Выводы по главе.....	38
Глава 2 МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ ПОСТАВЛЕННЫХ ЗАДАЧ И ДОСТИЖЕНИЯ ПОСТАВЛЕННОЙ В РАБОТЕ ЦЕЛИ.....	39

2.1	Научные гипотезы для решения задач работы.....	39
2.2	Экспериментальное оборудование.....	41
2.3	Средства измерения и испытаний.....	45
2.4	Научно обоснованные способы и устройства для выбора и критериального обоснования технологических сред.....	47
2.5	Методология выбора технологических рабочих сред.....	48
	Выводы по главе.....	55
Глава 3	МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕХАНИЗМА ОПТИМИЗАЦИИ ВЫБОРА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РАБОЧИХ СРЕД ДЛЯ КОМБИНИРОВАННЫХ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ.....	56
3.1	Деловой конфликт как метод выбора эффективности технологических рабочих сред и оптимизации структуры комбинированных методов обработки.....	56
3.2	Моделирование производственной ситуации для обоснования выбора параметров комбинированной обработки с использованием эффективных рабочих сред.....	59
3.3	Выбор и назначение технологических показателей и рабочих сред для комбинированных методов, обеспечивающих требуемое качество наукоемких изделий...	68
3.4	Процедура устранения рассогласования при проектировании КМО в рабочих средах с различными физическими свойствами и составами.....	79
	Выводы по главе.....	82
Глава 4	ПРОЕКТИРОВАНИЕ КОМБИНИРОВАННЫХ ПРОЦЕССОВ С ЭФФЕКТИВНЫМИ РАБОЧИМИ СРЕДАМИ.....	83
4.1	Проектирование КМО с вакуумированной зоной обработки	83
4.2	Процедура проектирования комбинированных технологических процессов с использованием в качестве рабочей среды газообразных продуктов.....	84

4.3	Комбинированные методы обработки в жидких рабочих средах.....	90
4.3.1	Расчет, проектирование и аддитивные комбинированные технологии изготовления каналов в электродах-инструментах с использованием жидких рабочих сред.....	90
4.3.2	Процедура проектирования технологического процесса для КМО в жидкой рабочей среде с переменным химическим воздействием и изменяющимся зазором.....	93
4.3.3	Новые составы жидких рабочих сред для прецизионной комб обработки на примерах нанесения штрихов для формирования знаков и индексов при нанесении информации.....	97
4.4	Проектирование технологических процессов с использованием рабочих сред в твердом состоянии.....	99
	Выводы по главе.....	104
Глава 5	ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ КОМБИНИРОВАННЫХ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ С ЭФФЕКТИВНЫМИ СОСТАВАМИ И СВОЙСТВАМИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РАБОЧИХ СРЕД.....	105
5.1	Пути использования рабочих сред с наложением магнитоимпульсных воздействий для стабилизации внутренних напряжений.....	105
5.2	КМО для интенсификации изготовления каналов с переменным сечением.....	108
5.3	Интенсификация процесса обработки путем кавитации рабочих сред.....	109
5.4	Состояние и пути развития комбинированных методов обработки наукоемких изделий.....	111

5.5 Расширение области использования в машиностроении	
КМО с различными технологическими рабочими средами...	114
Выводы по главе.....	120
Заключение.....	121
Список литературы.....	124
Приложение А.....	143
Приложение Б.....	148

Введение

Актуальность темы работы. При проектировании комбинированных технологических процессов для расчетов параметров процесса в основном применяют экспериментальные показатели, полученные для конкретных деталей и условий обработки. Такие сведения правомерны только для рассматриваемых случаев, а в остальных - раскрывают скорее качественную картину и только для выбранного варианта обработки. При проектировании технологических режимов процесса требуется иметь точную количественную картину, параметры которой постоянно уточняются по каналам обратной связи. Это возможно, если имеется алгоритм построения механизма протекания процесса и его физическая модель, частные решения которой позволяют проектировать регрессионные математические модели для расчета технологических режимов и обоснованного назначения параметров проектируемого комбинированного процесса, где наиболее значительное воздействие на технологические параметры оказывает выбор состава и свойств рабочей среды, в их числе агрегатное состояние и возможность управления свойствами в период обработки при постоянно изменяющихся условиях протекания процесса. Изменение таких факторов может вызывать снижение качества продукции вплоть до прекращения технологической операции и брака изделия, что ограничивает область использования, например, электрических методов обработки, востребованных в наукоемком (в частности, в авиакосмическом) машиностроении.

Опыт последних лет показал, что при проектировании комбинированных методов обработки эффективнее использовать процессы в виде технологических комплексов, в которых может учитываться совместное воздействие нескольких технологических факторов с различными физическими свойствами. Их влияние может оказывать как положительное, так и негативное влияние на технологическую систему. При этом любой метод обработки протекает в рабочей среде с постоянными или переменными физическими свойствами и агрегатным

состоянием, что определяет технологические возможности и технологичность используемого или создаваемого метода обработки.

Актуальность тематики работы возрастает с учетом результатов разработок ученых в области химических технологий по созданию новых рабочих сред, в значительной степени повышающих технико-экономические показатели новых процессов и снижающих или исключающих у них негативных сторон, выявляемых на этапах отработки технологичности создаваемых объектов, осваиваемых в серийном производстве, в большей степени это касается изделий оборонного назначения, где импортозамещение стало особенно актуальным для страны.

Актуальность работы подтверждается тем, что она выполнялась как часть федеральной космической программы России на 2016-2025 годы под шифром «Феникс», принятой в уточненном варианте и утвержденной постановлением Правительства РФ от 09.12.2017 года № 1513.

Степень разработанности темы. Изучение научных публикаций российских и зарубежных специалистов демонстрирует, что накопленный опыт и достижения научных школ различных городов России (Воронеж, Казань, Москва, Санкт-Петербург, Тула, Пермь, Новосибирск, Уфа, Иваново, Самара и другие) в сочетании с разработками ведущих компаний США, Болгарии, Швеции, Германии, Франции, Китая и Японии формируют прочную научную основу. Эта основа способствует развитию технологий комбинированных методов обработки в рабочих средах с переменным агрегатным состоянием. Особое значение данная разработка имеет для создания высоконагруженных изделий с улучшенными эксплуатационными характеристиками и для совершенствования технологий производства современной авиакосмической техники, что открывает новые перспективы в научных исследованиях данного направления.

Цель и задачи работы.

Целью работы является оптимизация режимов и эксплуатационных показателей комбинированных методов обработки труднообрабатываемых материалов путем выбора состава и управления процессом за счет использования эффективных рабочих сред с переменными физическими свойствами

В работе решены следующие задачи:

1. Анализ известных рабочих сред для комбинированных методов, обеспечивающих требуемые технико-экономические показатели процессов обработки.

2. Установление объективных закономерностей физического и математического взаимодействия между физическим состоянием рабочих сред и уровнем воздействия на технологические показатели комбинированных процессов.

3. Разработка технологических режимов и путей управления физическими параметрами рабочих сред для обеспечения требуемых эксплуатационных показателей объектов обработки.

4. На базе количественной оценки по критерию производственной технологичности создание рабочих сред, адаптированных к условиям эксплуатации в рассматриваемых комбинированных технологических процессах.

5. Обоснование условий эксплуатации и проектирование для этого перспективных рабочих сред с новым составом и свойствами.

6. Расширение области использования и создание комбинированных технологических процессов на прогрессивные виды производства отечественных наукоемких изделий.

Объект исследований. Процессы формирования рабочих режимов и состава рабочих сред для достижения требуемых показателей эксплуатационных характеристик при изготовлении наукоемких изделий. Комбинированные технологические процессы с использованием магнитных, химических, механических, термических воздействий, регулируемые путем изменения состояния и физических характеристик технологических средств. при проведении операций в рабочих средах с различным постоянным и переменным агрегатным состоянием.

Область исследований. Содержание работы соответствует паспорту специальности 2.5.5: п. 2 «Теоретические основы, моделирование и методы экспериментального исследования процессов механической и физико-технической обработки, включая процессы комбинированной обработки с наложением

различных физических, химических и комбинированных воздействий»; п. 4 «Создание, включая проектирование, расчеты и оптимизацию, параметров рабочего инструмента и других компонентов оборудования, обеспечивающих технически и экономически эффективные процессы обработки»; п. 7 «Новые технологические процессы механической и физико-технической обработки и создание оборудования и инструментов для их реализации».

Способы исследований, обоснованность, достоверность результатов.

Исследование и разработка технологии комбинированных методов обработки в рабочих средах с постоянным и переменным управляемым физическим состоянием проводились с применением современного научного оборудования, включая вычислительные ресурсы. В процессе работы использовались как сертифицированные технические средства, так и оригинальные разработки авторов, защищенные патентами, в том числе опытно-промышленное оборудование. Все эксперименты проводились с многократным повторением (не менее чем по критерию Стьюдента), что обеспечило надежность полученных данных. При выборе методов и средств обработки учитывались численные показатели технологичности, а также результаты исследований российских и зарубежных научных школ, включая работы самого автора. Достоверность результатов подтверждалась сравнением с данными других исследователей и производственными показателями при запуске изделий в серийное производство. Такой подход обеспечил высокую степень надежности полученных результатов, значительная часть которых успешно внедрена в производство и интегрирована в расчетные программы, некоторые из которых представлены в приложении к диссертации.

Научная новизна включает:

1. Раскрытие механизма действия технологических параметров, включая научно обоснованный выбор и создание эффективных рабочих сред постоянного и переменного агрегатного состояния, на построение системы качественной и количественной оперативной оценки приоритетов выбора методов и средств

изготовления создаваемой и модернизируемой наукоемкой техники по уровню технологичности, включающей производственную составляющую.

2. Создание системы моделирования процессов, требуемых для оценки технологичности на этапе разработки нового и модернизации используемых изделий при минимальном количестве повторных испытаний вариантов образцов или опытных изделий.

Вклад в технологическую науку. Включает создание теоретически обоснованной доказательной базы для регламентации выбора эффективных средств обработки с использованием рабочих сред с обоснованными физико-химическими характеристиками и критериальной базы для качественной и количественной оценки уровня варианта серийного производства по критерию полезности, позволяющего планировать загрузку, резервы и средства для содержания и развития специального машиностроения.

Практические результаты работы. Сокращение количества вариантов выбора технологических методов и средств, включающих рабочие среды, определяющих получение заданных и требуемых в перспективе эксплуатационных показателей с обеспечением по критерию технологичности заданного и перспективного уровня эксплуатационных показателей качества создаваемого или модернизируемого изделия при минимизации сроков запуска в серийное производство и затрат средств на освоение изделий по требованию заказчика. При этом необходимо предельно сократить возможность использования и стоимость импортных составляющих продукции и средств технологического оснащения для промышленного производства.

Личный вклад соискателя в выполнение работы.

1. Создание на базе системы отработки технологичности новых методов и средств технологического оснащения преимущественно для перспективных комбинированных видов обработки. Приоритет части методов защищен патентами соискателя, а результаты внедрены в производство.

2. Теоретические исследования по расширению зоны использования в области производственной технологичности и участие в ее внедрения в отраслевое

и общее машиностроение, позволившее достичь выпуска отечественной продукции повышенного качества.

3. Ускорение освоения новой продукции на этапе ее разработки, испытаний, запуска в производство, в том числе при запросах со стороны оборонных отраслей.

Реализация и внедрение результатов работы. Разработанные материалы успешно прошли производственные испытания в цехах Воронежского механического завода – структурного подразделения ФГУП «Государственный космический научно-производственный центр имени М.В. Хруничева». После подтверждения их эффективности материалы были внедрены в производство ракетных двигателей на базе АО «Конструкторское бюро химавтоматики», что позволило достичь существенной экономической выгоды. Полученные результаты нашли практическое применение при разработке жидкостных ракетных двигателей нового поколения на предприятиях, входящих в состав Госкорпорации «Роскосмос», а также активно используются в отечественном машиностроении, способствуя развитию технологического потенциала страны.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на международных и отраслевых научно-технических конференциях: 5-th International Conference on Industrial Engineering (ICIE-2019), (Сочи, 2019); X International Scientific and Practical Conference «Innovations in Mechanical Engineering» (ISPCIME-2019), (Кемерово, Шерегеш, 2019); X Международной научно-практической конференции «Инновационные машиностроительные технологии, оборудование и материалы» (Казань, 2019); XI Международной научно-технической конференции Ассоциации технологов-машиностроителей «Инновационные технологии машиностроения в транспортном комплексе» (Калининград, 2019); 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); 14 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, 2023); XIV Международной научно-практической конференции «Инновации в машиностроении - 2023» (ИнМаш-2023) (Кемерово: КузГТУ, 2023); 15-й Международной научно-практической конференции «Наукоёмкие технологии в машиностроении» (Москва, 2023); 16-й Международной научно-практической конференции «Наукоёмкие технологии машиностроения, авиации и транспорта» (Ростов-на-Дону, 2024).

Публикации. По теме диссертации опубликован 19 научных работ. В их числе: 8 - в изданиях, рекомендованных ВАК РФ; 2 патента РФ; 4– в зарубежных научных источниках, рецензируемых в базе «Scopus»; 3 публикации в научных сборниках и материалах конференций, где соискателю принадлежат: постановка, развитие научной проблемы, механизм протекания процессов в рабочих средах с управляемыми физическими параметрами, реализация результатов в авиакосмической отрасли и в машиностроении. В работах, изданных в соавторстве, все авторы в равной степени принимали участие в проведении исследований по теме работы.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы (164 наименования), 25 рисунков, 7 таблиц и приложения. Содержание диссертации изложено на 162 страницах текста с рисунками, таблицами, приложениями.

Глава 1 Пути и методы обеспечения оптимальных эксплуатационных показателей наукоемкой продукции при разработке комбинированных методов обработки в различных средах с различными физическими параметрами

1.1 Область исследований, выполненных в работе

В научных публикациях [40; 56; 57; 26; 150 и др.] представлены результаты комплексных исследований, выполненных с применением методов комбинированной обработки в различных технологических средах. Разработанные технологии обеспечивают комплексное воздействие, включающее тепловые, магнитные, лучевые и химические влияния как постоянного, так и импульсного характера. Полученные результаты легли в основу создания новых направлений по улучшению качества наукоемких изделий. Особое внимание уделяется разработке инновационных рабочих сред и расширению технологических возможностей в авиационной, космической и транспортной отраслях. Современные технологические комплексы [138], преимущественно оснащенные отечественным оборудованием, активно внедряют новые комбинированные методы, что способствует решению задач импортозамещения.

В исследовании анализируются возможности и эффективность применения комбинированных методов, оценивается их влияние на качество изделий при различных видах воздействия. Предложен унифицированный подход к проектированию комбинированных технологий с учетом технологичности каждого метода в производственном процессе [105]. Инновационным решением стало внедрение экономически обоснованного подхода к управлению качеством наукоемких изделий через создание эффективных эксплуатационных свойств с использованием многослойных покрытий [30; 102]. Это существенно обогатило научную базу в области технологических наук.

Многолетние исследования, включая авторский опыт, позволили детально изучить производственную технологичность изделий и усовершенствовать конструкции и технологии [29; 101; 106]. Научные школы Воронежа [29], Брянска [132] и других городов России и зарубежья подтвердили реальную возможность повышения качества наукоемких изделий путем применения комбинированных методов обработки в управляемых технологических средах [29]. Достижение высокого качества перспективных наукоемких изделий в авиакосмической и машиностроительной отраслях требует дальнейшего изучения и разработки научных основ комбинированных методов обработки, особенно в контексте современных технологических комплексов, ранее зависимых от импортных решений.

1.2 Роль и место комбинированных воздействий в проектируемых комплексах

В проектировании технологических комплексов учитываются физические взаимосвязи между воздействиями [97] и качественными характеристиками [123] создаваемых изделий, с использованием разнообразных рабочих сред. Предлагаемые соискателем закономерности управления эксплуатационными показателями различных методов, в том числе технологических [97, 132], являются важным элементом этого процесса. Основанием для разработки новых видов обработки в технологических комплексах служат известные физические явления, определяющие технологические возможности процессов формообразования. К таким воздействиям относятся механические, тепловые, химические, магнитные и ядерные обработки, в которых применяется электрический ток, подаваемый в зону обработки, обеспечивая энергией выполнение технологических операций. В результате область применения рассматриваемых комбинированных воздействий в основном ограничивается электрическими методами обработки [126].

Среди наиболее изученных и востребованных в машиностроительной технологии комбинированных методов обработки, использующих наложение

электрического поля, стоит выделить механическое воздействие на объект. Оно, как и магнитное поле, имеет два основных типа: постоянное и импульсное.

Постоянное механическое воздействие широко используется в большинстве процессов обработки с применением режущих инструментов. В свою очередь, к импульсным методам комбинированной обработки относятся механические воздействия абразивных частиц, применяемые в ходе чистовых и доводочных операций, включая шлифование, полирование, притирку и аналогичные процессы. Также сюда входят силовые контактные методы, такие как ковка, штамповка и вибрационное упрочнение. Кроме того, рассматриваются и методы, связанные с наложением вибраций, лучевых импульсов и ультразвуковых колебаний, которые могут использоваться для размерной обработки и интенсификации производственных процессов. В некоторых случаях такие методики составляют более половины общей трудоемкости при производстве высоконаучных изделий. Применение комбинированных методов в сочетании с другими воздействиями, например, газовыми, жидкими и твердыми рабочими средами, существенно повышает технологические показатели в производстве. Это открывает новые возможности для улучшения качества и создания высококонкурентной продукции, особенно в рамках отечественного производства [29].

1.3 Виды используемых для комбинированных методов физических воздействий

Тепловое воздействие является одним из наиболее распространенных физических воздействий в технологических процессах. Оно может применяться как в качестве отдельной операции (например, при термообработке), так и в составе комплексных процессов, включая нагрев при механической обработке, электроэрозионные процессы и модификацию свойств материалов. В современных технологиях часто используется комбинация различных видов воздействий.

Химическое воздействие широко применяется в производственных процессах: от очистки заготовок и полирования до формообразования листовых деталей с помощью фотошаблонов и изготовления знаков. Этот тип воздействия также лежит в основе нанесения покрытий и химико-термической обработки (цементация, цианирование). Он является ключевым элементом электрохимической размерной и комбинированной обработки, где происходят химические преобразования.

Магнитное и лучевое воздействия обычно входят в состав процессов, требующих электрического тока и создающих электромагнитные поля разной интенсивности. Как самостоятельное воздействие в комбинированных методах обработки магнитное воздействие применяется редко.

Ядерное воздействие, являясь одним из методов лучевой обработки, пока не получило широкого распространения в машиностроении, несмотря на его положительное влияние на усталостную прочность элементов при знакопеременных нагрузках. Ограничивает применение отсутствие точных количественных характеристик ядерного облучения и недостаточное понимание взаимосвязей между технологическими параметрами процесса [126].

При комбинированном использовании различных инструментов (лезвийного и абразивного) в процессе резания происходит одновременное механическое и тепловое воздействие на материал заготовки. Это может вызывать изменения в химическом составе сплавов и влиять на качество детали и свойства технологической среды. Для эффективного управления процессом необходимо контролировать количество выделяемой тепловой энергии, например, через теплоноситель жидким электролитом при эрозионно-химической обработке.

Использование известных воздействий в комбинированных методах обработки при технологических комплексах приведено на рисунке 1.1 [138].

При разработке комбинированных процессов важно научно обосновать граничные условия применения каждого вида воздействия, так как их нарушение может снизить эксплуатационные характеристики конечного продукта. Для формирования эффективной структуры комбинированного процесса достаточно

учитывать основные внешние воздействия, поддающиеся управлению, и их взаимное влияние на технические, организационные и экономические показатели производства. В зависимости от требований к качеству обработки могут применяться различные виды электрического тока, регулирующие анодные и катодные процессы в средах с постоянным или переменным физическим состоянием.

Как показано на рисунке 1.1 при комбинированном резании с использованием лезвийного и абразивного инструмента происходит одновременное механическое и тепловое воздействие на обрабатываемый материал. Такое сочетание воздействий может вызывать изменения в химическом составе сплавов и другие явления, которые могут как положительно, так и отрицательно влиять на качество детали и характеристики технологической среды. Для обеспечения эффективного процесса необходимо контролировать количество выделяемой тепловой энергии, например, путем ее отвода с помощью жидкого электролита при эрозионно-химической обработке. При этом крайне важно научно обосновать предельные параметры каждого вида воздействия, поскольку их нарушение может привести к ухудшению эксплуатационных характеристик разрабатываемого метода обработки. Количественное обоснование этих параметров осуществляется согласно методике, описанной в источнике [97], в процессе оптимизации технологичности конструкции.

Анализ различных рабочих сред в комбинированных методах обработки показывает, что для описания механизма процесса достаточно учитывать только основные, преимущественно внешние воздействия, поддающиеся управлению, а также некоторые виды их взаимного влияния на технические, организационные и экономические показатели производства.



Рисунок 1.1 — Классификация воздействий в комбинированных методах обработки, используемых в технологических процессах и комплексах

На основе анализа различных комбинаций известных технологических воздействий в средах с разными физическими свойствами (см. рисунок 1.1) выявлено потенциал для разработки более 800 новых комбинированных процессов. Это также открывает возможности для создания множества технологических сред с улучшенными характеристиками, которые могут значительно повысить качество высокотехнологичных изделий и способствовать решению задач импортозамещения. Данная область представляет значительный интерес для развития технологической науки, так как на сегодняшний день мировой практикой освоено лишь 20-30 подобных технологических методов. При этом большинство из них применяется в традиционных средах с постоянным током, где роль анода выполняет обрабатываемая заготовка. Это составляет всего около 2% от потенциально возможных комбинированных методов обработки, необходимых современной промышленности.

Таким образом, существует огромный нереализованный потенциал для развития новых технологических решений в области комбинированной обработки материалов [29].

1.4 Назначение и обоснование выбора технологических рабочих сред при проектировании комбинированных методов обработки с постоянным и переменным составом [2; 16; 40; 43; 150 и др.]

Под технологическими рабочими средами в комбинированных методах обработки понимают вещества в различном агрегатном состоянии с индивидуальными физическими параметрами, размещенные в зоне протекания процесса при внешних воздействиях, определяющих величины энергетических затрат, требуемых для осуществления технологической операции.

Для расчета, выбора и назначения сред в рассматриваемых методах обработки используют опыт предшествующего исторического периода, позволяющий формировать воздействия и их сочетания в виде комбинированных методов, используемых во всех видах производства продукции, в том числе при создании технологических комплексов [138]. Обобщенные сведения по этому вопросу приведены в форме таблицы 1.1 по материалам работы профессора Саушкина Б.П. [142].

Таблица 1.1 - Технологические рабочие среды, и технологические показатели для рассматриваемых в работе методов обработки

Технологическая рабочая среда	Исследуемый способ обработки	Технологические показатели					Средние удельные затраты энергии	
		Производительность, см ² /мин	Достигаемая точность		Качество ПС (R_{min}, h)			
			Δ , мм	Квалитет	R_a , мкм	h , мкм (h -глубина)	Вт/см ²	Дж/см ²
Воздух	1. Р. Резание:							
	– точение	3–300	0,3–0,05	7–14	0,16	20–200	—	$2 \cdot 10^3$
Жидкость	– фрезерование	0,15–60	0,05	7–13	0,32	20–70	—	$6 \cdot 10^3$
Пары	– протягивание	0,3–30	—	6–9	0,16	5–10	—	$2 \cdot 10^4$
Газы, жидкости	– шлифование	0,3–1,8	—	6–9	0,16	1–20	—	$6 \cdot 10^4$
Диэлектрическая жидкость	2. ЭЭО. Эрозионная обработка токопроводящих материалов	25	0,04	—	1,25	20–5000	$10^4 - 10^6$	—
	–прошивка отверстий	0,5	0,02	7–8	1,25	20–50	—	10^6
	–электроконтактная черновая обработка	500	—	12–14	40–160(R_z)	500–5000	$10^3 - 10^8$	—
Абразивная суспензия	3. УЗРО. Ультразвуковая размерная обработка	2	0,02	7–9	0,63	1–50	$10^3 - 10^4$	$4 \cdot 10^6$
Электролиты	4. ЭХРО. Электрохимическая размерная обработка	25	0,1	—	0,32	—	$10^3 - 10^4$	—
Газ, вакуум	5. СЛО. Светолучевая обработка (лазер).	—	0,01	—	5	100	$10^6 - 10^8$	$5 \cdot 10^6$
Вакуум	6. ЭЛО. Электронно-лучевая обработка	1	0,01	—	5	10–200	$10^6 - 10^8$	$5 \cdot 10^5$
Газ, жидкость	7. ПО. Плазменная обработка	500–2000	0,1–0,5	—	160–320(R_z)	500–1000	$10^3 - 10^5$	—
Кислоты, щелочи	8. ХО. Химическая обработка в агрессивных средах	$S \cdot 10^{-3}$, где S - площадь обработки	Сохраняется точность заготовки		—	—	—	—

Приведенные в таблице 1.1 составы и физические характеристики технологических рабочих сред могут значительно изменяться при проектировании комбинированных методов обработки в зависимости от назначения технологической операции. Так при эрозионно-химической прошивке отверстий малого диаметра, например в форсунках авиационных и жидкостных ракетных двигателей, процесс может протекать при использовании нескольких видов воздействий и обеспечивать более высокие технологические показатели, отмеченные в [142] и раскрытые в таблице 1.2.

Таблица 1.2 - Технологические показатели в используемых рабочих средах при прошивании отверстий малого диаметра по [142]

Технологическая рабочая среда	Метод или способ обработки		Технологические показатели				Дефектный измененный поверхностный слой	Негативные факторы процесса обработки
			Подача, мм/сек	Шероховатость	Погрешность размера, мм	Отн. износ инструмента		
Суспензия эмульсол, сода	Механические	УЗРО	1,8	1,25–2,5	0,01–0,02	150	Риски глубиной 0,1 мм, насыщение ПС абразивом, наклеп	Не эффективна обработка материалов, сколы, заусенцы, острые кромки
Вода	Тепловые	ЭЭО	0,1–0,5	0,63–2,5	0,1	60–120	Оплавленный слой, микротрещины	Снижение усталостной прочности детали, острые кромки. Обрабатывается только токопроводящие материалы
Воздух, газы		СЛО	0,5	1,25–1,16	0,05–0,1	—	Оплавленный слой, микротрещины	Конусность и нестабильность диаметра отверстия по глубине. Образование на входной кромке валика застывшего металла
Низкий вакуум		ЭЛО	0,5	0,08–0,32	0,05–0,1	—	Оплавленный слой, микротрещины	Отверстия только круглого сечения. Конусность и неравномерность диаметра по глубине

1.5 Оптимизация расчета, назначения и выбора структурных составляющих комбинированного процесса при проектировании технологических комплексов

При разработке технологических комплексов критически важно принимать во внимание целый спектр технологических показателей комбинированного метода: от уже достигнутых до теоретически возможных и научно обоснованных. Эти показатели наглядно представлены на рисунке 1.1. Особого внимания заслуживает тот факт, что при оценке технологичности и управлении рабочими средами косвенное влияние структурных элементов может оказаться более значительным, чем прямое воздействие на комбинированный процесс. Более того, такое влияние способно не только свести на нет результаты проектирования, но и ухудшить их. В источнике [28; 105] детально описаны различные виды комбинированных методов обработки, включая их структуру, технологические возможности и области применения с учетом разных типов рабочих сред. Успешность проектирования новых процессов определяется не только характеристиками рабочих сред и комбинацией воздействий, но и правильным выбором базового варианта для модернизации. Усовершенствование достигается путем изменения физических свойств рабочих сред и интеграции дополнительных методов воздействия с известными параметрами. При внедрении новых технологических методов в существующие комплексы необходимо тщательно обосновывать целесообразность добавления дополнительных видов воздействия, учитывая их совместимость и возможность практической реализации в рамках технологических комплексов, особенно если новый метод технологически сложнее уже освоенных.

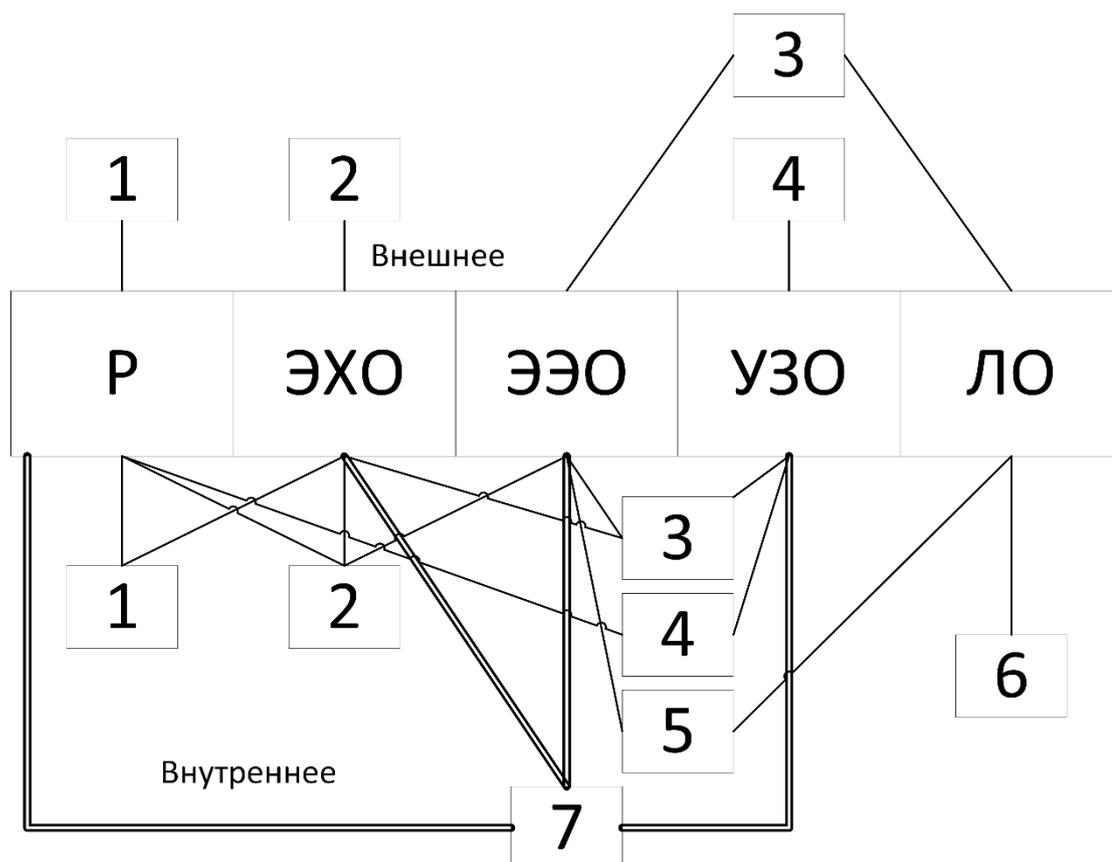


Рисунок 1.2 — Факторы, определяющие комбинированное размерное формообразование поверхности при использовании в качестве воздействия резания (Р), электрохимической (ЭХО), электроэрозионной (ЭЭО), ультразвуковой (УЗО), лучевой (ЛО) обработки. Внешние воздействия: 1 - механическое постоянное; 2 - химическое; 3 - тепловое; 4 - механическое импульсное. Внутренние воздействия: 1 - наклеп поверхности, 4 - хрупкость материала, 7 –совместимость материалов инструмента и детали; свойства обрабатываемого материала (1. физико-механические характеристики обрабатываемого материала; 2 - состав; 3 – структура материалов и технологических рабочих сред; 5 - температура плавления; 6 - отражательная способность)

На рисунке 1.2 показаны внешние и внутренние факторы, определяющие показатели практически используемых методов обработки, на базе которых можно

комбинировать нетрадиционные гибкие технологии, в их числе - для технологических комплексов.

В рамках анализа, представленного на рисунке 1.2, при определении комбинированных воздействий основное внимание уделяется факторам внешнего воздействия на процессы обработки. Среди внутренних характеристик обрабатываемого материала большинство параметров являются его фундаментальными свойствами и на текущий момент не поддаются эффективному управлению для улучшения технологических показателей и качества обработки. Тем не менее существуют исключения: такие параметры как наклёп, отражательная способность поверхности, а также физические свойства и состояние технологических рабочих сред могут быть существенно оптимизированы. Однако даже эти регулируемые факторы не всегда обеспечивают создание оптимальных рабочих сред, достижение желаемых технологических режимов и разработку эффективных методов управления процессом.

В связи с этим особую актуальность приобретают задачи 3 и 4, направленные на минимизацию негативного влияния различных факторов на эксплуатационные характеристики и качество высокотехнологичных изделий. Из сказанного следует, что направленное управление процессом [1,6], в том числе параметрами, определяющими качественные показатели изделия в комплексах, практически целесообразнее осуществлять через внешние факторы, в том числе включающими рабочие среды с различным постоянным и переменным состоянием. Связь между качественными показателями комбинированных методов обработки и внешними воздействиями может быть представлена в виде комплекса, где возможно сочетание различных элементов.

$$P_p \supset (M, X, M_n, M_u, T_n, Я, MX, MM_n, MM_u, MT_n, МЯ, XM_n, \dots),$$

$$P_r \supset (M, X, M_n, M_u, T_n, Я, MX, MM_n, MM_u, MT_n, МЯ, XM_n, \dots),$$

$$R_z \supset (M, X, M_n, M_u, T_n, Я, MX, MM_n, MM_u, MT_n, МЯ, XM_n, \dots),$$

$$T \supset (M, X, M_n, M_u, T_n, Я, MX, MM_n, MM_u, MT_n, МЯ, XM_n, \dots),$$

$$G_i \supset (M, X, M_n, M_u, T_n, Я, MX, MM_n, MM_u, MT_n, МЯ, XM_n, \dots),$$

$$U \supset (M, X, M_n, M_u, T_n, Я, MX, MM_n, MM_u, MT_n, МЯ, XM_n, \dots),$$

$$\mathcal{E} \supset (M, X, M_n, M_u, T_n, Я, MX, MM_n, MM_u, MT_n, МЯ, XM_n, \dots),$$

где производительность Pr , погрешность Pg , шероховатость Rz (или другой параметр), глубина измененного слоя T , механические свойства обработанного материала Gi (или другой показатель), износ инструмента U , удельный расход электроэнергии \mathcal{E} зависят от магнитного M (лучевого), химического X , механического постоянного Mn и импульсного Mu , теплового Tn , ядерного $Я$ воздействия и их сочетаний.

Создание комплексной математической модели для оптимизации комбинированных процессов и их управления осложняется тем, что пока недостаточно изучено, как внешние воздействия влияют друг на друга. Тем не менее, при введении определенных допущений, можно оптимизировать выбор внешних факторов. Для достижения этой цели следует оставить только те воздействия, которые существенно влияют на общую оценку технологического показателя. Важно отметить, что каждое из этих воздействий может иметь множество технологических применений, и для эффективного управления ими необходимо использовать модели, разработанные в ходе решения второй и четвертой задач данной работы.

Магнитное воздействие (M), включающее влияние электромагнитных полей, электрического и лучевого воздействия на характеристики обрабатываемых объектов [126; 150], не оказывает мгновенного прямого эффекта на показатели процесса. Однако его применение существенно изменяет динамические характеристики, такие как физическое состояние сред с переменным агрегатным состоянием и свойства абразивных гранул при комбинированном шлифовании, особенно в труднодоступных зонах и местах подвода инструмента [10; 43]. При анализе различных воздействий важно учитывать их инвариантность [105; 150]. Например, тепловые факторы, в зависимости от характеристик рабочих сред, значительно влияют на технологические показатели при лучевой и электроэрозионной обработке, разновидностей которых на сегодняшний день

изучено не менее семи. Механическая обработка демонстрирует особенно широкий спектр возможностей применения в комбинированных процессах.

Формирование и обоснование структуры взаимодействий в комбинированном процессе осуществляется с учетом комплексного влияния различных факторов, при этом особое внимание уделяется соответствию требованиям, предъявляемым разработчиками технологических комплексов [126; 138; 150].

Одним из ограничений для применения рабочих сред в комбинированных процессах является не полная оценка доли полезного использования электрической энергии в комбинированных воздействиях на технологичную операцию, где для сравнения используется только доля технологического тока. В производственных условиях следует учитывать всех основных потребителей, как это сделано в таблице 1.3 [142], где приведены полезные обобщения по этому вопросу, позволяющие грамотно обосновать назначение и выбор технологических сред по методикам, которые разработаны соискателем в главе 3 для решения задачи 6 диссертации.

Таблица 1.3 - Энергопотребление на технологические воздействия для используемых методов обработки

Метод обработки	Удельный расход энергии, кВт ч/кг	Мощность оборудования, кВт	КПД использования энергии	Сравнение с обработкой резанием
ЭЭО	7–50	1–100	0,1–0,6	выше
ЭХРО	8–30	1–120	0,6–0,9	выше
УЗО	25–250	0,1–25	0,2–0,4	выше
СЛО	250–2000	0,5–5	0,02–0,2	Значительно выше

Сведения из таблицы 1.3, наряду со стоимостью в текущий период и ресурсом технологической среды, позволяют уточнить исходные условия для объективной оценки технологичности при использовании перспективных рабочих сред, часть которых приведена в [142] (раздел 2.2.5.3).

Приведенные выше результаты анализа процесса использования, выбора и назначения рабочих сред в комбинированных методах обработки является базой для построения теоретической и прикладной части диссертации и позволяет успешно решить задачи 1, 2, поставленные в работе.

1.6 Типовые технологии комбинированной обработки с принятыми составами технологических рабочих сред

При разработке технологий комбинированной обработки необходимо выполнить обоснование выбора метода воздействия в технологических системах согласно [103]. В рамках этой задачи были проанализированы примеры создания типовых комбинированных технологических процессов. Особого внимания заслуживает операция формообразования отверстий различного профиля с постоянным и переменным изгибом оси, которая широко применяется в авиакосмической отрасли при производстве топливных форсунок и фильтров тонкой очистки жидкостей [2; 112]. Для обработки каналов сложного сечения в материалах, трудно поддающихся резанию, наиболее эффективным является метод комбинированного электроэрозионно-химического прошивания. Хотя оба указанных метода обеспечивают необходимую точность, требуемую шероховатость поверхности и другие параметры, соответствующие требованиям сборки, они имеют недостаток в виде невысокой производительности. В связи с этим, после завершения этапа отработки технологичности по [12], техническое задание на прошивание должно содержать специальное требование: обеспечить максимально возможную скорость подачи инструмента при минимальных затратах, сохраняя при этом все остальные технологические показатели в пределах допустимых норм.

Анализ существующих методов обработки показывает, что максимальную производительность при прошивке обеспечивают электроконтактная, электрохимическая, электроимпульсная технологии, а также их комбинации. Однако эти методы имеют ограничения по обеспечению требуемых показателей

качества поверхности и точности обработки. Среди всех параметров наиболее подходящими под требования технического задания являются химические характеристики электрохимической размерной обработки. Именно эти параметры рекомендуется использовать как базовую величину при разработке комбинированных технологических процессов. Для достижения заданных показателей качества изделий необходимо применять проверенные способы интенсификации процесса. Согласно теории электрохимической размерной обработки [101], ключевым фактором является обеспечение интенсивного массовыноса продуктов обработки. При этом важно учитывать, что увеличение скорости прокачки токопроводящей рабочей жидкости имеет свои пределы [101; 103; 105]. Превышение этих пределов приводит к неконтролируемому росту погрешностей, ухудшению качества обработки и значительному увеличению энергопотребления.

Для получения положительных результатов рекомендуется применять депассивацию поверхности [102; 104] и нанесение покрытий. В качестве методов воздействия могут использоваться механическое воздействие (как постоянное, так и импульсное), а также тепловое воздействие [126]. «Электроимпульсная составляющая в комбинированной обработке не всегда обеспечивает требуемое качество поверхностного слоя, а введение в зазор дополнительной энергии лучом лазера [103;105] хотя и способно давать значительный прирост производительности, но технически трудно осуществимо и возможно только для прозрачного электрода и чистого электролита, что может наблюдаться лишь в начале обработки. Из-за этого светолучевая интенсификация процесса нашла ограниченное использование» [126]. В качестве средств интенсификации и повышения качества в современных технологических комплексах рекомендуются в [105] тепловые, химические и лучевые воздействия в сочетании с механической составляющей. Так использование теплового электроэрозионного метода с подогревом зоны обработки позволяет ускорить комбинированный процесс за счет удаления окисных пленок, выноса продуктов обработки с поверхности электролизера микрообъемами жидкости, приобретающей большие ускорения в

зоне разрядов [101]. При этом возникающие пульсации малых объемов электролита практически не сказываются на точности обработки. Однако по мере углубления инструмента в деталь интенсификация процесса электроискровым воздействием быстро ослабевает и через несколько миллиметров практически прекращается, что действительно наблюдается при использовании электроэрозионнохимической обработки, в том числе с наложением электромагнитных, ультразвуковых полей [103].

Ультразвуковая обработка представляет собой механические импульсные воздействия в жидкой или газовой среде, которые эффективно ускоряют удаление продуктов обработки и улучшают качество комбинированной обработки внутренних поверхностей металлических деталей независимо от глубины погружения инструмента. Данная технология успешно интегрирована в технологические комплексы [138] в форме комбинированного процесса, сочетающего электроэрозионную и ультразвуковую обработку. Предшественником этого метода является эрозионно-химическая прошивка с низкочастотной вибрацией инструмента. Однако применение ультразвуковых колебаний имеет существенные ограничения:

- невозможность перемещения крупногабаритных и массивных инструментов;
- снижение жесткости подвижной системы;
- возникновение дополнительных погрешностей.

В связи с этими ограничениями более широкое практическое применение получили низкочастотные колебания, несмотря на их меньшую эффективность. Их преимущество заключается в:

- более высоком коэффициенте использования энергии;
- простоте конструкции;
- повышенной надежности оборудования [29].

Развитие и уточнение материалов, приведенных в разделе, способствует решению третьей и пятой задачи для достижения цели, поставленной в работе [103].

1.7 Обзор результатов использования технологических рабочих сред в комбинированных методах обработке

Был проведен анализ доступных публикаций и исследований [16; 28; 43; 65; 92; 142 и др.]) по выбору и научному обоснованию назначения технологических рабочих сред с учетом показателей комбинированных методов, обеспечивающих требуемые показатели качества в технологических процессах.

На примере типовых деталей (в рассматриваемом случае прошивки отверстий малого диаметра с различной постоянной и переменной формой сечений [76; 104] эрозионно-химическим методом) по известным базовым технологическим показателем комбинированного процесса рассмотрены алгоритмы назначения режимов с наибольшей производительностью [126]) при минимизации расхода энергии для выполнения операции (таблица 1.3 по [142]).

1.8 Базовые технологические показатели, достигнутые с использованием комбинированных методов обработки

На представленной диаграмме (рисунок 1.3) отражены технологические характеристики процесса эрозионно-химического прошивания конструкционных сталей в жидкой рабочей среде. Данный метод хорошо исследован, что подтверждается наличием надежных данных, включая показатели энергопотребления (таблица 1.3). Эти сведения позволяют провести объективный анализ спроектированного технологического процесса [28, 101; 103]. При оценке результатов особое внимание уделяется их практической применимости в рамках различных технологических систем.

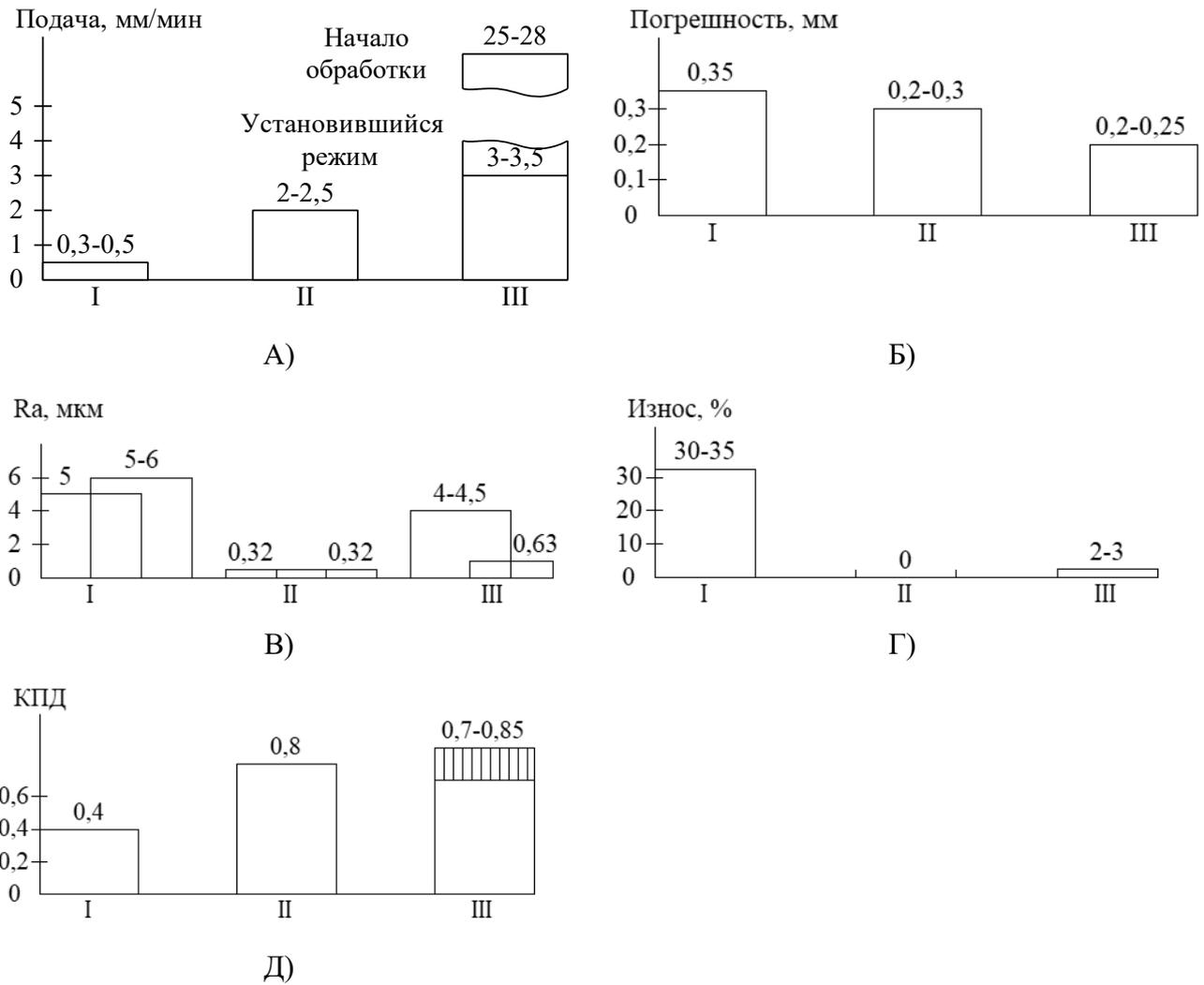


Рисунок 1.3 — Технологические показатели и эффективность освоенных и новых процессов прошивания отверстий в типовых деталях. Виды обработки: I - электроискровая, II - электрохимическая размерная; III - комбинированная обработка. Показатели процесса, определяющие качественные показатели продукции: а - скорость прошивки; б - погрешность формы и размеров отверстия; в - шероховатость торцевой (слева) и боковой поверхности; г - износ инструмента; д - коэффициент полезного использования технологического тока

Диаграмма на рисунке 1.3 демонстрирует результаты разработанного технологического процесса при применении разных рабочих сред. Представлено детальное сравнение его эффективности с традиционными методами обработки – электроискровым и электрохимическим. Анализ производительности процесса прошивки показывает впечатляющие результаты: на начальном этапе она

значительно (в 10 раз) превосходит показатели обоих базовых методов. В дальнейшем производительность остается стабильно высокой, существенно превышая аналогичный параметр при анодном растворении материала.

При работе с отверстиями небольшой глубины отчетливо видно, что средняя скорость подачи существенно (в несколько раз) превышает темп перемещения рабочего инструмента по сравнению с процессами электроэрозионной и электрохимической обработки.

При обработке в жидкой среде показатели точности, качества поверхности и энергоэффективности практически не отличаются от традиционных методов, независимо от используемой технологической среды. Что касается износа инструмента (см. рис. 1.3, г), то здесь наблюдается значительное улучшение: по сравнению с электроэрозионной обработкой он уменьшился в десять раз. На начальном этапе процесса износ становится сопоставимым с показателями безизносной схемы. При этом важно отметить, что в отличие от безизносной схемы, где производительность снижается, комбинированный метод демонстрирует её рост.

Анализ данных, представленных на рисунке 1.3, в сочетании с результатами экспериментальных исследований подтверждает соответствие комбинированного процесса всем техническим требованиям:

- достигнута высокая производительность, особенно заметная при работе с отверстиями небольшой глубины;
- обеспечен допустимый уровень шероховатости поверхности;
- обеспечен контролируемый износ инструмента;
- остальные технологические показатели либо улучшены, либо находятся на уровне исходных значений.

Таким образом, все эксплуатационные характеристики, предусмотренные технической документацией, успешно реализованы в комбинированном процессе.

В таблице 1.4 представлены параметры, которые подтверждают обоснованность применения эрозионно-химической прошивки в жидкой технологической среде. В ней содержатся: оптимальные условия для реализации

комбинированного процесса, математические зависимости для расчетов, самые результативные режимы обработки, используемые в альтернативных методах, сравнительный анализ полученных технологических показателей

Эти данные позволяют оценить эффективность выбранного метода по сравнению с другими существующими технологиями.

Анализ показателей в таблице 1.4 подтверждает обоснованность назначения электроэрозионнохимической обработки для прошивки неглубоких (до 1-2 мм) качественных отверстий [105].

Таблица 1.4 - Анализ результатов выбора воздействий и методов проектирования комбинированных методов обработки при прошивке отверстий в наукоемких изделиях [29]

Наименование метода	Режимы и расчетные технологические показатели [101]	Достигнутые показатели
1	2	3
Электрохимическая размерная обработка с наложением ультразвуковых колебаний	Напряжение - 10... 15 в, Частота колебаний 18... 22 кГц, Амплитуда колебаний - до 40 мкм, Скорость подачи инструмента: $V_k = V_{\text{эхо}} + V_{\text{узо}}$, где $V_{\text{узо}}$ – скорость съема за счет ультразвуковой обработки и интенсификации процесса анодного растворения.	Скорость прошивки - 2,5...3 мм/мин, Шероховатость - 2,5...3 мкм, Погрешность – 0,35...0,4 мм, Удельный расход энергии 100 - 120 квт. час/кг.
Электрохимическая размерная обработка с наложением низкочастотных колебаний	Напряжение - 10... 15 в, Частота колебаний - 10... 100 гц, Амплитуда (0,3...0,5) S_0 , Скорость прокачки рабочей среды $V_{\text{ж}} > 2$ м/с, Скорость подачи инструмента: $V_k = \frac{\alpha}{\gamma} \eta \frac{\beta \chi^\beta (U - \Delta U)}{S}$ где $\beta = (1,2...1,3)$ - показатель степени, учитывает воздействие колебаний	Скорость прошивки возрастает на 20%, Остальные показатели соответствуют электрохимической размерной обработке.
Электрохимическая размерная обработка с облучением лазером	Напряжение - 6...8 В,	Электрохимическая размерная обработка с облучением лазером

Таблица 1.5 содержит оптимальные параметры электроэрозионно-химической прошивки отверстий глубиной до 5-6 мм, согласно источнику [101]. Применение этих режимов существенно расширяет возможности использования как существующих, так и разрабатываемых технологических сред в комбинированных процессах обработки [29].

Представленные материалы данного раздела служат основой для решения шестой задачи диссертационного исследования. При этом вся доказательная база, использованная в разделе, подтверждает корректность постановки и решения других задач, рассматриваемых в рамках диссертационной работы.

Таблица 1.5 - Режимы комбинированной обработки [29]

Обрабатываемый материал	Состав рабочей среды	Напряжение, В	Скорость прокачки рабочей среды, м/с
Сталь конструкционная	Токопроводящие эмульсии (СОЖ), Слабые растворы: NaNO_3 (6 - 8%) с 0,5-1% NaNO_2	45-65	более 4
Нержавеющие и жаропрочные сплавы	Те же	30-40	4-6
Титановые сплавы	Слабые растворы NaCl (6 - 10%)	40-60	5-8
Алюминиевые сплавы	Слабые растворы NaNO_3	45-55	3-5

1.9 Стабилизация обеспечения качества изделий за счет комбинированных методов нанесения покрытий в различных технологических рабочих средах

Исследования технологичности [12; 122; 97] показали возможность достижения высоких эксплуатационных характеристик при обработке поверхностного слоя однослойными и многослойными покрытиями в технологических комплексах.

Комбинированные методы нанесения покрытий с использованием постоянных и переменных рабочих сред хорошо изучены и применялись для обработки различных конструкционных материалов [80; 61; 72; 89], включая:

углеродистые низколегированные стали (20, 45); высоколегированные коррозионностойкие стали аустенитного класса (12X18Н10Т) твердые сплавы.

Многослойные покрытия позволяют создавать на поверхности заготовки слои с улучшенными характеристиками: повышенной твердости; износостойкостью, жаростойкостью, коррозионной стойкостью, антифрикционными свойствами.

Особого внимания заслуживает решение проблемы нанесения чугунных покрытий на алюминиевые сплавы [72; 85]. Разработанные технологии позволили объединить в поверхностном слое ранее несовместимые свойства: защитные характеристики при работе в агрессивных средах, устойчивость к высоким температурам, сопротивление износу контактных поверхностей.

Однако, внедрение комбинированных методов нанесения защитных покрытий на алюминиевые сплавы столкнулось с рядом производственных сложностей [72]:

1. Значительная разница температур плавления и кипения используемых материалов приводила к разрушению покрытия из-за интенсивного испарения компонентов.

2. Плотная оксидная пленка на поверхности алюминиевого сплава требовала повышенных значений рабочего тока, что могло вызывать эрозию заготовки.

3. Воздействие межэлектродной воздушной среды приводило к окислению и азотированию металла, что ухудшало качество покрытия (пористость, трещины, недостаточная адгезия).

4. Существовало ограничение по толщине чугунных покрытий (не более 20-30 мкм) с возможным изменением химического состава. В научных работах [67;72] представлены эффективные способы минимизации негативных факторов путем научно обоснованного подбора компонентов в межэлектродном пространстве. Основной принцип метода заключается в тщательном выборе состава рабочей среды и технологии её применения. Особое внимание уделяется предотвращению или снижению окисления инструментальных материалов. Контроль процесса осуществляется при нанесении углеродсодержащих покрытий, при этом степень

выгорания углерода регулируется в диапазоне 40-60%. Технологический процесс предусматривает предварительное введение определенного количества специально разработанных химически активных флюсов в зону разряда перед нанесением покрытий. Это позволяет снизить термическую защиту материала на границе покрытия и предотвратить разрушение поверхностного слоя основы изделий из алюминиевых сплавов. Данная технология защищена патентом [72] и обеспечивает получение качественных защитных и токопроводящих металлических покрытий.

Согласно данным таблицы 1.6, флюсы являются сложными многокомпонентными составами, которые характеризуются различными температурными диапазонами кристаллизации. В их состав входит комбинация различных химических соединений: солей, окислов, сульфидов, прочих химических соединений. Для усиления эффективности действия флюса в его состав дополнительно вводятся специальные фтористые добавки в небольших количествах, которые активизируют его работу (источник [72]).

Важным преимуществом разработанных составов является использование доступных компонентов, традиционно применяемых при сварке и пайке алюминиевых материалов. Применение таких флюсов обеспечивает: стабильное протекание процесса нанесения, высокое качество покрытий без дефектов, повышенную коррозионную стойкость, хорошую электропроводимость, другие полезные эксплуатационные свойства [29].

Таблица 1.6 - Состав флюсов, применяемых для нанесения чугунных покрытий на детали из алюминиевых сплавов [29]

Марка флюса	Массовая доля элемента, %							
	NaF	TiO ₂	Ti порошок (ПТМ)	Cr ₂ O ₃	SiO ₂	KCl	NaCl	Na ₃ AlF ₆
ФС-71	6,4	13,6	13,6	9,1	57,3	-	-	-
АН-А1	-	-	-	-	-	50	20	30
ЖА-64	-	-	-	-	3	38	15	44
АНФ-28	41 - 49	≤ 5	26 - 32	≤ 6	20 - 24	0,1	0,5	0,06

Этот раздел можно отнести к вопросам расширения области применения новых видов технологических рабочих сред для комбинированных методов обработки при изготовлении наукоемких изделий различных отраслей машиностроения, включая двигатели летательных аппаратов, что соответствует решению задачи 6 в диссертации.

Выводы по главе

В данной главе, опираясь на фундаментальные исследования российских и зарубежных специалистов в области науки и производства, представлены и научно доказаны методы улучшения качества высокотехнологичных изделий. Эти изделия производятся с применением комбинированных технологий в разнообразных рабочих средах, где происходят изменения физических и химических воздействий, при их эксплуатации в различных технологических системах и комплексах. В работе детально рассмотрены реальные промышленные способы повышения качества отечественной техники и технологического оборудования. Это достигается через объективный анализ технологичности при применении различных технологических сред, включая те, которые были предложены автором исследования. При проведении оценки технологичности автор использовал уже проверенные производственные процессы как базовую основу. Это позволило как решать существующие задачи известными методами, так и разрабатывать новые, ранее считавшиеся невозможными технологические операции. Их показатели и условия выполнения составляют основное содержание данного исследования.

Глава 2 Методы решения поставленных задач и достижения поставленной в работе цели

2.1 Научные гипотезы для решения задач работы

1. В основу построения перспективных комбинированных методов с используемыми технологическими рабочими средами должен быть положен принцип, где каждый вид воздействия осуществляется через физические параметры и зависит от других, а их сочетание в технологических комплексах способно усилить положительный эффект суммарного воздействия на технологические показатели, где критерием оценки является заявленный уровень в разрабатываемом комбинированном процессе и возможность повышения эксплуатационных показателей в перспективе.

2. Достигнутый в технологической науке и раскрытый в состоянии вопроса материал уровня знаний по управлению механизмом выбора технологических рабочих сред достаточен для создания теоретически обоснованной доказательной базы качественного и количественного обоснования варианта серийного производства по критерию полезности, позволяющего планировать загрузку, резервы и средства для содержания и развития специального машиностроения.

3. При обосновании выбора технологических рабочих сред требуется учитывать не только их физические параметры, но и ограничения по безопасности эксплуатации в производстве, стойкости, доступности приобретения без привлечения валютных средств, что может служить граничными условиями при моделировании процессов отработки производственной технологичности.

4. Правомерность системы научного обоснования выбора и разработки новых видов технологических рабочих сред и уровня их воздействия на технологические показатели комбинированной обработки с наложением электрических, магнитных полей может быть достигнута на типовых примерах освоенных и проанализированных в состоянии вопроса комбинированных видов обработки наукоемких изделий преимущественно авиакосмической отрасли машиностроения

и доказана возможность выбора требуемого состава и свойств технологических рабочих сред с использованием различных физических параметров с постоянным или управляемым переменным агрегатным состоянием, обеспечивающим создание технологических процессов, отвечающих основным запросам заказчика, для чего в работе предложена доказательная база и научные основы управления технологическим процессом через критерии производственной технологичности и эффективные пути усиления желаемых воздействий и подавления негативных явлений.

5. Обоснование выбора предпочтительных рабочих сред целесообразно выполнять путем анализа ситуации с оценкой их положительных и негативных воздействий на комбинированные процессы, где наиболее полно проявляются возможности теории делового конфликта для выявления достижимых показателей в процессе отработки производственной технологичности объекта.

6. Создание научно обоснованных видов новых технологических рабочих сред целесообразно выполнять с использованием доступной имеющейся тематической патентной базы, что даст возможность расширить область эффективного использования в промышленности комбинированных методов обработки и позволит обосновать плановую работу по совершенствованию технологии отечественного машиностроения.

7. При использовании сред с переменным стохастическим состоянием и свойствами целесообразно использовать в алгоритмах выбора и расчета параметров осредненные сведения из работ отечественных и зарубежных ученых, оцениваемых по уровню технологичности, что позволит управлять поиском перспективных сред и сократить сроки освоения новых комбинированных способов в серийном производстве при ограниченных сроках и объемах затрат на теоретические и экспериментальные работы.

2.2 Экспериментальное оборудование

Для проверки теоретических и прикладных результатов использования имеющихся и создаваемых рабочих сред применялось оборудование и средства технологического оснащения, часть которых изготавливались с участием соискателя, а комплектующие узлы и средства управления процессом выбирались из ранее созданных или приобретенных конструкций, проверенных на надежность в процессе эксплуатации оборудования по прямому назначению.



Рисунок 2.1 — Экспериментальная электроэрозионно-химическая установка для комбинированной прошивки отверстий в жидкой рабочей среде

Установка на рисунке 2.1 имеет 3 рабочих головки, подключенных к различным источникам подвода энергии. Это позволяет быстро перенастраивать технологические режимы при проведении опытов.

На установке были получены подтверждения правомерности расчетных зависимостей нашей работы, результатов моделирования процессов по выбору рабочих сред для комбинированной обработки различных марок материалов и обоснование режимов для различных технологических сред при типовых операциях обработки, в первую очередь наукоемких изделий высокой точности с

соблюдением параметров, установленных для отраслевого машиностроения. Такие материалы экспериментов необходимы при критериальной оценке технологичности различных видов технологических сред, в том числе перспективных для комбинированных методов формообразования.

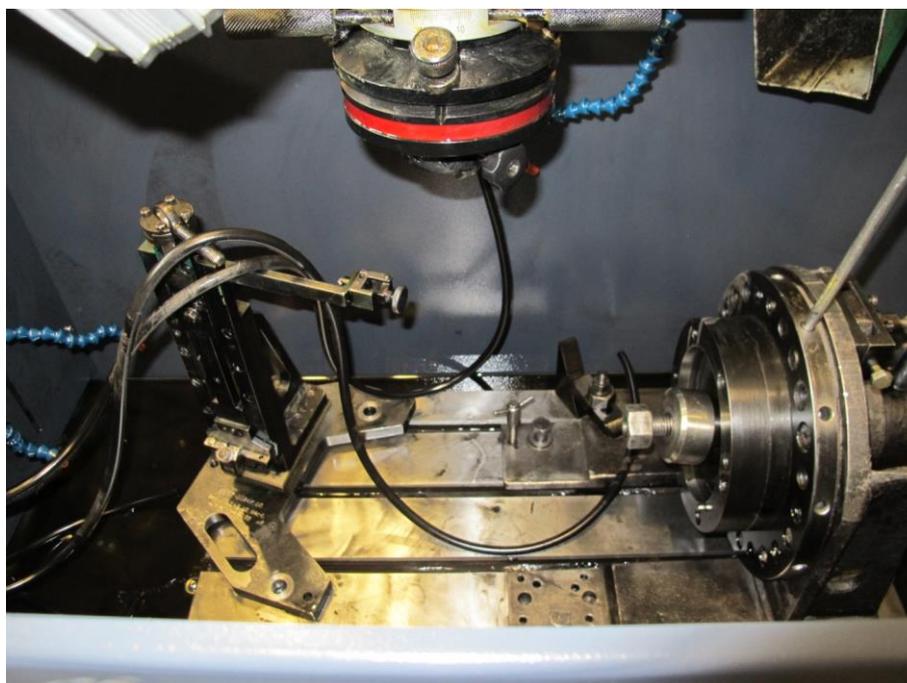


Рисунок 2.2 — Рабочая зона экспериментальной установки для комбинированной обработки радиальных отверстий в деталях типа форсунок

В установке (рисунок 2.2) предусмотрена настройка положения электрода-инструмента при прошивке каналов любого профиля сечения или интенсификация массовыноса жидкой, а также коллоидной рабочей средой твердых, газообразных продуктов операции из зоны обработки для получения высокого качества проточных каналов или уточнения параметров управления различными воздействиями и составом рабочих сред с предлагаемыми физическими свойствами.

Последовательность операций по перенастройке оснастки для установки на рисунке 2.2 регламентируется инструкцией, прилагаемой к ее описанию, с учетом особенностей конструкций обрабатываемых деталей и требуемых

эксплуатационных показателей, достижимых на станке типа представленного на рисунке 2.3.



Рисунок 2.3 — Серийный электроэрозионный станок

Для использования в станке на рисунке 2.1 современного источника импульсного тока и средств его управления в качестве электроэрозионного воздействия при экспериментах использовались агрегаты современного серийного станка, приведенного на рисунке 2.3.

Использование систем и узлов из рисунка 2.3 не нарушает их работоспособности, не требует разрешения от изготовителя или поставщика оборудования для вскрытия стыковочных элементов и не нарушает установленные гарантии на период его безотказной работы в условиях грамотной эксплуатации. Наиболее полно таким требованиям отвечает генератор, показанный на рисунке 2.4, обладающий свойствами, требуемыми при экспериментальных исследованиях параметров комбинированных процессов, осуществляемых с различными технологическими рабочими средами.



Рисунок 2.4 — Источник питания током производства компании ООО «ЕСМ»*, г. Уфа

В экспериментах для реализации режимов установки на рисунке 2.1 использовался импульсный источник питания током (рисунок 2.4) с автоматизированной системой электрохимического воздействия в комбинированном процессе, который создан на базе инверторного преобразователя с автономным воздушным охлаждением, имеющего широкий диапазон режимов для настройки параметров комбинированного процесса, что требуется в экспериментальной установке при подаче импульсов прямой и обратной полярности. Его достоинством является возможность подключения к станку без модернизации конструкции и независимость настройки относительно других видов воздействий, в том числе для увеличения мощности при любом соотношении параметров процесса и компонентов рабочей среды.

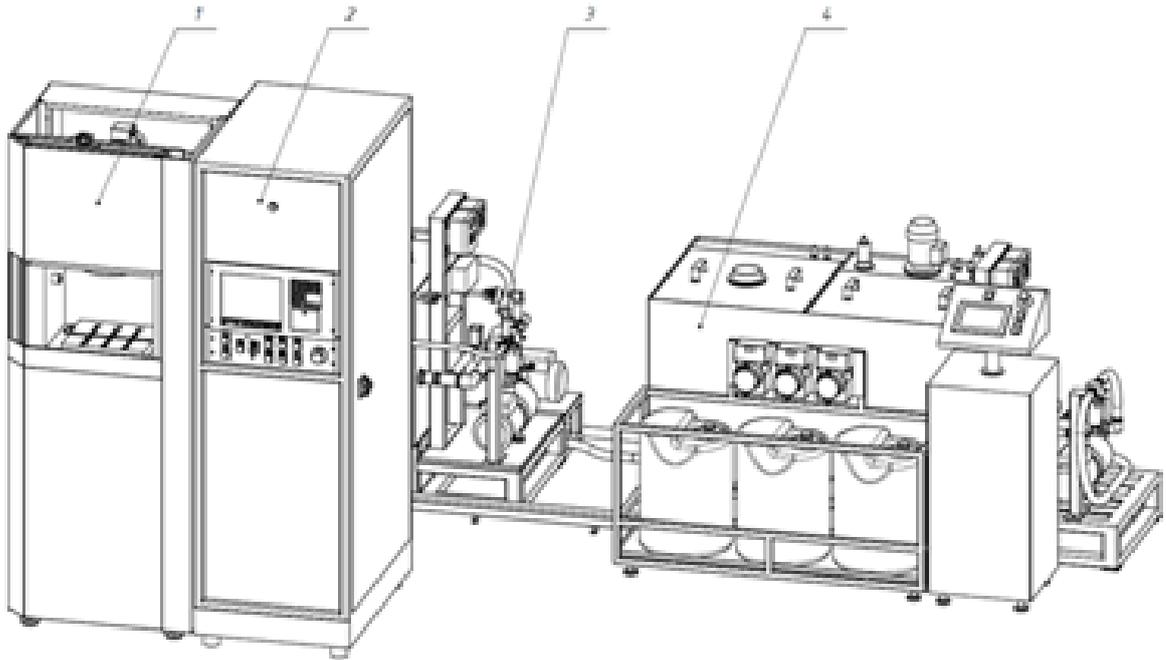


Рисунок 2.5 — Структурная схема станка для комбинированной обработки, используемая в ООО «ЕСМ»

На рисунке 2.5 показана базовая структурная схема с комплектацией источником тока и средствами управления, в которой при незначительной модернизации появилась возможность осуществлять комбинированную обработку эрозионно-химическим способом с использованием тепловых (источник импульсного тока станка на рисунке 2.3, средства управления и др.) и химических воздействий при отработке технологичности на стадии освоения выпуска серийной продукции.

2.3 Средства измерения и испытаний

Для исследования влияния тепловых воздействий на термически обработанные образцы перед их комбинированной обработкой использовались муфельные печи типа СНОЛ, приведенные на рисунке 2.6. Они оснащены камерами для создания достаточно высокого нагрева (плоть до температуры плюс 1300⁰С) и для охлаждения воздушной рабочей среды до минус 80⁰С (представлено

камерой тепла-холода КТХ-0,063 на рисунке 2.6 крайний справа). Подобные температуры могут иметь место при выборе рабочих сред в перспективе с учетом использования комбинированных методов обработки на космических объектах.



Рисунок 2.6 — Участок термической обработки

На рисунке 2.7 показан стереоскопический бинокулярный микроскоп прямого действия фирмы Nikon модели SMZ 745 с цифровой системой регистрации и обработки получаемых изображений с увеличением оптической системы до 105 крат и цифровым увеличением получаемых изображений до 350 крат. За счет встроенного программного обеспечения прибор позволяет строить в автоматизированном режиме оптическую фрактографическую картину рельефа поверхности, что необходимо при исследовании получаемой комбинированными методами обработки шероховатости, контролировать наличие структурных изменений поверхностного слоя обрабатываемой заготовки, поределять характер макропластических деформаций поверхности.



Рисунок 2.7 – Стереоскопический бинокулярный микроскоп для проведения исследований образцов после комбинированной обработки в рабочих средах различного физического состояния

2.4 Научно обоснованные способы и устройства для выбора и критериального обоснования технологических сред

Как показано в главе 1 при проектировании комбинированных методов обработки используются технологические рабочие среды с различными физическими параметрами и постоянным или изменяющимся в процессе обработки агрегатным состоянием. Большинство сред для исследуемого применения создано в последние годы, в том числе с участием соискателя [80;82]. Они используются в качестве вакуумированного состояния, в основном при низком вакууме (комбинированная обработка электронным лучом, при использовании лазера в космических аппаратах и др.). При применении газовых сред, в основном воздуха и защитных газовых смесей, обычно совмещают в комбинированном процессе тепловое воздействие [83;84], при котором агрегатное состояние среды периодически изменяется от газообразного до жидкого состояния. В эрозионно-химических видах обработки могут применяться в основном жидкие составы, но возможно использование газов, химически активных кислот, щелочей и других

веществ. Среды повышенной вязкости типа эмульсий с постоянным и переменным агрегатным состоянием используются при эрозионно-химической обработке в виде мелкодисперсных углеводородных смесей с водой, маслами, химически активными водными составляющими (их использование более подробно рассмотрено в главе 5).

Новым направлением является проектирование комбинированных методов обработки с твердой рабочей средой, которая в ряде случаев использования переходит в другие агрегатные состояния с различными видами воздействий. Эти варианты приведены в [43;72; и др.].

Состав и свойства рабочих сред определяют технологические возможности и показатели комбинированных методов с наложением полей, что создает условия для проектирования технологических режимов, способов и устройств, представляющих коммерческую тайну, подлежащую патентной защите. Новые патенты, захватывающие проектируемые технологические средства с различными физическими параметрами, представлены в главе 5 работы.

2.5 Методология выбора технологических рабочих сред

Для достижения поставленной в работе цели требуется разработать научные гипотезы типа представленных в разделе 2.1, создать методы и средства для реализации доказательной базы правомерности полученных теоретических закономерностей и обеспечить заданное качество объектов производства при минимизации сроков и стоимости работ. Для этого анализируется достаточность производственной базы с использованием имеющегося оборудования на предмет его пригодности для изучения процесса обработки в используемых и перспективных рабочих средах, что служит базой для отработки производственной технологичности, итоговые оценки которой позволяют объективно установить выбор предпочтительного назначения или создания способов обработки, а в дальнейшем – проектирования технологического процесса. В ряде случаев методология выполнения исследований выполняется в автоматизированном

режиме по представленному в работе алгоритму (рисунок 2.8) с использованием численных методов и искусственного интеллекта.

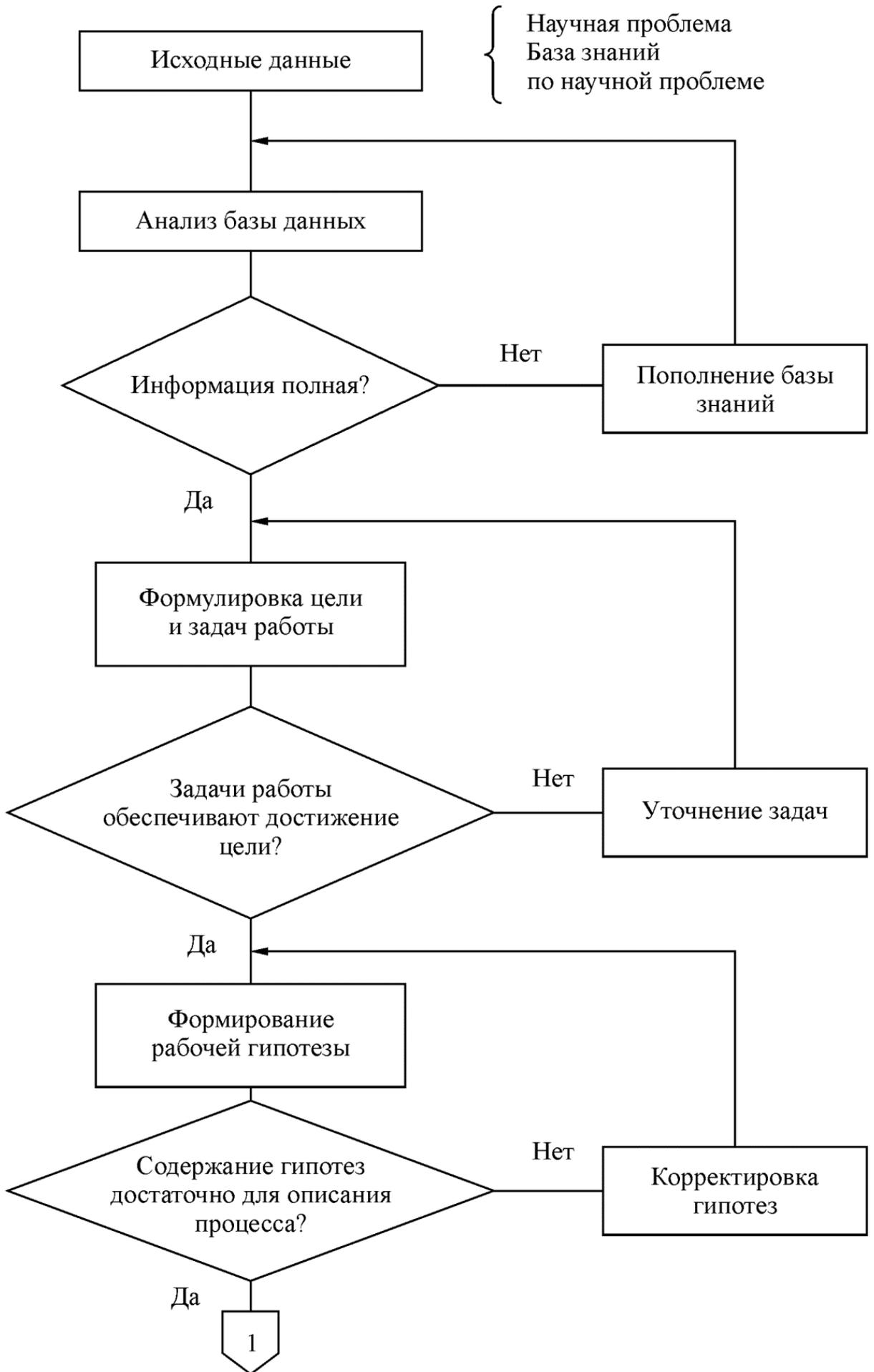
Далее выполняется поиск и обоснование обобщенных принципов оценки полезности известных и разрабатываемых мероприятий на выбор имеющихся показателей создаваемых технологических рабочих сред для повышения (желательно до предельно достижимого) уровня эксплуатационных характеристик изделия.

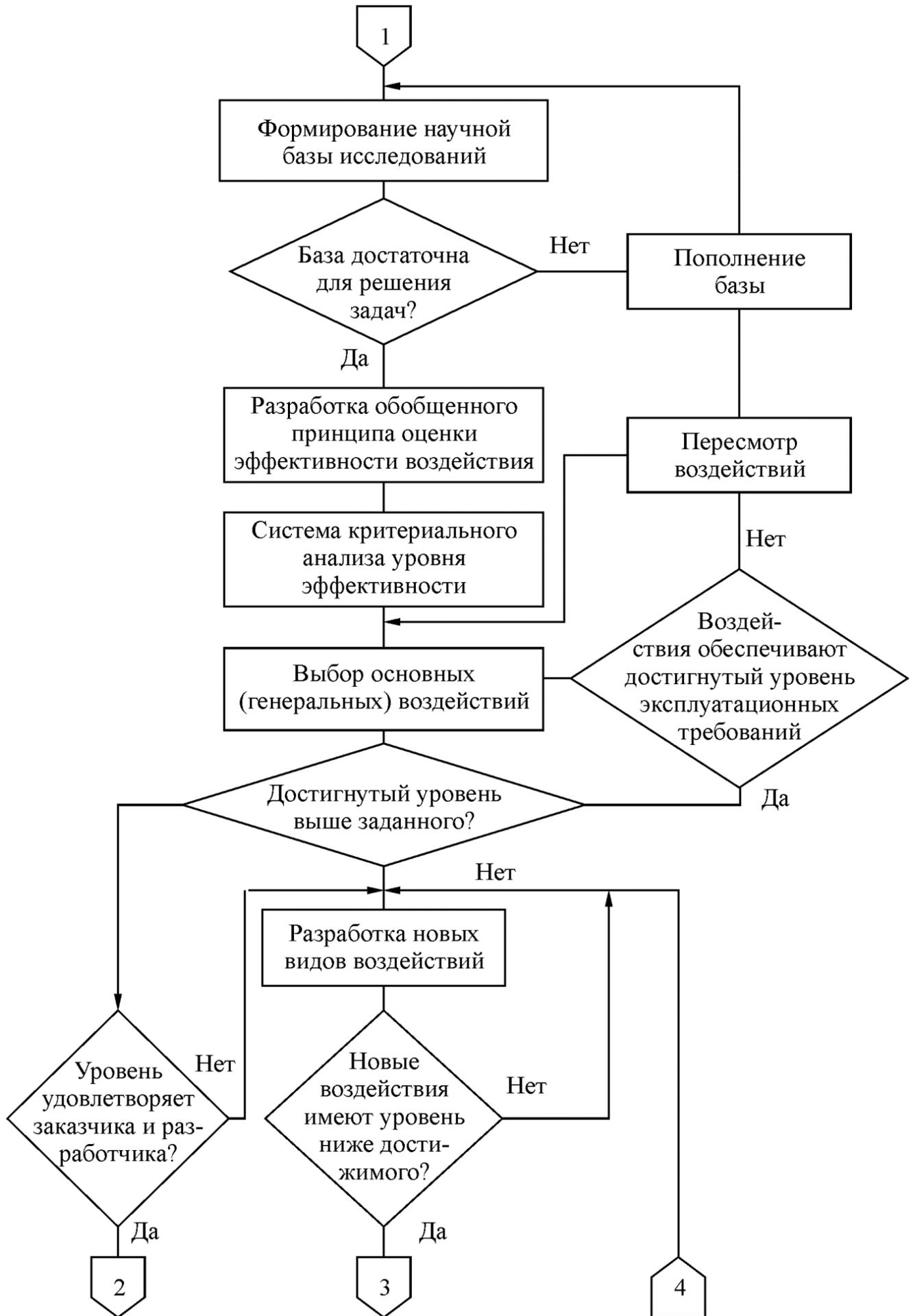
Требуется разработать систему, которая будет оценивать и контролировать методы воздействия на материалы. Такая система должна обеспечивать максимальное улучшение полезных характеристик изделий при минимальном негативном влиянии на их эксплуатационные свойства.

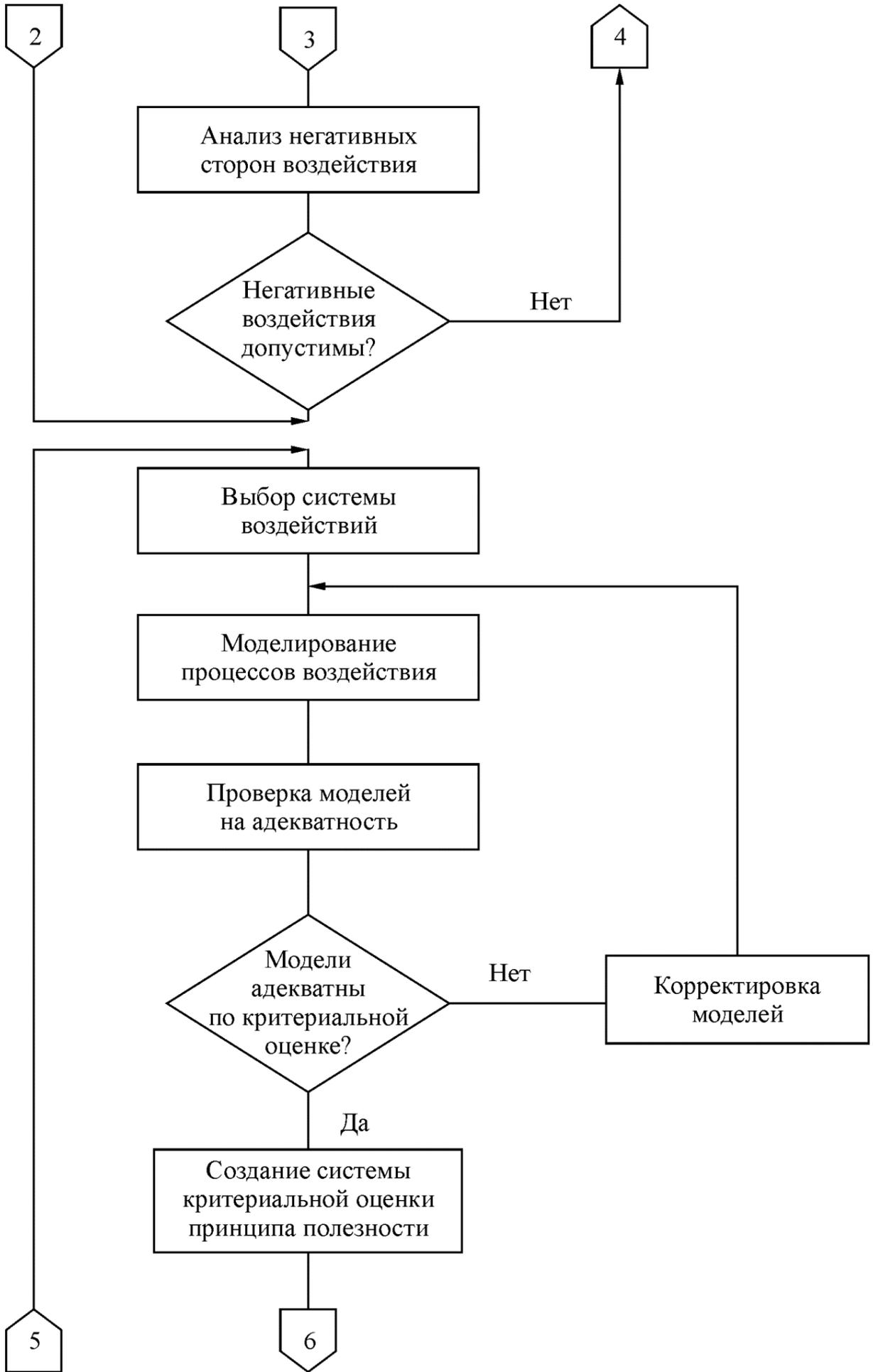
Внедрение подобной системы позволит избежать проведения дорогостоящих дополнительных исследований, результаты которых не всегда предсказуемы. Вместо этого можно будет оптимизировать уже проверенные технологические процессы и выбрать наиболее эффективные методы воздействия. Это существенно сократит время и затраты на внедрение необходимых технических решений при разработке изделий нового поколения.

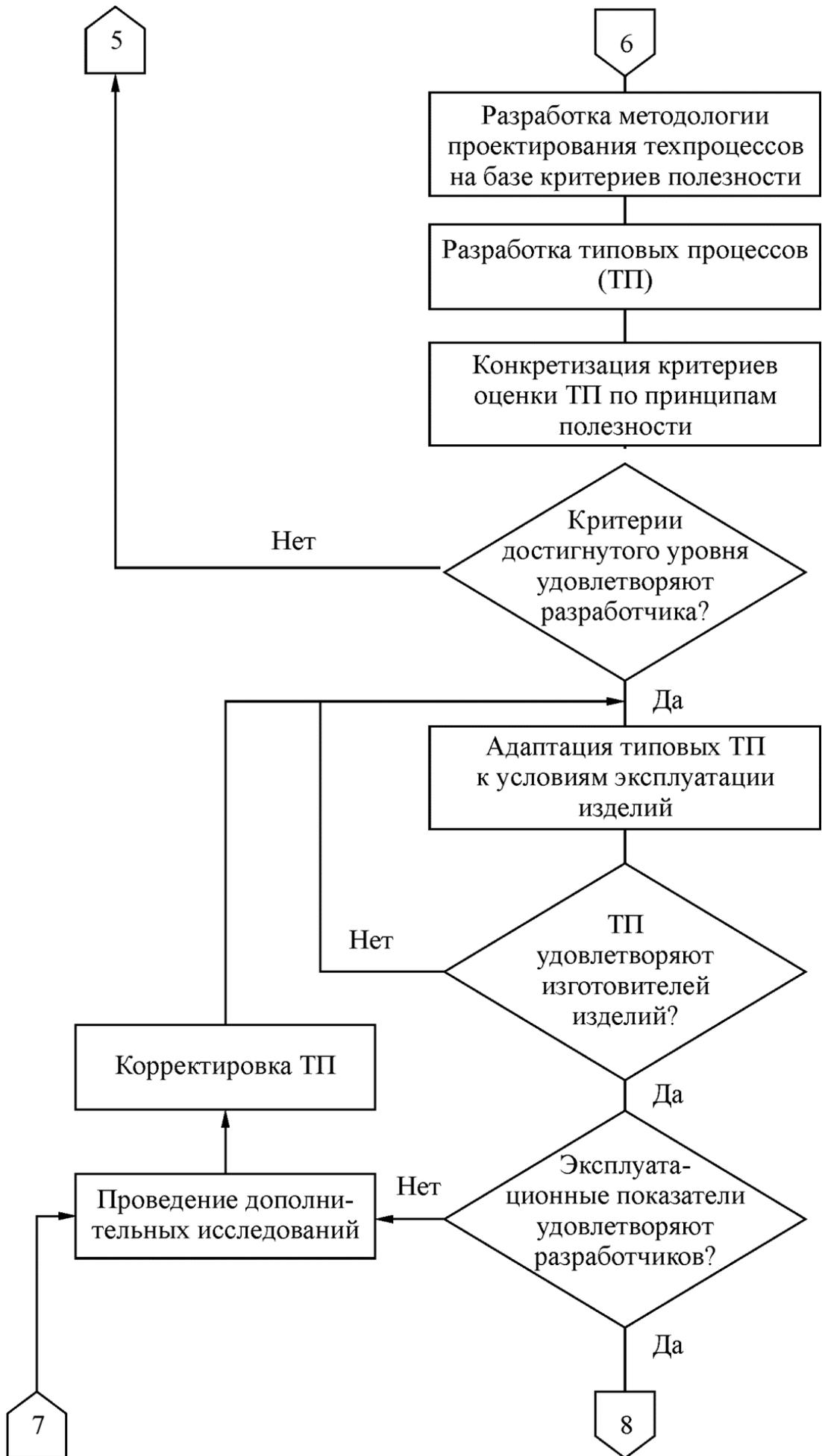
Кроме того, для достижения поставленной в работе цели требуется:

1. Создание технологических процессов комбинированной обработки, консолидирующих в себе несколько видов воздействий, для достижения заданных разработчиком и согласованных с изготовителем в процессе отработки технологичности требуемых эксплуатационных показателей изделий. Для этого на основе теории производственного конфликта необходимо провести комплексный анализ ожидаемых результатов и обоснованный выбор возможных видов воздействий из числа разрабатываемых способов, применяемых для повышения качества обработки комбинированными методами с использованием рабочих сред с различными физическими характеристиками;









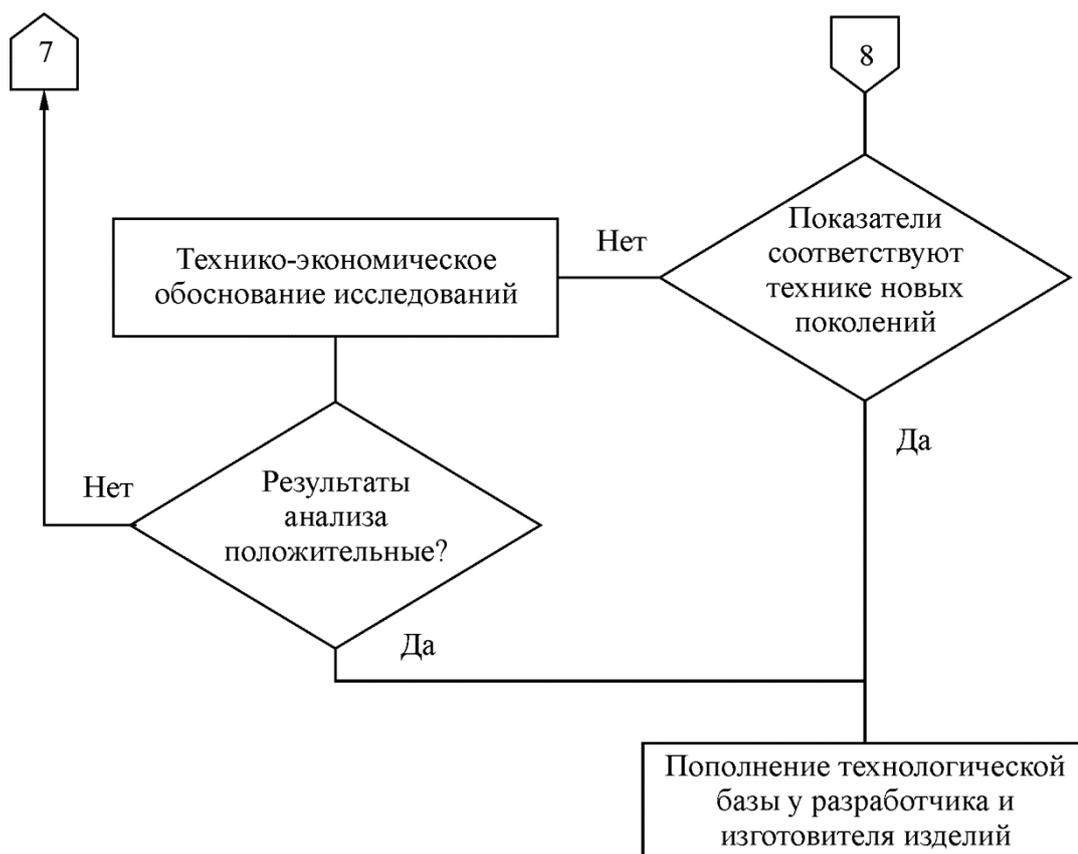


Рисунок 2.8 — Алгоритм последовательности выполнения и использования научных исследований по тематике диссертации

2. Раскрыть механизм и выполнить моделирование процессов, происходящих при выборе, создании и использовании имеющихся и создаваемых рабочих сред с различными физическими свойствами, что позволяет получить методологию проектирования технологических процессов, в том числе, комбинированных, где воздействия не всегда ранее оценивались количественно. Поэтому здесь наиболее приемлемой является количественная оценка с использованием булевых переменных. В результате удастся создать принципы построения типовых технологий, наиболее полно обеспечивающих достижение заданных эксплуатационных показателей при модернизации созданных и освоении перспективных технически сложных изделий;

3. Создать и реализовать на высокотехнологичных машиностроительных производствах систему стандартных технологических операций, обеспечивающих

совершенствование методов комплексной обработки и получение продукции с заданными эксплуатационными характеристиками.

Реализация путей, средств и методов достижения поставленной цели по алгоритму на рисунке 2.8 дает возможность повысить достоверность и обоснованность результатов, ускорить выполнение намеченных этапов исследований.

Выводы по главе

1. С учетом анализа информации по тематике работы были выдвинуты рабочие гипотезы, определяющие пути решения поставленных задач для достижения поставленной цели, которые являются основой для разработки методики решения поставленных задач.

2. Обоснована потребность в материальной базе для выполнения исследований и подтверждения правомерности теоретических исследований в том числе для выбора наиболее эффективных рабочих сред с учетом совершенствования имеющихся и создания новых комбинированных технологических процессов для машиностроения.

3. Приведен детально проработанный алгоритм, позволяющий создать базу для решения задач и достижения поставленной цели. В алгоритме учтены основные этапы проведения требуемых исследований, показаны пути разработки новых технологических процессов с оптимизацией использования рабочих сред с различными физическими возможностями.

Глава 3 Моделирование механизма оптимизации выбора технологических рабочих сред для комбинированных методов обработки

3.1 Деловой конфликт как метод выбора эффективности технологических рабочих сред и оптимизации структуры комбинированных методов обработки

Разработка сложных технологических процессов, где критически важен выбор рабочих сред, требует реализации масштабных исследовательских, проектных и внедренческих работ. Такая деятельность отличается значительными временными затратами на проведение исследований и предполагает существенные финансовые инвестиции. В то же время заказчики нацелены на максимальную оптимизацию временных и материальных ресурсов при создании или усовершенствовании комбинированных методов обработки (КМО), при этом, не снижая высоких требований к технологическому качеству. Однако разработчики сталкиваются с определенными ограничениями при выборе рабочих сред – они могут применять только те среды, чьи физико-химические и эксплуатационные характеристики изучены в достаточной степени. Именно в этой области часто возникают фундаментальные разногласия между запросами заказчика и возможностями проектировщика, что приводит к нарушению установленных сроков, увеличению стоимости проекта и проблемам с заключением контрактов. Подобные противоречия могут стать причиной конфликтных ситуаций и даже привести к разрыву деловых отношений между сторонами.

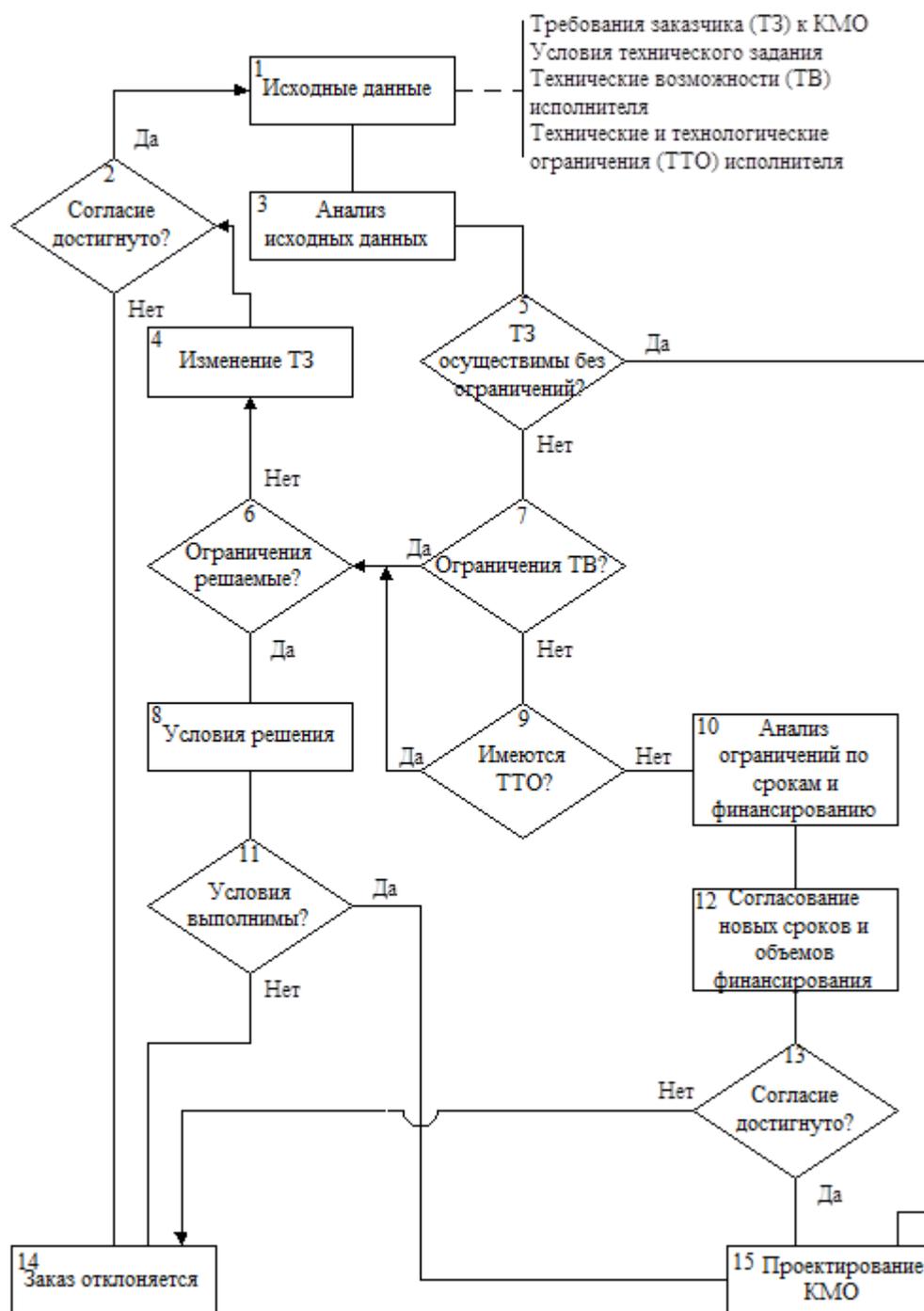


Рисунок 3.1 - Алгоритм проектирования процесса КМО со средами при различных сочетаниях технологических и физических факторов

Для построения процесса КМО требуется научнообоснованный алгоритм выполнения предпроектных работ, позволяющий изменять требования и возможности сторон в период до начала крупных финансовых вложений. На рисунке 3.1 показан предлагаемый автором обобщенный алгоритм проектирования КМО с наиболее эффективными технологическими рабочими средами.

Конфликтные ситуации для рассматриваемых ситуаций заложены в исходных данных, где исходят из того, что заказчик учитывают, в основном, свои интересы, включая потребительские, экономические стороны. Однако, в настоящее время многие из требований заказчика могут оказаться невыполнимыми технически или превышают возможности и потребности предприятия-заказчика. Проявляется конфликт между требованиями заказчика и объективно существующими ограничениями проектанта, что показано при рассмотрении на рисунке 3.1 переходов 5;6;7. В случае отсутствия взаимопонимания между участниками процесса возникает конфликтная ситуация (переходы 5; 9; 6), связанная с оценкой технологических возможностей и других характеристик разрабатываемого метода. Это приводит к нарушению доказательной базы при анализе производственной технологичности объекта исследований и может породить разногласия относительно сроков реализации проекта или объемов финансирования (переходы 10; 11). Важно отметить, что в представленном на рисунке 3.1 алгоритме не рассматриваются несоответствия между квалификацией исполнителей и сложностью решаемых задач, а также между имеющимся уровнем материально-технической базы и требованиями, необходимыми для выполнения заказа. Эти аспекты требуют дополнительного изучения при практическом применении предлагаемого алгоритма. Частично устранить указанные несоответствия можно путем привлечения специализированных организаций с более квалифицированным персоналом. Такой подход способен не только ускорить и удешевить процесс решения поставленных задач, но и обеспечить сохранение или даже повышение качества выпускаемой продукции.

Теория конфликта позволяет определить пределы, в которых возможно разрешение конфликтной ситуации. Для обоснования корректности выбранного подхода применяются методы векторного анализа и экспертные системы, которые помогают уточнить границы рассмотрения конфликта. При этом базовым принципом решения выступает предположение о том, что обе стороны максимально заинтересованы в достижении соглашения, что часто соответствует государственным интересам на момент анализа.

Создавая модель выхода из конфликтной ситуации при разработке комбинированных методов обработки (КМО), мы исходим из того, что, несмотря на изначальные разногласия между участниками, все заинтересованы в получении согласованного и объективно обоснованного решения. В контексте авиакосмического машиностроения моделирование строится на поиске точек соприкосновения между позициями сторон через последовательную оптимизацию проектных решений исполнителей и корректировку требований заказчика в соответствии с преобразованиями, представленными в алгоритме на рисунке 3.1.

3.2 Моделирование производственной ситуации для обоснования выбора параметров комбинированной обработки с использованием эффективных рабочих сред

Как показано в разделе 3.1 целью доказательного разрешения разногласий с использованием механизма управления ситуацией через теоретические положения конфликта служит получение оптимального конечного варианта объекта исследований с учетом ряда исходных положений, включающих не только общие производственные ограничения, которые могут быть приняты при отработке технологичности использования новых рабочих сред, но и с учетом индивидуальных требований (например по импортозамещению), которые не могут прогнозироваться на перспективу. Тогда применительно к КМО начальные условия для рассмотрения конфликтной ситуации включают научно обоснованную и практически доказанную возможность использования в рассматриваемом процессе уже известных технологических рабочих сред с достоверными физическими воздействиями и свойствами. Они служат нижней границей для области изучения зоны конфликта системы S и базой для сравнения при отработке технологичности результатов N последовательных переходов по их сближению через оценку целевой функции W с граничными условиями, учитывающими в технологических рабочих средах возможности структурных физических воздействий или их сочетаний при проектировании КМО. Синтез начальных

условий в форме генеральных требований к требуемому технологическому процессу (технологические, экономические, временные, иногда экологические и др.), которые закладывает заказчик, опираясь на теоретические обоснования предлагаемого процесса в сравнении с имеющимся опытом использования аналогичного процесса.

Согласно исследованиям [97; 126], главным источником делового конфликта выступают требования заказчика, которые формируют входную составляющую конфликтной системы S , состоящей из N структурных элементов. Целевая функция W определяет граничные условия, учитывающие возможности структурных физических воздействий комбинированного метода обработки (КМО) через входные требования X и допустимые решения Y со стороны исполнителя-разработчика. При этом параметр X обычно представляет собой характеристики базового варианта КМО, а Y выступает в качестве выходного показателя на этапах согласования позиций или после достижения договоренности между сторонами.

В выражении (3.1) система может быть представлена декартовым произведением (\otimes):

$$S \subset X \otimes Y, \quad (3.1)$$

Если учитывать необходимость выполнения нескольких значимых входных требований к технологическим средам с характеристиками их составляющих X_i (i – количество требований ($i = \overline{1, N}$)), то:

$$\begin{aligned} X &\subset \sum_1^N X_i; \quad X_i = X_{i1} \times X_{i2} \times \dots \times X_{i\overline{m_i}} \\ Y &\subset \sum_1^M Y_j; \quad Y_j = Y_{j1} \times Y_{j2} \times \dots \times Y_{j\overline{m_j}}, \end{aligned} \quad (3.2)$$

где j - количество решений, удовлетворяющих требования заказчика ($j = \overline{1, M}$), количество реализаций входных требований $K = \overline{1, n_i}$.

Число возможных реализаций вариантов (r) системы у исполнителя составит:

$$r = \overline{1, m_j}. \quad (3.3)$$

Для получения целевой функции W требуется учесть синтез отдельных целей W_i , отражающих мнение обеих сторон и учитывающих изменения граничных условий как в сторону их повышения, так и снижения (вплоть до удаления), где $i = \overline{1, N}$ представляет согласованные граничные условия.

Исходные параметры X , X_i устанавливаются на базе первоначальных требований к использованию рабочих сред. Их реализация служит базой для проектирования результативных комбинированных технологических процессов с применением исследуемых сред. В соответствии с источником [97], данные параметры могут быть выражены через функции полезности $q(x)$, которые определяют переход системы к оптимизированному варианту (q_i). Этот переход осуществляется посредством применения как существующих, так и новых технологических рабочих сред, характеризующихся различными физическими воздействиями и установленным агрегатным состоянием.

Предварительная оценка осуществимости такого перехода возможна благодаря анализу показателей производственной технологичности.

$$q(x) = q(x, R(c, x)), \quad (3.4)$$

$$q_i(x_i) = q_i(x_i, R_i(c_i, x_i)), \quad (3.5)$$

где R – реакция системы;

R_i – вариант реакции, $R = \{R_i\}$;

c – текущее или конечное состояние системы;

c_i – варианты состояния системы, $c = \{c_i\}$.

В процессе оптимизации решений при исследовании конфликтной ситуации необходимо обеспечить максимально быстрое сужение области конфликта. Этого можно достичь при условии, что каждый следующий вариант корректировки системы (x_{i+1}) демонстрирует улучшение (\succ) по сравнению с базовым или предыдущим вариантом, что способствует более быстрому достижению договоренности между участниками конфликта. Тогда:

$$x_{i+1} \succ x_i \quad \text{при} \quad x_i \cdot x_{i+1} \subset x \quad (3.6)$$

$$q(x_{i+1}) \succ q(x_i) . \quad (3.7)$$

Механизм взаимодействия R обеспечивает связь между входными и выходными характеристиками систем S и C . В процессе анализа конфликтной ситуации необходимо принимать во внимание наличие обратных связей, так как определенная доля выходных данных подсистемы S_i направляется на входные элементы подсистемы S_j .

$$S_i, R_i : (c_i x_i) \rightarrow y_j (x_i y_j) \subset S_j. \quad (3.8)$$

На следующем этапе управленческого процесса, в рамках моделирования процедуры согласования, требуется определить такие альтернативные варианты S_i и S_j , которые максимально учитывают интересы обеих сторон – как заказчика, так и исполнителя. После этого необходимо провести попытку достижения либо полного, либо частично приемлемого взаимопонимания между участниками процесса.

$$S_i \cdot S_j \subset S. \quad (3.9)$$

Матрицей связи S_i с S_j является H_0 , в которой равенство $H_i=1$ возможно при конфликтной ситуации, в случае согласования векторов x_i и y_j ; а при их рассогласовании $H_i=0$.

Следовательно,

$$x_{ik} = y_{jr} \Big|_{=1} \quad (3.10)$$

$$x_{ik} \neq y_{jr} \Big|_{=0}, \quad (3.11)$$

В (3.10; 3.11) $k, r = \overline{1, L}$, где L – размерность матрицы H_0 .

В случае совпадения векторов x_i и y_j элемент матрицы $H_0=1$.

Тогда,

$$x_i = H_0 \cdot y_j. \quad (3.12)$$

При количестве подсистем N, M матрицей выбранной части системы является H_s :

$$H_s = (H_0)N, M, \quad (3.13)$$

где $i = \overline{1, N}, j = \overline{1, M}$.

При анализе конфликтной ситуации в системе S , возникающей в ходе проектирования или выбора КМО с регулируемыми типами и физическими характеристиками рабочих сред, необходимо принимать во внимание динамическое воздействие внешних факторов. Эти факторы включают требования заказчика и ресурсные возможности исполнителя, что приводит к модификации входных параметров системы S . Данное влияние, в свою очередь, отражается на механизмах обратной связи через выходные показатели y_j . В данном контексте внешнее воздействие описывается системой S_0 :

$$S_0 \subset x_0 \otimes y_0.$$

Функция q_0 на этапах приближения согласования по (3.14) способна через реакцию R_0 обеспечить достижение цели W_0 :

$$q_0(x_0, R_0(c_0, x_0)). \quad (3.14)$$

Для изучаемой внешней среды функция связи может быть представлена матрицей H :

$$\begin{aligned} X &= H_{0S}; \\ X_{0S} &= H_{S0} \cdot Y, \end{aligned} \quad (3.15)$$

где $H_{0S} = (H_{01}, H_{02} \dots H_{0N})$;

$$H_{S0} = (H_{10}, H_{20} \dots H_{N0});$$

$$X_0 = (X_{0S}, X_{S0}).$$

Входы X_{0S} для параметров внешней среды S_0 не зависят от связей s . Тогда основное (генеральное) воздействие $T_{ij} = H_0 \cdot R_i$ и количество вариантов решений для выполнения требований заказчика составляет X_i :

$$y_j = T_{ij}(c_i, X_i), \quad (3.16)$$

где $c_i \in C_i$, $x_i \in X_i$, $y_j \in Y_j$, $i, j = \overline{0, N}$.

Если в процессе согласования удастся найти вариант полного или частичного решения спорных требований к созданию или выбору рабочих сред, их физических параметров или эффективности их использования в КМО, то вектор входа системы принимает значения X_j^i [126]. Тогда динамика изменения зоны конфликта между заказчиком и исполнителем представляет матрицу (3.17):

$$\begin{aligned} & \left\| \begin{array}{cccc} X_0^0 & X_1^0 & X_2^0 & \dots & X_N^0 \\ X_0^1 & X_1^1 & X_2^1 & \dots & X_N^1 \\ & & \vdots & & \\ X_0^N & X_1^N & X_2^N & \dots & X_N^N \end{array} \right\| = \\ & = \left\| \begin{array}{cccc} T_{00}(c_0, X_0) & T_{01}(c_0, X_0) & \dots & T_{0N}(c_0, X_0) \\ T_{10}(c_1, X_1) & T_{11}(c_1, X_1) & \dots & T_{1N}(c_1, X_1) \\ & & \vdots & \\ T_{N0}(c_N, X_N) & T_{N1}(c_N, X_N) & \dots & T_{NN}(c_N, X_N) \end{array} \right\| \end{aligned} \quad (3.17)$$

В матрице (3.17) левая часть раскрывает входные требования к системе, T-вариант пути решения задачи на базе моделирования рассмотренных конфликтных ситуаций, а знак равенства показывает согласование решения обеими сторонами.

Для конкретных случаев выбора технологических рабочих сред обычно применяют упрощенный метод с дискретной оценкой элементов матрицы в зависимости от их величины, получаемые в процессе построения уравнений регрессии с численными коэффициентами, определяемыми экспериментальным методом для узкого диапазона изменения режимов КМО. В случае расширения области использования количественных значений известных технологических параметров потребуются дополнительные индивидуальные расчеты по представленной на рисунке 3.2 схеме и экспериментальные подтверждения результатов [126].

В промышленности при оптимизации вариантных решений задач по частным критериям последовательность принятия ускоренного решения может включать:

1. Процесс включает в себя анализ и сортировку отдельных оценок с помощью алгоритмов искусственного интеллекта, при этом происходит исключение нереалистичных на данный момент вариантов решений. Процедура состоит из нескольких последовательных шагов: сначала профессиональные эксперты в соответствующей области конфликта проводят первичную оценку, затем руководитель принимает окончательное решение, опираясь на количественные показатели технологичности. Для этого каждому предложенному решению присваивается индекс (K) по шкале натуральных чисел от 1 до \bar{S} где \bar{S} обозначает максимальную значимость. Варианты с индексом K, превышающим

значение S , исключаются из дальнейшего рассмотрения и не участвуют в итоговой оценке.

2. При проведении многократного опроса руководителей подразделений анализируется уровень согласованности их мнений по оценочным показателям. Если суммарные значения оценок, полученные в начальном опросе, отличаются от результатов последующих измерений, это указывает на необходимость дополнительной корректировки предложенного решения:

$$\sum_{i=1}^{\bar{s}} K_1 > \sum_{i=1}^{\bar{s}} K_2 .$$

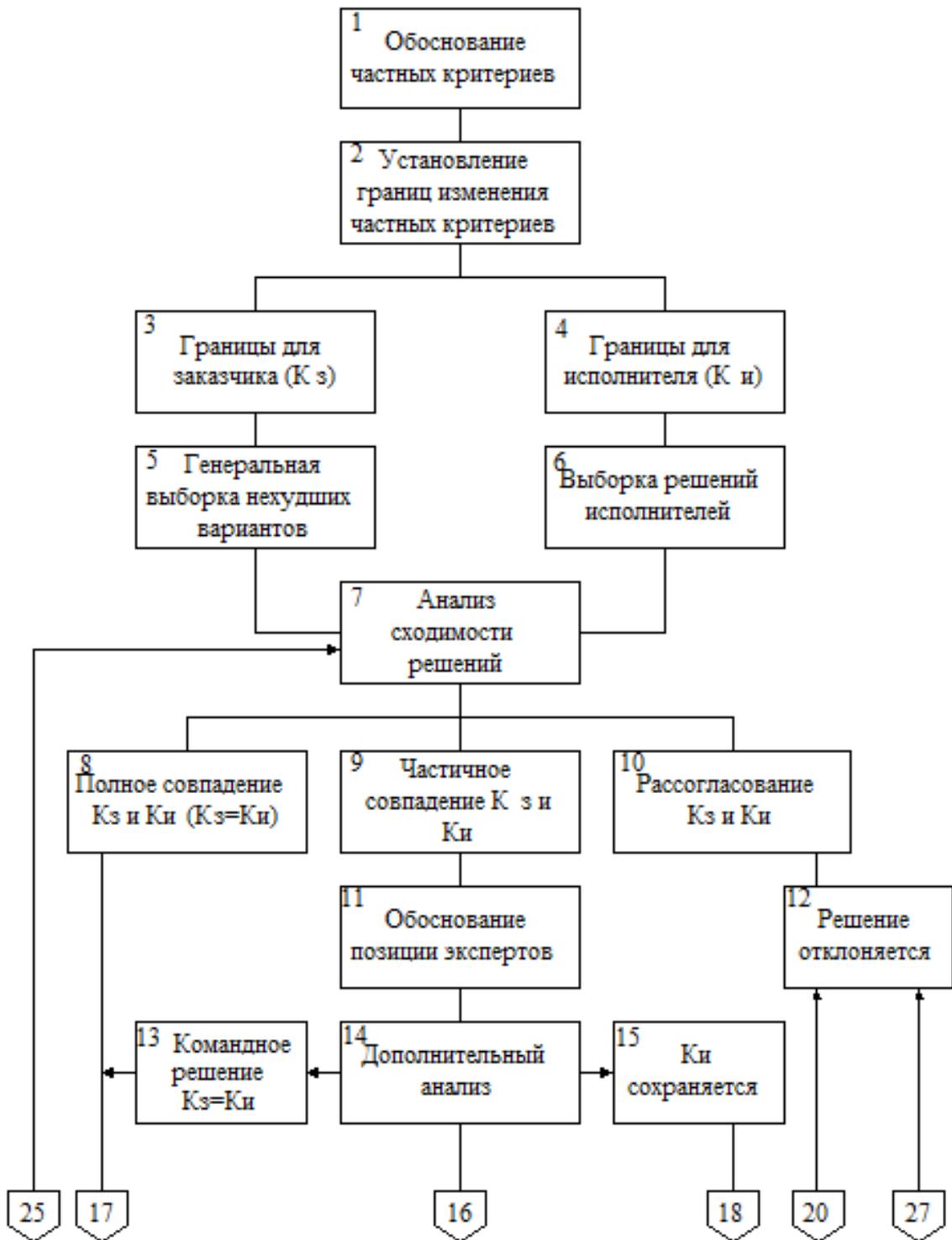
Для получения оптимального результата следует использовать критерий (3.18) окончательной оценки описанного в источнике [126]:

$$\sum_{i=1}^{\bar{s}} K_n < \sum_{i=1}^{\bar{s}} K_{n+1} . \quad (3.18)$$

Данный метод сравнения необходимо использовать на всех этапах определения и обоснования граничных условий согласно схеме, представленной на рисунке 3.2.

3. После завершения последнего опроса в специальную матрицу базы знаний вносятся значения частных критериев для всех рассматриваемых вариантов решений, как указано в источнике [97].

Согласно модели, представленной на рисунке 3.2, ключевыми участниками с решающим голосом являются представители противоборствующих сторон. Они наделены особыми полномочиями: могут самостоятельно определять диапазон допустимых изменений при согласовании рабочих сред для КМО и имеют право в административном порядке утверждать или отклонять любые предложения, невзирая на экспертное мнение. Важно отметить, что при использовании такого подхода к урегулированию конфликтов эти представители несут полную ответственность за итоговый результат, включая результаты, полученные при применении схемы поиска, описанной на рисунке 3.2.



3.3 Выбор и назначение технологических показателей и рабочих сред для комбинированных методов, обеспечивающих требуемое качество наукоемких изделий [126, 142]

В рассматриваемом случае процесс рассмотрен на примере выполнения прошивки отверстий малого сечения комбинированным эрозионно-химическим способом в жидкой рабочей среде на базе 6% раствора нитрата натрия. Здесь имеет место тепловое (физическое), химическое и механическое участие от силового действия потока в зоне обработки. Кроме того рассмотрены рабочие среды в виде деионизированной воды, прокачиваемой через инструмент под давлением не ниже 2 МПа, где качественно сохраняются характеристики предшествующей среды, а также изучены процессы, осуществляемые в вязких углеводородных средах различной густоты при использовании режимов прямой и обратной полярности с импульсами различной длительности, участвующих в комбинированных воздействиях, количественные показатели анализа и результирующие оценки технологичности выбора применяемых в средах физических воздействий, вытекающих из их свойств. Для обобщенной оценки уровня технологичности всех сред применяется производительность (для схемы прошивки соответствует продольной подаче), которая снижается по мере углубления отверстия до предельной ($L_{пр}$) величины, при которой имеет место сьем материала с детали (границей является глубина, при которой скорость подачи электрода-инструмента относительно установившегося значения превышает 5%). Результаты выполнения операции приведены на рисунке 3.3.

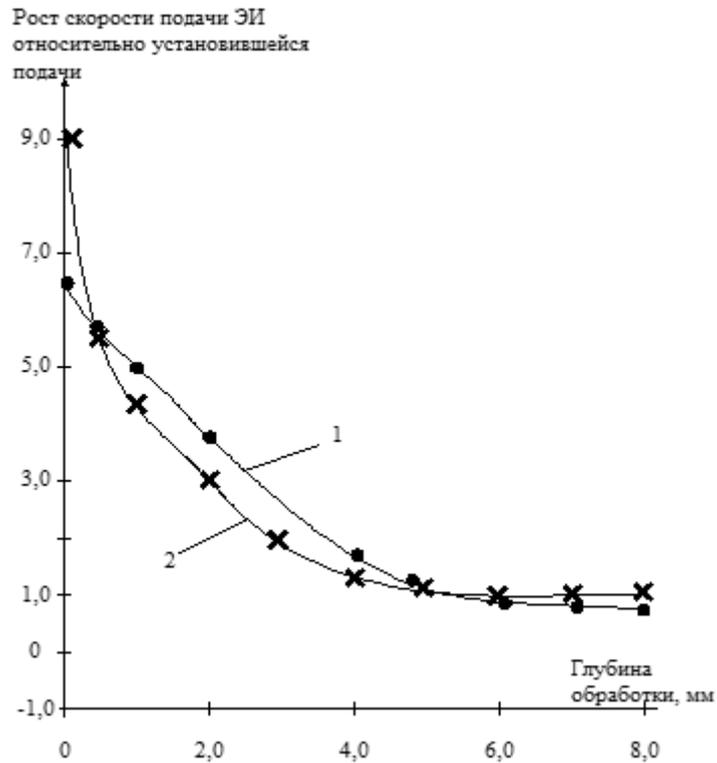


Рисунок 3.3 — Изменение скорости подачи электрода-инструмента при комбинированной электроэрозионно-химической обработке по глубине отверстия: 1 – нержавеющий сплав на базе железа, никеля, хрома, титана; 2 – конструкционная сталь типа Ст45.

По схеме на рисунке 3.3 граничное значение $L_{пр}$ можно установить, как функцию (ψ) от параметров процесса:

$$L_{пр} = \psi (P_{уд}, P_n, P_ж, S, L_c, F_{тр}), \quad (3.19)$$

где $P_{уд}$ – удельная сила, воздействующая на окружающую среду в зоне разряда;

P_n – давление внутри газового пузыря в конце его расширения;

$P_ж$ – давление на входе в межэлектродный зазор рабочей среды;

S – межэлектродный зазор;

L_c – длина участка по направлению движения рабочей среды в электролизере с заданными свойствами;

$F_{тр}$ – коэффициент трения пузырьков со стенками электродов.

Следует отметить, что максимальная глубина обработки определяется множеством параметров: типом и комбинацией воздействий при комбинированном прошивании, размером обрабатываемой области, вязкостью и электропроводностью рабочей среды, её стабильностью и прочими характеристиками.

Согласно расчётам, проведённым в источнике [97] на основе физических моделей для базовой рабочей среды, предельная глубина обработки $L_{пр}$ для нержавеющей стали при электроэрозионно-химической обработке на рекомендуемых технологических режимах составляет 3,5–4 мм. Эти данные подтверждены экспериментально как российскими, так и зарубежными исследователями, которые получили результаты в диапазоне 3–5 мм (см. рисунок 3.3). При этом погрешность измерений не превышает 10%.

Анализ рисунка 3.3 показывает, что для расчёта производительности по глубине обработки можно применять уравнение Клеро в параболической форме (как указано в [97]).

На основании представленных на рисунке 3.3 зависимостей, в диапазоне глубин от 0,5 до 3 мм изменение скорости прошивки различных типов углублений и отверстий можно считать линейным. В этом случае для расчёта соответствующих показателей допустимо использовать ранее полученные установившиеся значения (например, из источников [126; 142]) для аналогичных материалов.

Основным фактором, ограничивающим эффективность обработки в данной рабочей среде, является совокупная погрешность процесса комбинированной эрозионно-химической обработки (δ). Эта погрешность формируется из нескольких составляющих: бокового зазора (δ_1), который возникает вследствие эрозионных процессов, бокового анодного растворения обрабатываемого материала (δ_2), а также различных внешних воздействий, влияющих на точность работы технологических систем (δ_3). Общая величина погрешности может быть рассчитана согласно формуле, представленной в зависимости (3.20):

$$\delta = \delta_1 + \delta_2 + \delta_3, \quad (3.20)$$

При обработке сложнопрофильных каналов необходимо обеспечить точность размеров сечений в пределах 10% согласно технической документации. При этом следует учитывать два важных фактора: неравномерный износ электрода-инструмента (δ_1') из-за эрозионной составляющей процесса и возможное расширение прошитого отверстия (δ_1'') со стороны входа инструмента за счет анодного растворения. Важно отметить, что анодная составляющая комбинированного процесса практически не влияет на износ инструмента. Однако за счет дополнительных воздействий химического растворения общее время обработки, особенно на начальном этапе, может существенно сократиться. В результате при комбинированном процессе образуется меньший зазор по сравнению с другими методами. Боковое удаление материала инструмента происходит преимущественно за счет электроэрозионного разрушения. В процессе комбинированной прошивки на электроде формируется боковой конус с углом α , который составляет 0,3-0,5 градусов. При этом с увеличением глубины обработки величина конусности уменьшается. Математически неравномерный износ электрода-инструмента можно выразить формулой: $\delta_1' = \alpha \cdot L$, где L — глубина обработки; α — угол уклона боковой поверхности отверстия.

При интенсивной комбинированной обработке боковое расширение отверстия происходит в основном за счет анодного растворения, поэтому в расчетах можно принять: $\delta_1 = \delta_1'$.

$$\delta_2 = \sqrt{2\eta \frac{\alpha\chi}{\gamma} (U - \Delta U) \frac{L}{V_{\text{срк}}} + S_{\text{бок}}^2} - S_{\text{бок}}, \quad (3.21)$$

где η - выход по току;

α - электрохимический эквивалент обрабатываемого материала;

γ - плотность материала;

χ - электропроводность электролита.

В процессе комбинированной прошивки основным рабочим раствором служат составы с пониженной концентрацией нитрата натрия (NaNO_3). Такое решение подробно обосновано в разделе 3.3 на основе теории делового конфликта. При этом важно учитывать следующие параметры процесса: рабочее напряжение между электродами (U), которое составляет 20-25 вольт; потери напряжения (ΔU); начальный боковой зазор ($S_{\text{бок}}$) на границе конца инструмента.

Ключевым показателем качества комбинированной прошивки, который принимается во внимание при оценке технологичности процесса, является средняя скорость комбинированной обработки ($V_{\text{срк}}$). Именно этот параметр позволяет объективно оценить эффективность применяемого метода.

$$V_{\text{срк}} = \left[\frac{(V_0 + V_{\text{уст}})}{2} L_{\text{пр}} + V_{\text{уст}}(L - l_{\text{пр}}) \right] \frac{1}{L} = \frac{L_{\text{пр}}}{2L} (V_{\text{ко}} - V_{\text{уст}}), \quad (3.22)$$

где $V_{\text{ко}}$ - скорость подачи в начале обработки;

$V_{\text{уст}}$ - скорость подачи на установившемся режиме после углубления электродом на величину менее $L_{\text{пр}}$;

δ_3 - определяется стабильностью процесса, жесткостью технологической системы, точностью изготовления ее элементов и во многом зависит от совершенства и состояния оборудования.

Чтобы обеспечить необходимую шероховатость поверхности и достичь требуемого качества изделия, необходимо правильно подобрать скорость подачи инструмента (V_k) в процессе комбинированной обработки. Для этого сначала производится расчет скорости анодного растворения на завершающей стадии обработки по формуле (3.23). В случае существенного расхождения полученных значений с результатами, рассчитанными по формуле (3.22), требуется провести корректировку итогового показателя скорости подачи инструмента. Такой подход позволяет достичь оптимального баланса между скоростью обработки и качеством получаемой поверхности.

$$V_k = \frac{\eta\alpha\chi(U-\Delta U)}{\gamma S_T}, \quad (3.23)$$

где S_T - торцевой зазор.

В начальной стадии обработки величина подачи (S_T) составляет 0,05-0,1 мм. По мере углубления в установившемся режиме этот показатель увеличивается до 0,25-0,3 мм. Такое изменение связано с двумя факторами: ухудшением очистки межэлектродного зазора из-за механического воздействия жидкой струи; наличием большого количества токопроводящих продуктов электроэрозионной обработки, которые увеличивают рабочий зазор. При достижении глубины обработки больше $L_{пр}$ нет необходимости рассчитывать среднюю скорость процесса. Достаточно определить подачу инструмента в установившемся режиме.

Важным параметром качества изделия при комбинированной прошивке отверстий является шероховатость поверхности (R_{zk}). При её оценке учитывают выравнивание выступов между лунками, которые формируются в момент импульса под действием теплового воздействия и за счет локального химического анодного растворения.

Такой комплексный подход к оценке шероховатости позволяет получить более точную картину качества обработанной поверхности.

$$R_{zk} = R_z - \left(\sqrt{2\eta \frac{\alpha}{\gamma} \chi(U - \Delta U) \frac{R_{zk}}{V_k} + S_0^2} - S_0 \right), \quad (3.24)$$

где R_z - высота неровностей под воздействием импульсов теплового электроэрозионного воздействия.

$$R_z = K_H \cdot A_u^P. \quad (3.25)$$

В (3.25) K_H – экспериментальный коэффициент комбинированной обработки (для базовой рабочей среды $K_H=10...20$) A_u - энергия импульса; P - показатель степени (для комбинированного процесса $P \approx 1/3$); S_0 - начальный зазор, определяется экспериментально для каждого вида рабочей среды по нижнему

значению пробойного напряжения. При комбинированном процессе прошивки в базовой рабочей среде $S_0=0,05...0,1$ мм [126].

После применения комбинированной обработки наблюдается некоторое уменьшение шероховатости поверхности в сравнении с чисто электроэрозионной обработкой. Это объясняется особенностями формирования неровностей под воздействием импульсного тока и образованием модифицированного поверхностного слоя (Т). Механизм возникновения этих характеристик имеет схожий характер в обоих случаях. Именно поэтому для достижения минимально возможной шероховатости при проведении комбинированного процесса с использованием базового состава рабочей среды необходимо правильно подбирать скорость подачи инструмента (V_k).

Такой подход позволяет контролировать качество обработки и получать поверхности с оптимальными характеристиками шероховатости, учитывая особенности обоих методов обработки.

Для оценки глубины Т достаточно принять во внимание коэффициенты из [126], учитывающие глубину лунки (K_H) и толщину измененного слоя (K_T) после воздействия импульсов тока:

$$T_k = \frac{K_T}{K_H} R_{zk}. \quad (3.26)$$

По известной высоте неровностей можно найти ожидаемое изменение усталостной прочности материала (σ_{-1}), обработанного комбинированным методом в любой рабочей среде:

$$\sigma_{-1} = A \cdot R_a^\alpha. \quad (3.27)$$

Для теплового импульсного воздействия коэффициенты А, α близки к указанным в [126], поэтому усталостную прочность можно оценивать по величине

шероховатости, полученной при КМО в изучаемом составе рабочей среды, которая после комбинированного процесса должна отвечать заданным ограничениям.

Приведенные в [119] результаты усталостных испытаний материалов, широко используемых в авиакосмической отрасли и в других областях машиностроения, обработанных КМО в базовом и в других составах рабочих сред с различными свойствами, не показали существенного снижения этого показателя после комбинированной обработки, что позволило при анализе сравнительных испытаний исключить дополнительные дорогостоящие и длительные усталостные испытания для обоснования выбора или при проектировании новых рабочих сред.

Расход энергии, приведенный в таблице 1.3, также влияет на оценку уровня технологичности процесса, эффективности проектируемого варианта выполнения операции. Он находится через коэффициент полезного использования электрической энергии (η_k) при комбинации электроэрозионного (ЭЭО), химического (ЭХО) комбинированного (к) воздействия по зависимости (3.28):

$$\eta_k = \frac{\eta_{\text{ЭЭО}} \gamma K A_{\text{и}} f + \eta_{\text{ЭХО}} \alpha \eta_k I_k}{K \gamma A_{\text{и}} f + \eta_{\text{ЭХО}} \alpha \eta_k I_k}, \quad (3.28)$$

где K – экспериментальный коэффициент, зависит от состава, физических свойств, агрегатного состояния рабочей среды, материалов электродов, характеристик импульсов;

f - частота следования импульсов в режимах комбинированной обработки; от силы тока I_k .

Анализ зависимости (3.28) дает основания утверждать, что при комбинированном процессе доля полезного использования энергии значительно превышает возможности электроэрозионной и близка к электрохимической обработке, что подтверждается данными таблицы 1.3.

Проведенный анализ для подтверждения правомерности моделирования на базе теоретических положений делового конфликта доказывает, что предложенное выделение расчетных параметров для всех видов комбинированной обработки с указанными рабочими средам достаточно полно совместимо для предлагаемых к

рассмотрению вариантов обработки и пригодно для сравнения и оценка технологичности выполнения операций. Если применить для рассматриваемого случая количественные оценки, принятые в [97], где базовому варианту присваивался уровень «10», то для изучаемых в разделе 3.4 технологических рабочих сред были получены величины:

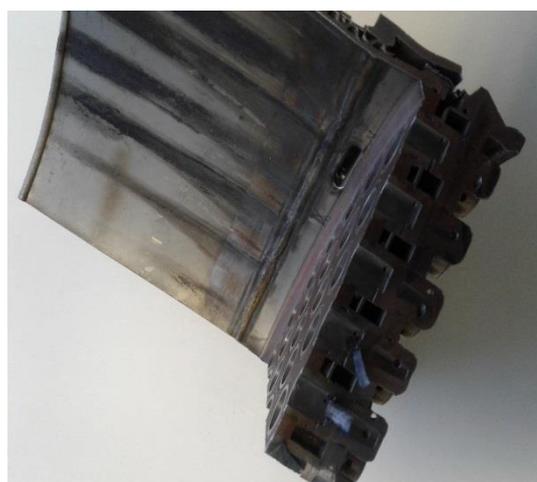
- для рабочих сред на базе деионизированной воды, где основное удаление припуска происходит за счет теплового физического воздействия электрических импульсов и механическим действием потока под повышенным давлением для обеспечения массовыноса, ввиду значительного снижения количества продуктов обработки и эффективности химического процесса уровень снижается до 6-7 и такой вариант назначения рабочей среды приемлем только для мелких по глубине отверстий, где он часто не выдерживает конкуренции с лучевыми методами прошивки (электронным, лазерным), хотя может расширить уровень технологичности за счет получения каналов некруглого сечения и переменного по глубине профиля;

- при использовании машинных масел, имеющих незначительную вязкость и большое удельное сопротивление, процесс комбинируется из теплового и механического воздействия (химический фактор практически утрачивается) а уровень оценки снижается до 4;5. Такой вариант прошивки используется в основном при изготовлении фасонных углублений и каналов. Для обобщенной оценки уровня технологичности всех сред применяется производительность (для схемы прошивки соответствует продольной подаче);

-применение вязких рабочих сред (например, углеводов) для прошивки отверстий и каналов малых сечений оказалось неэффективным как при прямой, так и обратной полярности, из-за отсутствия химического воздействия и низкой производительности, а при более производительной обработке на обратной полярности не обеспечивалось получение требуемого качества поверхностного слоя (граничное условие модели.) и нарушались прочностные характеристики.



а)



б)



в)



г)

Рисунок 3.4. — Элементы проточной части и форсунки жидкостных двигателей: а) часть огневого диска с форсунками; б) форсунки с тангенциальными каналами в сборке; в) разрез по каналам и струйному осевому отверстию для подачи топлива; г) тангенциальные каналы в форсунке

На рисунке 3.4 приведены форсунки, прошивка отверстий в которых выполнялась комбинированными методами в различных рабочих средах допустимых по обоснованию, приведенному в разделах 3.2; 3.3 работы.

Для форсунок, установленных в едином блоке (а; б на рисунке 3.4) проточная часть имеет одинаковую форму и размеры с диаметром каналов в пределах миллиметра. На рисунке 3.4 в, г показана проточная часть, где аналогичные каналы имели различные углы относительно детали, но постоянный (в пределах допуска) диаметр каналов. При экспериментах комбинированная обработка выполнялась в

базовой рабочей среде, состав которой рассчитан по алгоритму на рисунке 3.1 и подтвержден при испытаниях КМО в других рабочих средах.

В исследовании [150] был проведен комплексный анализ различных методов комбинированной обработки, включая воздействие на электрохимический процесс ультразвуковыми и низкочастотными колебаниями, а также лазерным излучением. Полученные данные подтвердили научную обоснованность применения комбинированных технологий обработки. Результаты экспериментов показали определенную закономерность. Для отверстий глубиной до 5 мм оптимальным является электроэрозионно-химический метод обработки. При необходимости создания более глубоких отверстий рекомендуется использовать электрохимическую обработку с применением колебаний. Выбор типа колебаний зависит от масштаба обрабатываемой области: для малых участков и небольших объемов эффективнее применять ультразвуковые колебания, при работе с крупными полостями и отверстиями целесообразнее использовать низкочастотные вибрации, несмотря на их меньшую эффективность. Их преимущество заключается в более простой реализации и лучших энергетических показателях оборудования.

Что касается лучевых методов (в частности, лазерного воздействия) в жидких рабочих средах, их применение ограничено по нескольким причинам:

- загрязнение межэлектродного зазора продуктами обработки снижает прозрачность жидкости;
- рабочая среда может использоваться преимущественно однократно;
- существует проблема точного подвода луча в зону обработки.

Тем не менее, лазерные комбинированные процессы находят применение при формообразовании мелких отверстий и небольших полостей. Однако для обеспечения стабильного качества таких деталей при серийном производстве требуются дополнительные исследования, включая моделирование по алгоритму, представленному на рисунке 3.1.

В ряде случаев приходится назначать рабочие среды с переменным составом или изменяемыми физическими параметрами, для чего требуются теоретические и экспериментальные исследования, проводимые на однотипных деталях

научно-технических изделий. На рисунке 3.5 показан разрез канала для подачи топлива в виде сопла Лавалья, где рабочий профиль отверстия был получен электроэрозионно-химической прошивкой с предварительным нагревом рабочей среды до 80-90⁰С, что повысило ее текучесть и интенсифицировало массовый вынос, определяющий производительность прошивки.



Рисунок 3.5. — Образец канала переменного сечения, полученного при дополнительном подводе тепла в зону обработки

3.4. Процедура устранения рассогласования при проектировании КМО в рабочих средах с различными физическими свойствами и составами

Для устранения конфликтных ситуаций при проектировании комбинированных процессов с различными рабочими средами разработан алгоритм, приведенный на рисунке 3.6.



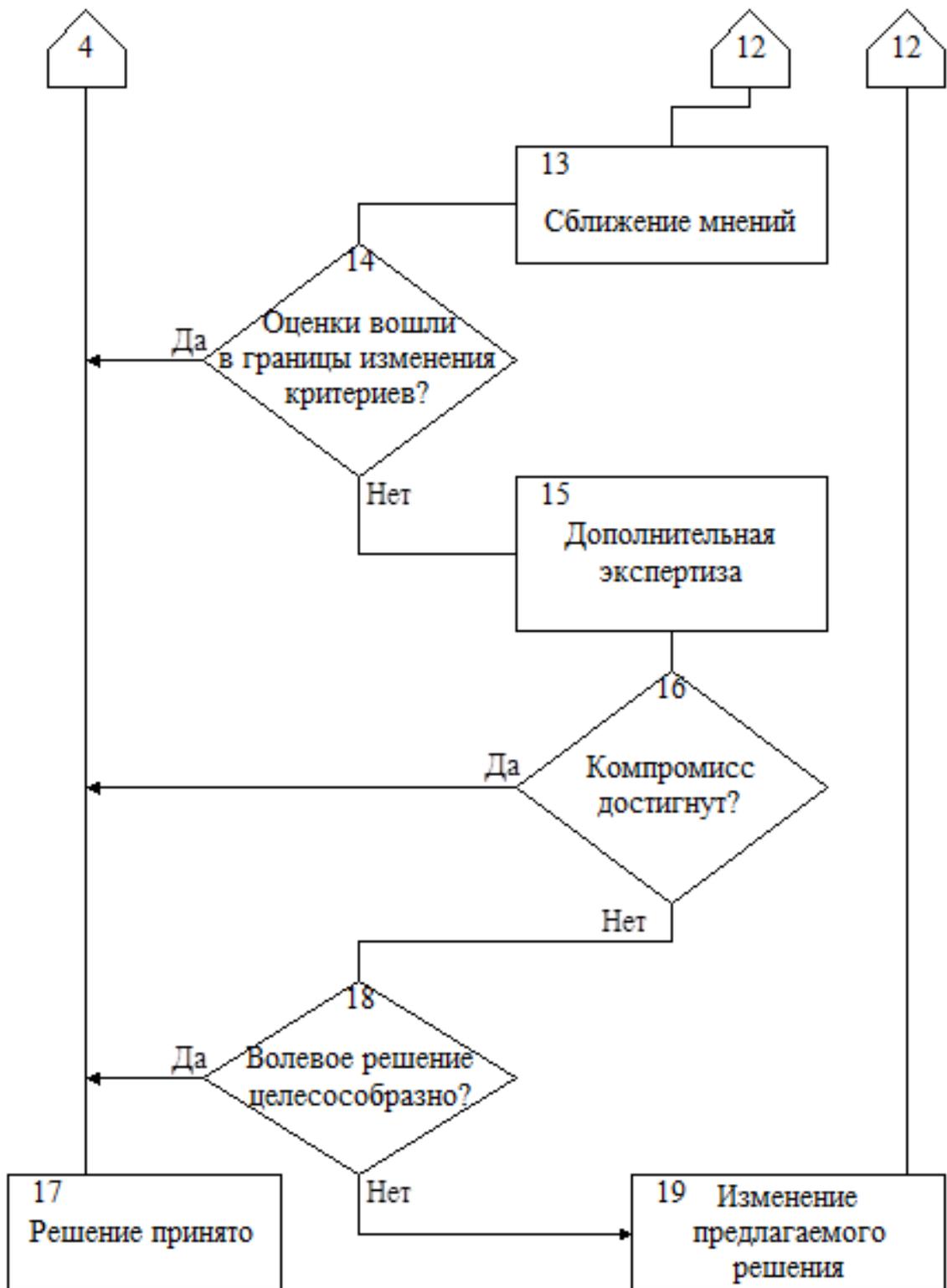


Рисунок 3.6. — Алгоритм действий для принятия решения в случае рассогласования мнений экспертов

Процедура использования алгоритма на рисунке 3.6 аналогична схеме, приведенной на рисунке 3.2.

Выводы по главе 3

Предложенная в главе модель позволяет проектировать перспективные комбинированные технологические процессы с использованием рабочих сред с различным агрегатным состоянием и составом, открывающими возможность управлять физическими характеристиками в зависимости от требований заказчиков наукоемкой продукции. Правомерность применения модели показана на примере выполнения технологической операции прошивания трактов в одной из ответственных деталей авиационных и ракетных двигателей-форсунок для подачи топлива в зону горения, востребованных большими тиражами и обеспечивающими уровень качества всего наукоемкого изделия. Рассмотрен механизм оценки показателей при использовании различных технологических сред по критерию производственной технологичности и предложена последовательность действий исполнителей при устранении несогласований, выявленных на этапах проектирования или при реализации результатов в процессе внедрения КМО в серийное производство.

Глава 4 Проектирование комбинированных процессов с эффективными рабочими средами

Анализ рассматриваемых в разделах главы 2 вариантов применения технологических сред с различными физическими параметрами, составом и агрегатным состоянием позволяет разработать последовательность проектирования технологических процессов с большим количеством управляемых воздействий, переходящих в процессе использования из одного состояния в другое.

4.1 Проектирование КМО с вакуумированной зоной обработки

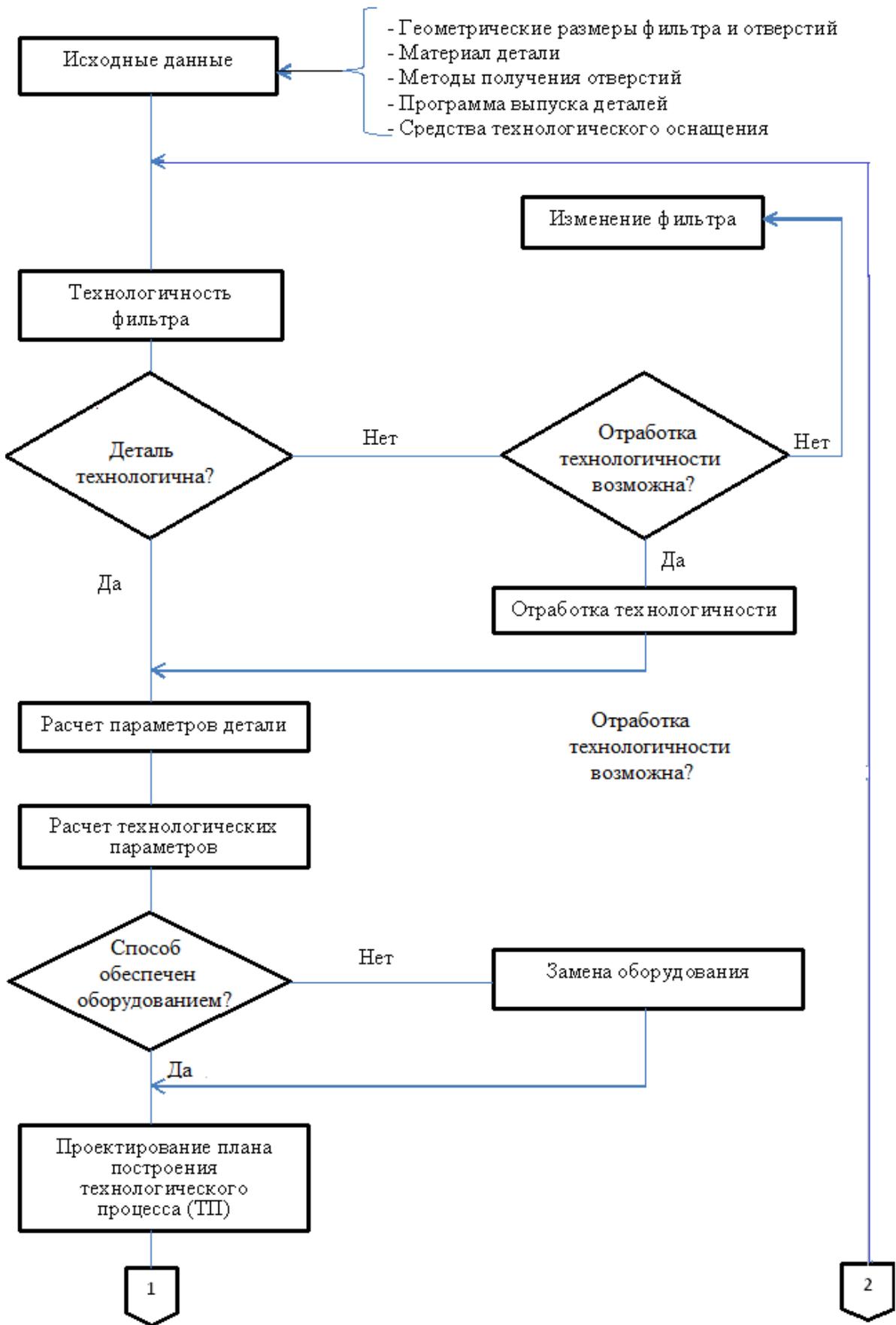
Для изготовления металлических фильтров во многих отраслях машиностроения используют электронно-лучевые методы прошивки отверстий, где наряду с тепловым концентрированным воздействием электронного луча происходят термические операции на границе отверстия. Здесь учитывается мощность подводимой энергии, интенсивность термических преобразований, условия выполнения операций. Технология изготовления фильтров на электронно-лучевых установках подробно рассмотрена в литературе [117;150 и др.]. Процесс протекает в низком вакууме, т.к. при наличии в зоне обработки молекул газов энергия электронов быстро снижается и основное преимущество операции – скорость прошивки круглых прямолинейных каналов - теряется. Но сразу же возникают ограничения (необходимость в вакуумной среде, неравномерность перераспределения энергии в лучах, вызывающая пропуск рабочих импульсов и др.). Оценка уровня полезности по модели в главе 3 работы дает хороший результат только при частичном учете ограничений, поэтому выполняются поиски более выигрышных результатов для выбора КМО с использованием лучевой энергии. Так в [150, т. II] предложено для прошивки аналогичных каналов применить луч лазера, который подается в зону обработки через прозрачное окно и позволяет более стабильно управлять энергией импульса. Однако, основные требования к фильтрам по повышению удельной способности очистки среды, управлению положением оси

каналов лучевые методы осуществить не способны. Здесь положительные результаты дает изготовление многослойных фильтров [108 и др.] по фотошаблонам [106 и др.], что рассмотрено в главе 5 работы и получены высокие предварительные оценки уровня полезности (глава 3) для дальнейшего исследования процесса.

В общем виде работоспособная технология изготовления однослойных и многослойных фильтров имеет вид, приведенный на рисунке 4.1. Проведенная численная оценка уровня полезности по модели 3.17 и технологическим параметрам раздела 3.4 позволяют обосновать использование технологических рабочих сред для изготовления конкретных видов фильтров (преимущественно металлических многослойных) с учетом выполнения эксплуатационных требований, в частности для авиакосмической отрасли.

4.2 Процедура проектирования комбинированных технологических процессов с использованием в качестве рабочей среды газообразных продуктов

Исследование выполнялось на примере упрочнение режущей кромки инструмента в среде азота. Проблему повышения долговечности инструмента, уменьшения использования дорогостоящих инструментальных материалов во многом решает применение различных способов упрочнения. Существующие методы предшествующей обработки могут приводить к образованию микродефектов поверхности или же к нарушению качества поверхностного слоя (например, после электроискрового, плазменного упрочнения), изменению исходных размеров и формы. Нанесение на рабочую часть инструмента износостойких покрытий может повысить твердость режущей кромки, но это не устраняет подповерхностные трещины, что отрицательно сказывается на работоспособности инструмента. Несмотря на малые размеры, микротрещины являются активными концентраторами напряжений и при работе инструмента вызывают скалывание режущей кромки или его повышенный износ.



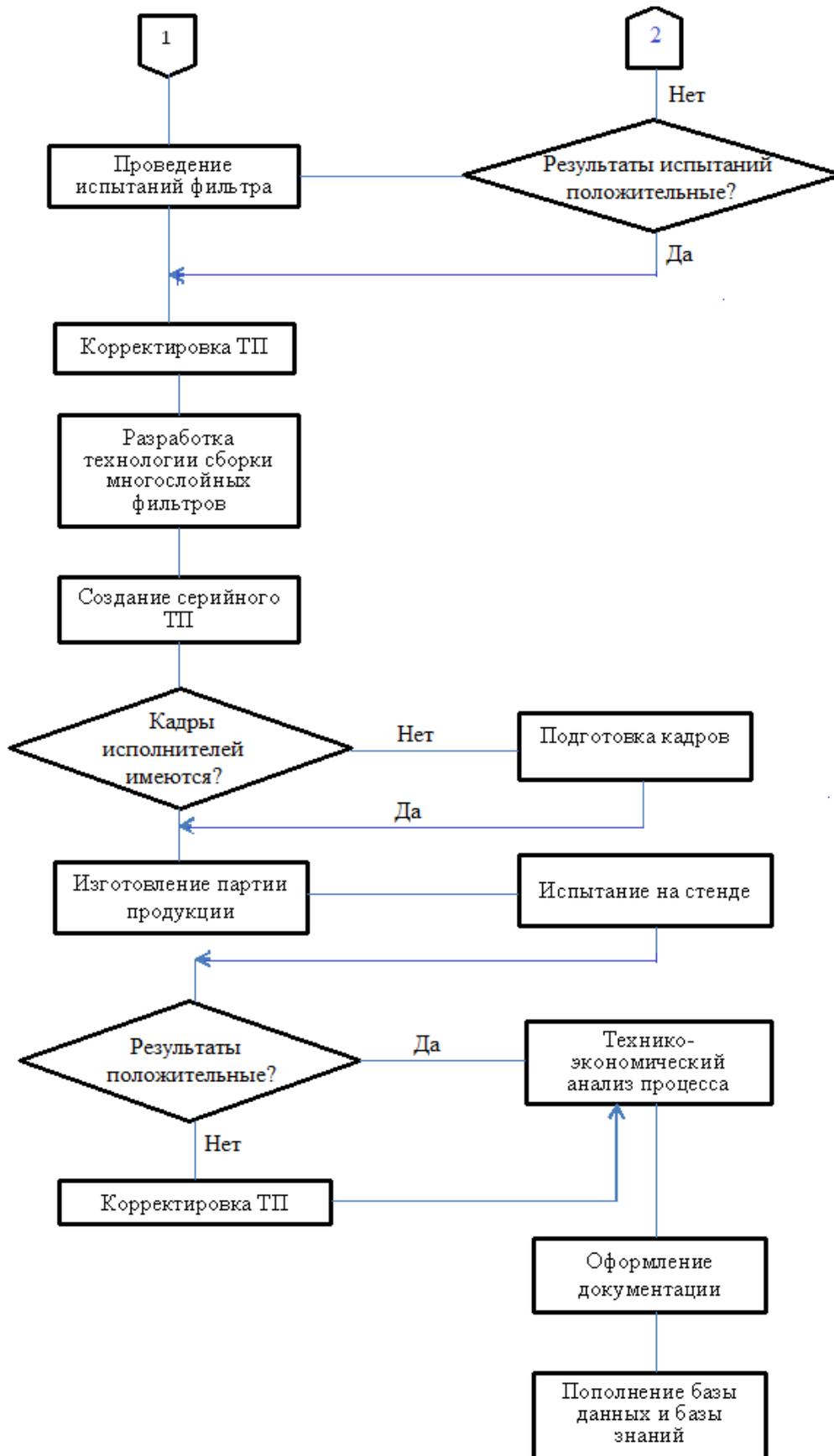


Рисунок 4.1. — Алгоритм построения технологического процесса изготовления и сборки многослойных фильтров

Наличие таких микродефектов на медицинском инструменте не гарантирует отсутствие инфекционных очагов в подповерхностном слое. В отличие от металлорежущего инструмента в машиностроении, здесь не допускается нанесения на рабочую поверхность слабо связанных с ней частиц, которые могут отделяться и вызвать осложнения.

Опыт показал, что при всех случаях упрочнения, в том числе с использованием комбинированных методов, требуется учитывать необходимость устранения микротрещин в поверхностном слое с получением повышенной стойкости инструмента. Это обеспечивается предложенным методом обработки с упрочнением режущей кромки в среде азота, имеющего различное агрегатное состояние.

Для металлического инструмента на предприятиях страны широко используются различные методы повышения его работоспособности путем упрочнения режущей кромки. Наибольшее распространение получил химический метод повышения исходных характеристик инструментальных материалов путем легирования их различными элементами, в частности, хромом, молибденом, вольфрамом [26;28]. Популярен метод термического улучшения эксплуатационных свойств материалов (к ним относятся закалка, отпуск и др.). Комбинации этих видов упрочнения в единой операции формируют химико-термические способы обработки, к которым относятся цементация, азотирование, цианирование и др. Эти виды упрочнения могут применяться с использованием электрических, магнитных постоянных и импульсных полей, наводимых при наложении электрических методов обработки, например ультразвуковых, лучевых воздействий [150-132]. Из них получило распространение упрочнение азотированием в тлеющем разряде, научные основы которого заложены в нашей стране первооткрывателем импульсной термической (электроискровой) обработки академиком Б.Р. Такой процесс протекает при обратной полярности в 2 этапа, включающих очистку поверхности и азотирование. Операция выполняется при использовании принятых в настоящее время технологических режимов (таблица 4.1).

Таблица 4.1 - Технологические режимы и результаты упрочнения металлических деталей азотированием в тлеющем разряде

Стадия упрочнения	Способ обработки и состав рабочей среды	Давление (+) Разряжение (-) раб среды	Температура, °C	Напряжение, В	Время обработки, час.	Глубина азотирования, мкм
Очистка поверхности детали перед азотированием	Механическое удаление загрязнений-	+ 0,1 – 0,2 мм.рт.ст.	До 250	1100- 1400	0,1-1,0	-
Азотирование	Смесь азота с воздухом	- 1 – (-10) мм.рт.ст.	470 – 580	400 - 1100	0,1 - 24	До 500

В промышленности накопился большой опыт рассмотренного в таблице 4.1 метода упрочнения инструмента и деталей технологической оснастки.

Наибольшее развитие, особенно в оборонных отраслях машиностроения, получило механическое упрочнение [12], в котором одним из используемых видов является ударное импульсное воздействие. Кроме того, в указанном источнике предлагаются комбинированные методы упрочнения с одновременным использованием химических, тепловых, лучевых, импульсных (в том числе высокочастотных, ультразвуковых) физических методов, часть которых целенаправленно применяют для получения изделий с повышенными эксплуатационными свойствами, в том числе для наукоемких объектов авиакосмической отрасли машиностроения. Такие методы целенаправленно используют для получения поверхностей с заданными характеристиками.

Комбинированное воздействие с тепловым импульсом от внешнего источника тепла (например, плазмотрона) при механической обработке без излишнего нагрева заготовки позволяет получить высокую твердость поверхностного слоя и ресурс режущей кромки металлического инструмента в широком диапазоне изменения этого показателя путем регулирования только отдельных видов воздействий. В работе установлено, что сопутствующий наклеп

поверхностного слоя деталей из инструментальных сталей после комбинированной обработки с предварительным нагревом может достигать 60% по сравнению с 20%, получаемых при чистовом точении. За счет комбинирования воздействий можно получить стабильные сжимающие остаточные напряжения в поверхностном слое и залечить часть микротрещин, если они присутствовали в режущей кромке как наследственное явление. Это благоприятно влияет на прочностные характеристики металлического инструмента. Поверхность деталей после чистовой обработки с нагревом приобретает твердость, близкую к закалке на воздухе. Следует учитывать, что глубина воздействия нагрева в основном не превышает 0,5 – 0,7 мм, хотя в литературных источниках [83;84] показана возможность получения этим способом желательного мартенситного слоя глубиной до 5 мм.

Опыт использования упрочненного режущего инструмента при помощи комбинированного легирования, относящегося к электроэрозионнохимическим методам обработки, показывает, что во всех случаях можно заметно повысить поверхностную твердость, ресурс. Но следует учитывать, что под действием импульсов увеличивается шероховатость. Это может ухудшить чистоту поверхности детали и не всегда допустимо для ответственных наукоемких изделий, т.к. наличие неровностей на режущих кромках инструмента вызывает возрастание сопротивления резанию и нарушение качества поверхностного слоя изделий.

В ряде случаев замена рассмотренных технологий на упрочнение в среде газообразного азота с нагревом места обработки или использование его в жидком состоянии при локальном импульсном нагреве от действия электрического разряда позволяет достичь снижения количества микротрещин, в том числе с сопутствующим осуществлением диффузионной сварки контактных поверхностей углублений, что создает монолитную высокопрочную структуру режущей кромки с нитридами, выходящими на поверхность режущей кромки инструмента и обеспечивающими возможность производительной обработки ряда марок труднообрабатываемых сталей.

Размеры и расположение микротрещин на поверхности инструмента зависят от источников их возникновения, что требуется учитывать при использовании предложенных методов упрочнения для их устранения.

Основные виды микротрещин можно классифицировать как: термические, шлифовочные и термошлифовочные. Они возникают в результате концентрации внутренних напряжений при превышении ими предела прочности материала на разрыв. При этом сверхпредельные напряжения формируются на глубине поверхностного слоя в пределах 50 – 75 мкм. Преимущественно трещины и микротрещины имеют нитевидную или сетчатую форму многоугольников со сторонами до 5 – 6 мм. Микротрещины обычно возникают на окончательных операциях и переходах, в том числе при комбинированных бесконтактных операциях обработки с наложением электрических и магнитных полей. При этом остаточные напряжения от предшествующих воздействий инструмента сохраняются и служат инициатором разрушения рабочих элементов инструмента при его эксплуатации. Наиболее известны шлифовочные микротрещины, которые имеют глубину до 0,01 мм и расположены под углами 30° - 80° к поверхности. Из них самыми опасными считаются открытые микротрещины, выходящие на режущую кромку, удаление которых целесообразно в процессе упрочнения, но это возможно только при расчетном смещении оси инструмента от края инструмента.

В отличие от металлорежущего инструмента в машиностроении, здесь не допускается нанесения на рабочую поверхность слабо связанных с ней частиц, которые могут отделяться и вызвать осложнения. В работе предложены новые технологии, устраняющие эти недостатки, а их новизна защищена патентами, полученными с участием авторов статьи [80;82].

4.3 Комбинированные методы обработки в жидких рабочих средах

4.3.1 Расчет, проектирование и аддитивные комбинированные технологии изготовления каналов в электродах-инструментах с использованием жидких рабочих сред

Рассмотрены пути расширения области эффективного использования электродов-инструментов, имеющих сложный профиль внутренних каналов для регулируемой подачи рабочей среды в зону обработки. Разработана и реализована методология расчета профиля и размещения каналов для подачи жидкой жидкой рабочей среды. Установлена потребность в средах, подаваемых через электрод-инструмент, для типовых случаев применения электроабразивной, в основном прецизионной, обработки деталей. Показано, что для этих целей наиболее эффективными являются аддитивные технологии изготовления монолитных инструментов с внутренними каналами переменной геометрии, обеспечивающими управляемое течение рабочей среды и стабилизацию процесса чистовой обработки.

Обоснована целесообразность использования аддитивных технологий для изготовления быстроперенастраиваемого электроабразивного инструмента для оснащения технологических процессов изготовления изделий высокой сложности, в частности, для потребностей авиационной и космической отрасли машиностроения. Показаны пути преодоления ограничений, свойственных чистовой абразивной обработке труднообработываемых материалов, в частности расширение возможности замены дорогостоящих абразивных гранул на менее дефицитные, стойкость которых при электроабразивной обработке достаточна для получения высокоресурсного инструмента в случае использования комбинированных технологических процессов.

Обосновано применение новых видов инструмента для комбинированных методов обработки, где практически отсутствуют силовые воздействия на деталь и устраняется нагрев зоны удаления припуска. Это позволяет расширить использование новых технологических процессов с применением перспективных аддитивных технологий при производстве электродов-инструментов, особенно для чистовой электроабразивной обработки.

В результате проведенных исследований установлено, что одним из перспективных методов чистового формообразования труднообработываемых

сплавов является комбинированный процесс анодно-механической обработки с регулируемой подачей в зону обработки жидкой рабочей среды, обеспечивающей анодное растворение припуска и выравнивание микроповерхности путем механической зачистки абразивными зернами поверхности от продуктов обработки. Здесь роль абразивных гранул инструмента в основном сводится к удалению и выносу из зоны обработки продуктов жидкой рабочей средой. Для этого требуется создать электроды-инструменты с каналами переменного сечения для организованного течения через корпус инструмента жидкости при режимах, учитывающих специфику комбинированной анодноабразивной обработки.

Развитие цифровой техники привело к появлению 3D принтеров, которые позволили автоматизировано создавать монолитные конструкции инструментов с каналами любой сложности при минимальных затратах на сборку. Это открыло возможность изготавливать новые виды инструмента любой сложности, в частности электродов-инструментов со сложнопрофильными каналами для подачи жидкой рабочей среды в зону обработки.

Показано, что для каналов в инструменте для подачи жидких сред с ускорением их течения, например, для интенсификации охлаждения зоны обработки, могут успешно использоваться материалы из авиакосмической техники, где для ускорения потока используют профиль сопла Лавалья. В этом случае следует учитывать специфику работы инструмента при чистовой обработке сложных сопряженных пазов, где требуется чистовая обработка боковых поверхностей углублений.

Обоснованы рекомендации по выбору режимов электроабразивной обработки электродами-инструментами с каналами, полученными с использованием аддитивных технологий. [153;126]: напряжение 10-15 В, плотность тока 15-20 А/см², радиальная сила резания [154] 0,7-0,8 Н/мм², подача круга [154;156] 1,5-2 м/мин.

Проведенные расчеты параметров течения рабочих сред через каналы в инструменте, подтвержденные экспериментами и результатами внедрения инструмента, позволили расширить область эффективного использования

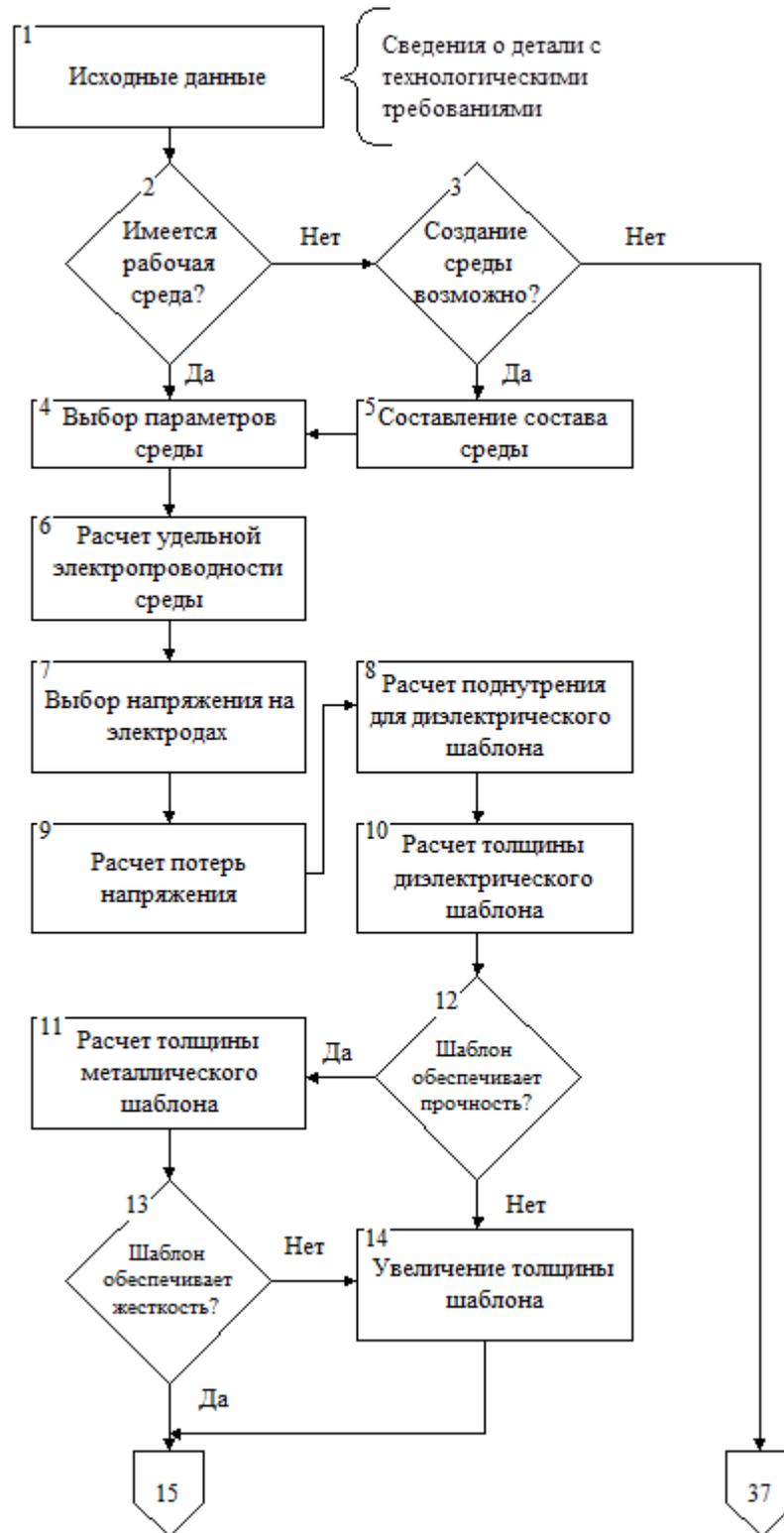
аддитивных технологий и создать новые (на уровне изобретений) инструменты для электроабразивной обработки по методу копирования и высокопроизводительного одновременного профилирования нескольких поверхностей.

Расчетные зависимости для описания механизма течения рабочих сред и методы их использования, приведенные в статье, позволили проектировать электроды-инструменты с профильными каналами, обеспечивающими применение эффективных технологических режимов для чистовой обработки инструментом с регулируемой подачей сред и выполнением критерия массовыноса продуктов обработки. Это обеспечило значительное повышение точности и качества чистовой обработки типовых деталей, в том числе для наукоемких изделий авиакосмического машиностроения, что актуально в условиях ограничения поставок импортной продукции.

Приведенные результаты расчета параметров течения рабочих сред через каналы в инструменте позволили расширить область эффективного использования аддитивных технологий, создать новые (на уровне изобретений) высокостойкие инструменты для электроабразивной обработки по методу копирования и комбинированного высокопроизводительного профилирования нескольких поверхностей в точных деталях из труднообрабатываемых сплавов.

4.3.2 Процедура проектирования технологического процесса для КМО в жидкой рабочей среде с переменным химическим воздействием и изменяющимся зазором

Алгоритм проектирования рассматриваемого технологического процесса, выполняемого в жидких рабочих средах, приведен на рисунке 4.2.



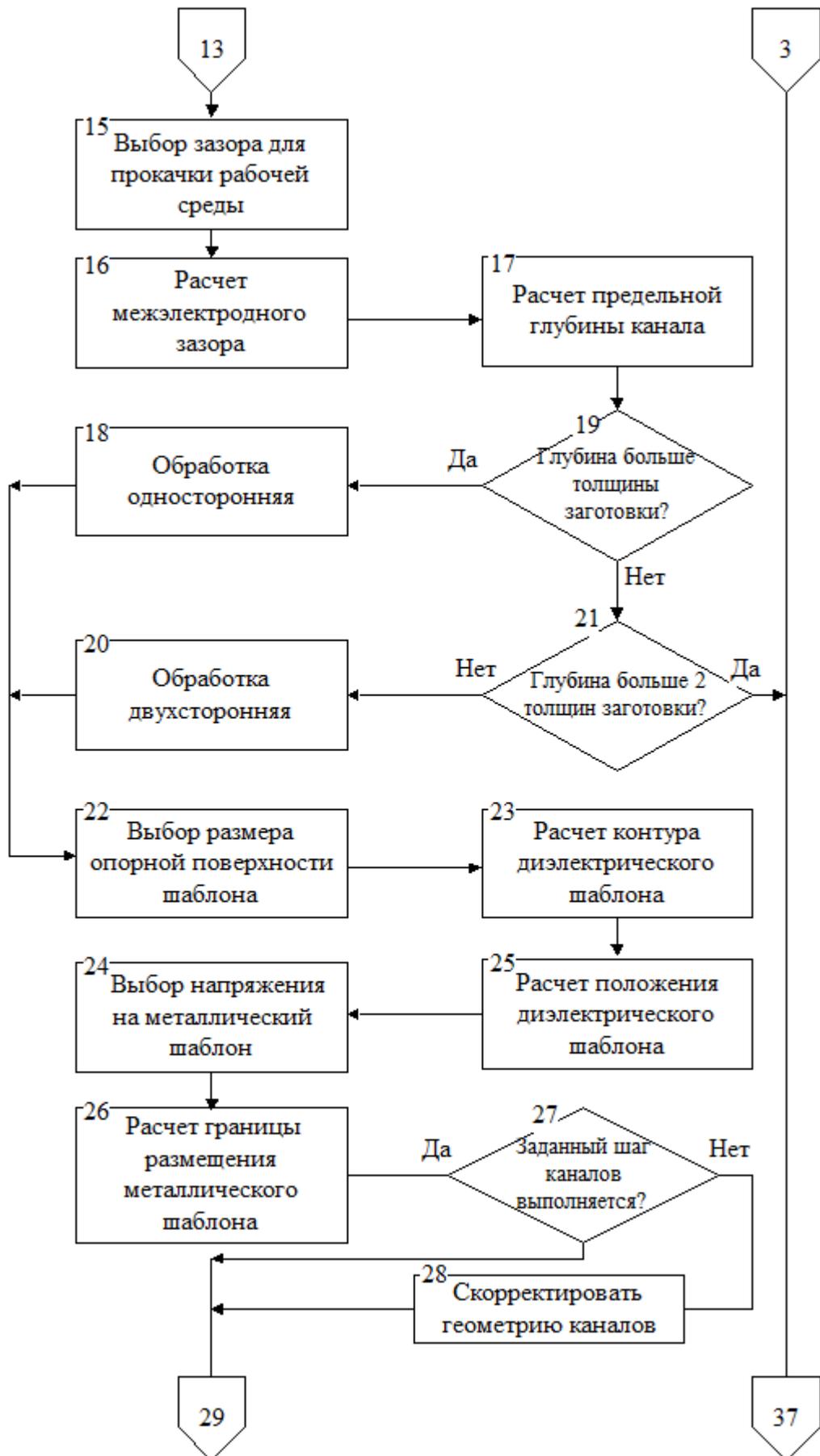




Рисунок 4.2 — Алгоритм проектирования технологического процесса изготовления каналов с использованием технологических сред с переменным состоянием в процессе обработки

4.3.3 Новые составы жидких рабочих сред для прецизионной комб обработки на примерах нанесения штрихов для формирования знаков и индексов при нанесении информации

Применяемые при маркировании жидкие рабочие среды не должны содержать соединений, которые могут образовать твердые продукты восстановления на катоде. Для этих операций в основном используют нейтральные растворы солей щелочных металлов, которые переходят в гидроокиси в межэлектродном промежутке или в прикатодном диффузионном слое. В кислых растворах возможно катодное осаждение некоторых металлов (железа, никеля, меди). Это может исказить форму катода и приводить к периодическим коротким замыканиям, что недопустимо, хотя продукты реакции железа способны создать устойчивое к износу цветное изображение знаков.

В [121] показано, что добавка в состав электролита галоидных анионов для маркирования материалов с высоким содержанием легирующих элементов способно повышать качество индекса и получать изображение с повышенной стойкостью при применении созданных учеными страны рабочих сред с составом на базе йода, марганцевокислого калия и других компонентов по авторским свидетельствам (а.с.) 390909, 329994. Разработаны новые технологические процессы, обеспечивающие высокое качество операции, для чего по а.с. 390909 применен на первом этапе приготовления нагрев жидкости до кипения, затем медленное охлаждение, после чего фильтрование. На базе этих условий были спроектированы и изготовлены жидкие рабочие смеси с интенсивным воздействием химических составляющих с формированием электролитов, на что получены документы на изобретения (а.с. 279836, 308097, 408747, 329994 и др.). При испытаниях положительные свойства выявили у рабочих сред следующего состава:

Состав 1:

Щавелевая кислота.....	15%
Этиленгликоль.....	1%
Вода.....	остальное

Состав 2:

Хлористый натрий.....	0,5%
Вода.....	остальное

Состав 3:

Азотнокислый натрий.....	0,5%
Вода.....	остальное

Состав 4:

Азотистокислый натрий.....	0,5%
Вода.....	остальное

Состав 5:

Дистиллированная вода.....	100%
----------------------------	------

Состав 6:

Этиловый спирт 96%.....	90%
Вода.....	остальное

Состав 7:

Глицерин.....	100%
---------------	------

Применение указанных сред обосновывалось в процессе комплексных испытаний составов по уровню технологичности, где результаты зависят от марок материалов деталей, размеров знаков, ширины штриха (ограничена требованиями

государственных стандартов), условий эксплуатации изделий (например, в вакууме, морской воде).

4.4 Проектирование технологических процессов с использованием рабочих сред в твердом состоянии [102]

При использовании комбинированных методов обработки с анодным растворением припуска требуется обоснованно подвести в зону протекания процесса жидкую токопроводящую среду, обеспечивающую в комбинированном технологическом процессе химическое воздействие аналогичное процессам, проходящим в электролитах. В ряде случаев, особенно в случае применения жидкого электролита, это затруднительно или невозможно из-за ограниченного доступа инструмента к месту обработки. При малых объемах снимаемого материала количество, используемого для прохождения химической реакции в жидкой составляющей рабочей среды, незначительно, что позволяет создать и применять твердый электролит, наносимый на заготовку перед неподвижной сборкой составного изделия.

В приборостроении и авиакосмическом машиностроении имеется большое количество деталей и узлов, изготавливаемых с помощью технологической оснастки, удаляемой из детали до ее окончательной обработки. При этом требуется создать между контактирующими поверхностями хотя бы минимальные зазоры, достаточные для рассоединения элементов оснастки и детали. На рисунке 4.4 приведены типовые детали, выполняемые с использованием закладных частей, где экономически обосновано применение комбинированной обработки с использованием твердого электролита.

На рисунке 4.4а, показаны проволочные спирали из тонкой проволоки навитые в форме спирали. Такие детали используются в световых приборах, например в лампах накаливания, указателях, индикаторах, проволочных электрических сопротивлениях и для других целей.

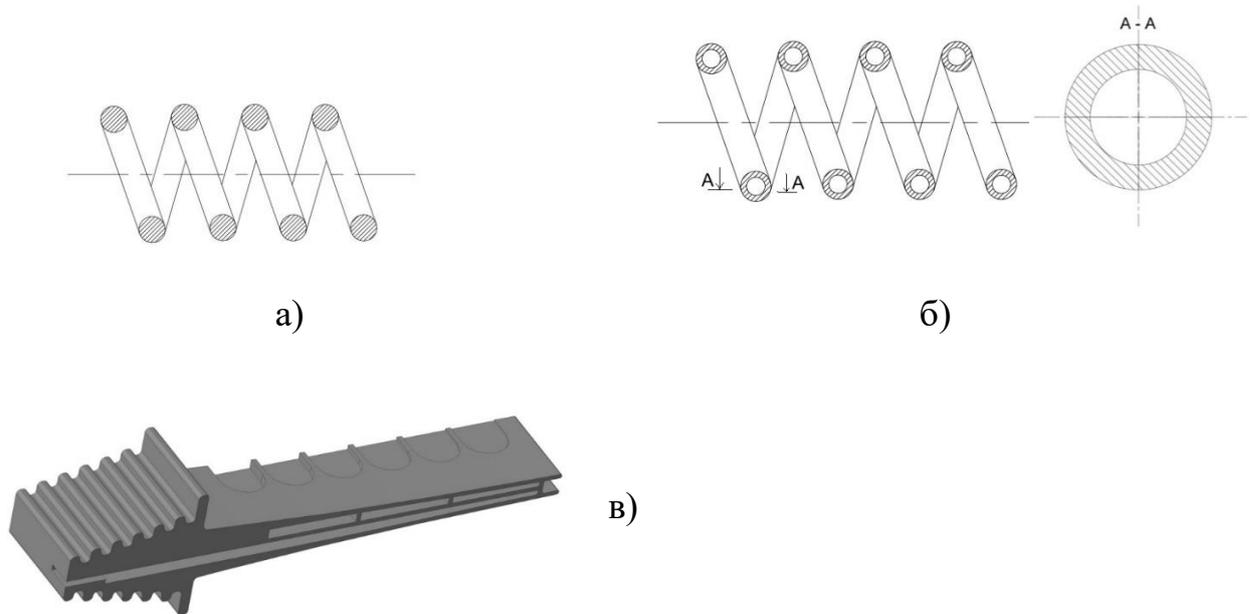


Рисунок 4.4 — Типовые детали для комбинированной обработки с использованием твердого электролита, обеспечивающего образование зазоров для удаления вставок: а) проволочная спираль для световых приборов; б) змеевик системы охлаждения; в) охлаждаемая лопатка турбины

Подобные изделия (рисунок 4.4, б) применяются в системах охлаждения, где требуется через змеевик пропустить охладитель. В авиакосмическом двигателестроении при изготовлении штампованных охлаждаемых лопаток (рисунок 4.4, в) применяют металлические вставки, которые затем удаляют путем вытравливания. Такая технология описана в [25], где рассмотрены варианты одноканального и многоканального охлаждения с использованием дефлектора, устанавливаемого на место вставки после ее удаления. Иногда охлаждаемые лопатки выполняют путем сварки пустотелого пера с замком. Тогда проблема удаления вставки значительно упрощается, т.к. имеется открытый участок лопатки для извлечения дефлектора. Однако сам процесс вытравливания в концентрированных щелочах [25] опасен для здоровья исполнителей и вызывает растравливание металла детали, что нарушает ее качество при эксплуатации. Поэтому требуется разработка процесса удаления вставки, при котором не имеется негативных явлений. К таким условиям можно отнести комбинированную

обработку с анодным растворением вставки в твердом электролите. Изменение размера вставки легко компенсировать напылением ее металлическим материалом. Схемы обработки типовых деталей с твердым электролитом приведены на рисунке 4.5.

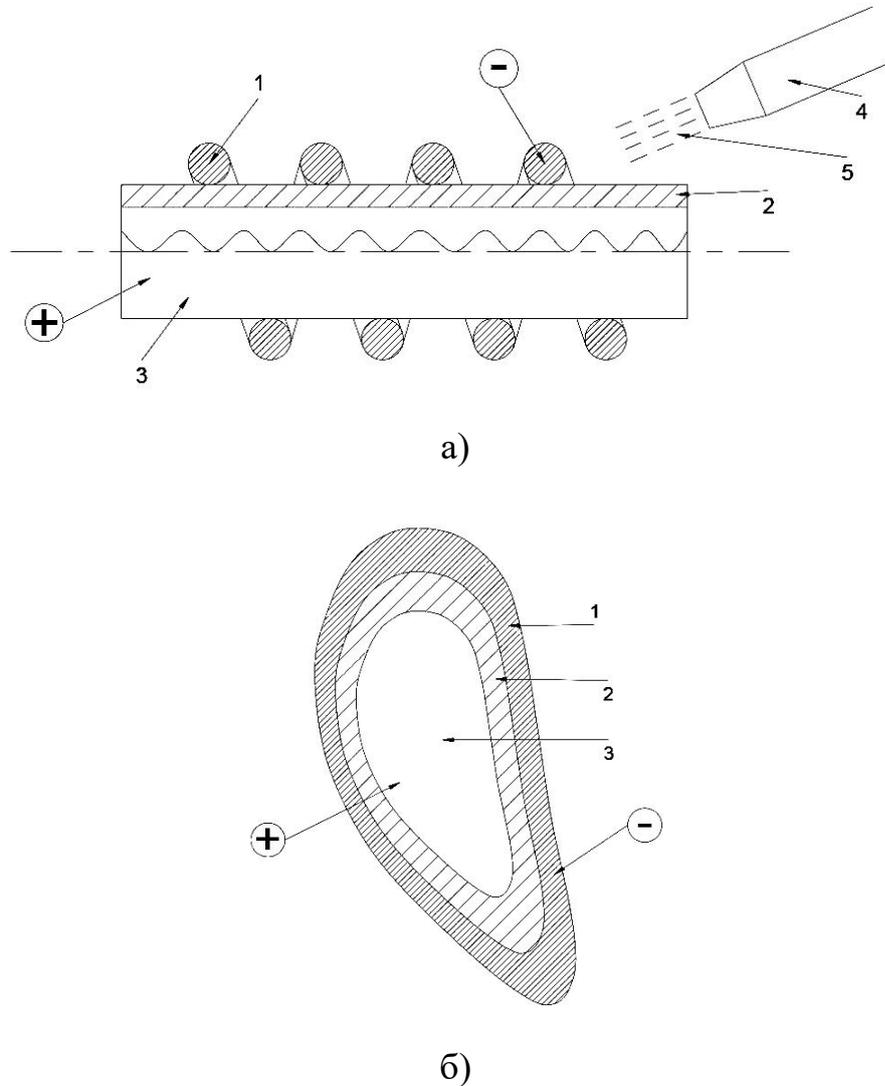


Рисунок 4.5 — Схемы обработки с твердым электролитом: а) удаление металлической вставки из спирали; б) удаление металлической вставки из охлаждаемой лопатки

Для спиральных деталей (рисунок 4.5, а, б) применяют металлические вставки 3, на которые предварительно наносят слой твердого электролита 2, например, из растворимого в воде хлористого натрия, или солей серебра (рисунок

4.5, а). Здесь спираль подключают к отрицательному полюсу низковольтного источника тока, а деталь является анодом. Для повышения производительности анодного растворения вставки 3 вместо растворения припуска через форсунку 4 подают жидкость, например воду 5. С целью защиты установки от коротких замыканий вставку 3 перед обработкой в детали 1 закрепляют за свободный конец так, чтобы ее колебания в процессе обработки не превышали величины межэлектродного зазора и не вызывали коротких замыканий, нарушающих процесс обработки и качество детали.

Аналогичная схема обработки применяется для образования в охлаждаемой лопатке зазора между деталью и вставкой (рисунок 4.5, в), где доступ жидкости к твердому электролиту затруднен. Применение впрыска воды, как это используется в схеме «а» (рисунок 4.5), не достигает требуемого результата, но даже без этого по предлагаемой схеме удастся обеспечить получение зазора, достаточного для удаления вставки.

В [25] показана возможность штамповать охлаждаемые лопатки с образованием системы каналов внутри лопатки, где удаляемые вставки представляют из себя (рисунок 4.6) стержни с покрытием серебром и твердым электролитом (обычно на базе серебра) [102].

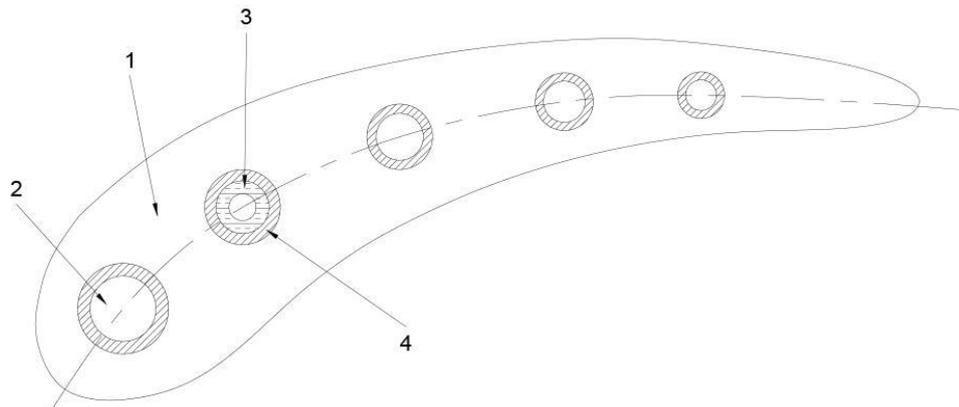


Рисунок 4.6 — Схема обработки охлаждаемых лопаток с многоканальными трактами для охладителя

На рисунке 4.6 перед установкой в заготовку 1 вставку 2 покрывают слоем серебра 3 на толщину 30-60 мкм. Покрытие на толщину менее 30 мкм может

привести к нарушению равномерности покрытия после окончательной обработки. Слой серебра будет чередоваться с выступами материала вставки, что приведет к невозможности или затруднит удаление заполнителя после растворения слоя серебра. Покрытие вставки на толщину более 60 мкм приводит к увеличению времени обработки на 30-40%. На слой серебра 3 наносят твердый электролит 4 на толщину 10-50 мкм. Нанесение твердого электролита на толщину менее 10 мкм может привести к нарушению сплошности твердого электролита, пробоем межэлектродного промежутка. Толщина слоя 10-50 мкм обеспечивает устойчивое растворение слоя серебра, стабильное протекание процесса. Покрытие твердым электролитом на толщину более 50 мкм увеличивает время обработки на 10-20%.

В качестве твердого электролита может быть использован электролит, имеющий состав $RbAg_4I_5$ [22]. Этот электролит обладает высокой адгезией к серебру, что будет способствовать механической прочности вставки и покрытия. Подключение вставки, установленной в заготовку, к положительному полюсу источника питания, а самой заготовки лопатки – к отрицательному обеспечивает протекание процесса анодного растворения слоя серебра. После его растворения вставка свободно удаляется из отверстия. Использование в качестве катода самой заготовки исключает травление металла, из которого она выполнена, что повышает точность и сохранение формы канала.

В качестве примера рассмотрена обработка 10 отверстий в лопатке по предлагаемому способу. Она проходит под током при напряжении 10-12В. На вставке создают положительный, а на лопатке – отрицательный потенциалы от источника постоянного или импульсного тока. На вставку подают высокое механическое давление жидкой рабочей среды, под действием которого по мере растворения твердого электролита формируется межэлектродный зазор, достаточный для выноса продуктов обработки и продолжения процесса растворения покрытия. Время удаления слоя серебра толщиной 40 мкм при толщине твердого электролита 30 мкм составляет 45-50 минут. Затем вставку извлекают из заготовки и приступают к контролю каналов.

В рассмотренном процессе с твердой токопроводящей рабочей средой впервые [102] обоснована для разборки деталей возможность использования покрытий из твердого электролита в процессе комбинированной обработки с применением анодного растворения для удаления металлических технологических вставок без использования токсичных рабочих сред. Применение нового способа позволило получить качественные детали при минимальной трудоемкости операции и улучшить условия труда при изготовлении наукоемких изделий в различных отраслях машиностроения.

Выводы по главе 4

В главе рассмотрена процедура создания комбинированных процессов с эффективными рабочими средами. Показаны ранее подробно не изученные системы с вакуумированием зоны обработки, а также при использовании в качестве технологической рабочей среды газов, жидкостей, твердых веществ и их сочетаний. Дана оценка технологичности выбора рабочей среды для конкретного технологического использования. При этом значительно сокращен объем экспериментальных исследований и сроки внедрения сред в производство. Часть сред создано и применено впервые, что позволило расширить область использования в машиностроении комбинированных методов обработки с наложением электрических и магнитных полей.

Глава 5 Перспективы развития комбинированных методов обработки с эффективными составами и свойствами технологических рабочих сред

5.1 Пути использования рабочих сред с наложением магнитоимпульсных воздействий для стабилизации внутренних напряжений

В процессе создания отечественного оборудования, взамен получаемого из-за рубежа, потребовались разработка и использование новых комбинированных процессов с различными технологическими рабочими средами, где в качестве одного из воздействий используется магнитоимпульсный процесс, успешно заменяющий в малосерийном производстве термические операции, особенно те, которые выполняются на импортных средствах технологического оснащения. Это касается наукоемких отраслей авиакосмического машиностроения, выпуска оборудования и требует отработки технологичности с использованием комбинированных технологических процессов на стадии создания объектов и их совершенствования на первых образцах продукции. С возрождением отечественного станкостроения на первый план выходит необходимость повышения качества технологического оборудования, обеспечивающего достижение его востребованности в стране и конкурентоспособности на мировом рынке. В современных условиях значительная часть отечественных средств технологического оснащения выпускается малыми и средними промышленными предприятиями, имеющими ограниченную номенклатуру оборудования, в том числе – для выполнения термических операций. Здесь универсальные мобильные установки для магнитоимпульсной обработки (особенно крупногабаритных изделий) имеют значительные преимущества, которые возрастают, если в них используется стабилизация сварных деталей, востребованная при ремонте и восстановлении средств технологического оснащения на удаленных промышленных предприятиях с ограниченными возможностями длительной транспортировки объектов для ремонта.

Исследование механизма магнитоимпульсной стабилизации крупногабаритных деталей и опыт эксплуатации мобильных установок по разработанной комбинированной технологии показали целесообразность использования процесса с магнитоимпульсным воздействием для повышения качества деталей и сборных конструкций типа шаровых и цилиндрических баллонов с ограниченным доступом в зону обработки инструмента. В большей степени это относится к гибкоструктурным производствам, при разработке новых изделий машиностроения в технологиях, используемых на промышленных предприятиях малого и среднего бизнеса и при ремонте технологического оборудования, размещенного в труднодоступных для транспорта районах страны, особенно в случае отсутствия у себя средств для термической обработки деталей больших габаритов.

В [30] показаны результаты исследований по стабилизации остаточных напряжений в труднодоступных для обработки участках высоконагруженных деталей, полученных различными методами, в том числе путем сборки неразъемными неподвижными и подвижными соединениями. Раскрыто взаимное влияние различных видов упрочнения на деформацию деталей. Разработаны комбинированные технологические процессы импульсной стабилизации геометрии заготовок за счет совместного управляемого воздействия механических и магнитных факторов. Обоснованы возможности расширенного использования результатов исследований в машиностроении, в том числе при изготовлении сосудов высокого давления, технологической оснастки и деталей, работающих в условиях больших нагрузок.

Магнитоимпульсная импульсная обработка деталей с большим перепадом остаточных напряжений заготовки имеет применение для целей близких к виброударному упрочнению, достаточно полно рассмотренному в [9], однако этот вид упрочнения требует создания оборудования с быстроизнашиваемыми узлами, энергоемок, неэкологичен, поэтому не всегда технологичен [9]. В опытном и единичном производстве, использование которого неизбежно требуется при освоении и запуске в серийное производство создаваемой и осваиваемой

перспективной техники, а также в случае ремонта и восстановления поврежденной (например, в ходе боевых действий) сложной техники. Здесь эффективна комбинированная импульсная обработка с магнитоимпульсным воздействием, обеспечивающим выравнивание остаточных напряжений. Она упрощает технологический процесс, не требует использования сложных подвижных механических вибраторов, применение которых вызывает большие трудности при установке на сложноконтурные и крупногабаритные поверхности. Такой способ дает возможность проводить обработку участков с локальными остаточными напряжениями. Это расширяет область использования комбинированных методов упрочнения с использованием электромагнитных воздействий при изготовлении крупногабаритных деталей, особенно собранных из различных сортов металлов, взамен термообработки для изменения эксплуатационных свойств изделий. Такое заключение обосновано тем, что многие машиностроительные предприятия малого и среднего бизнеса не имеют собственных термических участков для отжига или других видов выполнения термических операций металла, а выполнение подобных действий на стороне (даже на отечественных заводах) связано с дополнительными транспортными расходами, удлинением технологического цикла, необходимостью дооснащения собственного производства средствами контроля и кадрами исполнителей. Это убедительно доказывает преимущества разработанного процесса, что показано в [97].

При проектировании комбинированного технологического процесса необходимо применять режимы, обеспечивающие получение заданной заданной точности деталей. При импульсной стабилизации крупных сборных конструкций процесс выполняют при нескольких переходах, где начальное занимает первую половину длительности импульса, используют расчетную амплитуду вибраций без учета влияния нагрева заготовок от действия импульсов. Как показано выше этот показатель обычно несколько завышен, но находится в пределах допуска. На следующих переходах режим плавно смягчают. Контроль длительности каждого импульса выполняют по величине максимального тока и пределами амплитуды колебаний обрабатываемого участка заготовки.

При проектировании этапа работы на оборудовании следует обосновать выбор установочных баз, для чего преимущественно используют резиновые станочные опоры, назначаемые с учетом массы, геометрии обрабатываемых деталей. Они обеспечивают при обработке деталей стабильный процесс при амплитуде колебаний под возбудителем до 1,5-2,0 мм, что отвечает установленным границам изменения этого параметра.

Межоперационный контроль режима комбинированной обработки с вибрацией детали электромагнитным воздействием выполняют по силе тока. Как показано в [9] «... для импульсных механических воздействий с увеличением габаритов детали этот показатель снижается и при уменьшении менее чем на 12-15 % он становится ненадежным для контроля. В таком случае управление процессом выполняют только по расчетному времени обработки, которое в процессе настройки вибрационного оборудования для крупных заготовок составляет не более 60 минут» [9]. «Приемочный контроль качества обработки выполняют по результатам измерения размеров детали в базовых точках после стабилизации остаточных напряжений. Операцию обычно выполняют выборочно на координатно-измерительных машинах. Результаты измерений для вибрационного упрочнения и комбинированной обработки с электромагнитным воздействием позволяют получить достоверные результаты при отработке технологичности типовых изделий в различных отраслях машиностроения» [97].

5.2 КМО для интенсификации изготовления каналов с переменным сечением

В главе 4 показано, что одним из перспективных способов изготовления металлических фильтров является получение проточной части с любым профилем сечений и изгибом оси канала путем использования наложенных друг на друга слоев из тонкостенной полосы, в которой заранее выполнены сквозные отверстия. Если операции прошивки выполняются по диэлектрическим шаблонам, то время комбинированного получения резко сокращается и не зависит от геометрии

принятых в фильтре отверстий. Это может быть прямоугольник, многогранник. А поскольку при изготовлении отверстий усилие на заготовку практически отсутствует, то можно создавать каналы с перемычками, соизмеримыми с допуском на величину самих отверстий, т.е. от 0,05 мм между соседними шестигранниками. При толщине листа 0,25 - 0,3 мм такой параметр составляет 0,3 - 0,5 мм. Это позволяет на 30-35% увеличить расходные характеристики фильтров по сравнению с серийно выпускаемыми изделиями, в которых отверстия прошивают лучевыми методами или на столько же снизить массу изделия, что соответствует требованиям, предъявляемым к деталям летательных аппаратов. При малой толщине ленты она укладывается при сборке детали в несколько слоев. За счет увеличения длины наружного слоя происходит сдвиг соседних отверстий и происходит формирование каналов с криволинейной осью, где изгиб зависит от направления наложения слоев. Технологический процесс изготовления многослойных металлических фильтров достаточно детально рассмотрен в [108].

5.3 Интенсификация процесса обработки путем кавитации рабочих сред [139]

В [139] показано, что одним из назначений жидкой рабочей среды при электроэрозионной и электрохимической размерной обработке является массовый вынос продуктов из зоны обработки, который определяет производительность процесса и другие технологические показатели.

Разработаны теоретические основы интенсификации процесса массового выноса с управляемым использованием импульсов кавитации и их формировании вне зоны обработки в период между интервалами съема припуска, когда неравномерность течения не сказывается на величину съема, но обеспечивает активное удаление продуктов обработки, что ускоряет удаление припуска без нарушения качества изделия и делает процесс конкурентоспособным среди известных, в том числе новых технологических приемов.

Начиная с момента открытия электрических методов обработки считалось, что для получения качественных деталей требуется обеспечить ламинарное течение рабочей среды, для чего использовали пролив, а в случае электрохимической размерной обработки прокачку со слабой турбулизацией потока или дискретную прокачку с ограниченной скоростью течения рабочих сред. Попытки повысить массовынос позволяли интенсифицировать процесс. Появление кавитационных явлений приводило к неравномерности съема, возникновению погрешности, нарушению качества поверхностного слоя, вызывающего брак деталей или необходимость в последующих чистовых операциях. Принципиально новым вкладом в технологическую науку и практику стала интенсификация процесса массовыноса.

В патентах [2646652; 2704350] приведены сведения о комбинированной обработке с использованием кавитационного течения жидкой рабочей среды. В работе [100] исследован процесс массовыноса с использованием нового метода, разработаны оригинальные, ранее не использованные, технологические процессы импульсной электроэрозионной, электрохимической и комбинированной эрозионно-химической обработки, внедрены созданные технологии в производство наукоемких изделий авиакосмической промышленности. Управляемые кавитационные воздействия, создаваемые перед зоной обработки [97], позволили снять ограничения по толщине разделяемых заготовок, сохранить высокую скорость обработки при обеспечении качества изделий и стабильном достижении конкурентоспособности при обработке даже простых деталей из легкообрабатываемых материалов, что ранее считалось нетехнологичным.

Комбинированная обработка с кавитационным течением рабочей среды технически и экономически оправдана в гибкоструктурных производствах. Они эффективны при изготовлении глубоких сквозных и глухих отверстий, а также каналов малого сечения, при разделении заготовок большой толщины, обработке крупногабаритных деталей с удлиненной трассой течения рабочей среды в межэлектродном промежутке. В этих случаях становится оправданным усложнение и удорожание средств технологического оснащения, применяемого

оборудования для создания и управления кавитационным массовыносом продуктов обработки.

5.4 Состояние и пути развития комбинированных методов обработки наукоемких изделий [106]

В [106] рассмотрено состояние научных технологических исследований и перспективные пути их применения в машиностроении страны. Приведены результаты изысканий отечественных ученых за последние годы и намечены направления работы на последующий период. Отмечено укрепление научных связей ученых и производителей с Российской академией наук в области развития и применения комбинированных методов обработки. Определено место искусственного интеллекта (ИИ) и цифровых технологий при их применении в процессе разработки и выпуска отечественного технологического оборудования. Показаны приоритетные направления использования комбинированных методов обработки в специальном станкостроении. Обоснованы области успешного развития машиностроения в стране с учетом достижений авиакосмической отрасли. Приведены рекомендации по проектированию технологических режимов комбинированной обработки типовых деталей. Обоснована возможность повышения качества изделий за счет нанесения покрытий с обоснованием использования новых рабочих сред и реализация результатов исследований с применением критериев теории производственной технологичности.

Темпы развития отечественной технологической науки во многом определяются состоянием и реализацией исследований в авиакосмической отрасли машиностроения, а также обоснованным распределением сил и средств при перспективном планировании дальнейших мероприятий. Эти действия выполняются вузами, отраслевыми институтами и организациями системы Российской академии наук через участие в использовании материальных, финансовых средств, выделяемых на такие цели из бюджета страны. В современных условиях для эффективного применения имеющихся весьма

ограниченных ресурсов в качестве экспертов привлекаются ученые отраслевых академий и технических учебных заведений. Здесь значительную роль играет Ассоциация технологов машиностроителей России, ежегодно организующая мероприятия по подведению итогов предшествующего этапа и обосновывающая совместно с научным советом Российской академии наук наиболее востребованные направления государственного финансирования приоритетных направлений отечественного машиностроения. В качестве инструмента для оценки эффективности выполненных работ используются количественные показатели системы технологичности, способные убедительно доказывать результативность проводимых научных исследований.

Анализ состояния отечественного машиностроения показывает, что в последний период в России сформировались актуальные научные направления, одним из которых является система управления качеством продукции в условиях импортозамещения, когда научные достижения и средства их реализации стали труднодоступными из-за ограничений, введенных рядом технически развитых держав. Это сдерживает реализацию возможностей создаваемых комбинированных методов обработки в машиностроении и темпы развития наукоемких производств с использованием современного оборудования и средств технологического оснащения. Анализ состояния научных исследований в ведущих отраслях машиностроения страны показывает, что для преодоления сложившихся трудностей требуется:

1. В текущий период наряду с имеющимися государственными программами в области машиностроения создать, детализировать и конкретизировать систему развития отечественного станкостроения, в том числе ускорить производство специального оборудования и средств технологического оснащения, включающего как серийно выпускаемые, так и специальные станки с использованием комбинированных методов обработки, содержащих комплекс воздействий на объект изготовления в форме единой обрабатывающей системы. Для восстановления и развития отечественного станкостроения требуется не только целевое финансирование, но и научнообоснованная перспективная плановая

подготовка специалистов и ученых через технические учебные заведения с использованием для этих целей средств из госбюджета.

2. Расширить исследования в области технологии аддитивного машиностроения, которое требуется развивать не только в направлении послойного наращивания материала, но и для управления качеством объектов производства, например, путем перераспределения внутренних напряжений в материале и покрытиях. Эта проблема рассмотрена в [5] для баллонов с давлением до 45-50МПа, используемых в перспективных ракетных двигателях многоразового применения.

3. Создание и расширение области применения комбинированных методов обработки [126]; [132] с комплексным использованием различных воздействий, включая электрические методы обработки, где научно обоснованное управление процессом позволяет технологам реализовать изготовление перспективных качественных объектов многих отраслей техники и сформировать научную базу для отработки технологичности [97] создаваемых, модернизированных и восстанавливаемых изделий.

4. В направлении научного обоснования целесообразности разработки комбинированных технологических процессов необходимо провести исследования по созданию специального технологического оборудования в виде технологических комплексов. В течение последних лет такие работы выполняются совместно с белорусскими коллегами, которые обобщили результаты в форме монографии [139] «Теоретические основы проектирования технологических комплексов», выпущенной в Минске. Предложенный подход позволяет более полно и эффективно загрузить современное очень сложное, дорогое, труднодоступное оборудование и создать научную базу для обоснованного выбора оборудования при переоснащении производства под новые изделия.

5. В условиях нарастающего дефицита специалистов по наукоемким технологиям, особенно в оборонных отраслях машиностроения, намечается высвобождение части исполнителей за счет применения искусственного интеллекта (ИИ) и цифровизации производственного процесса. Этот подход через

ИИ давно используется в машиностроении, хотя в большей степени известен как применяемый при шахматных и военных баталиях. Действительно, разве не ИИ применяется в разработанных нами и зарубежными специалистами станках с управлением процессом обработки непрофилированным электродом-инструментом по методу обратного копирования. Имеются ввиду болгарские и швейцарские станки типа ЭЛФА731 для комбинированной обработки и отечественные станки группы СЭХО с адаптивным управлением перемещения и технологическим процессом по сигналам обратной связи. Подобное оборудование десятки лет выпускали малыми сериями в основном для приборостроительных, предприятий. Однако сейчас при возрождении отечественного станкостроения потребуется выполнить немало сложных исследований, в том числе с использованием ИИ, для совершенствования технологии, оборудования и достижения лидирующего положения в этой отрасли отечественной технологической науки. Наиболее весомые научные достижения в этой области машиностроения получены при разработке и совершенствовании комбинированных методов обработки для применения их в технологических комплексах.

5.5 Расширение области использования в машиностроении КМО с различными технологическими рабочими средами [103]

В публикации [103] представлен анализ возможностей расширения применения высокотехнологичных комбинированных методов обработки на заключительных этапах производства. Авторы предлагают инновационный подход к решению этой задачи через создание электронного хранилища конструкторско-технологических решений. В работе подробно описаны результаты систематизации и стандартизации различных схем и методов комбинированной физико-химической и лучевой чистовой обработки, которые были получены в процессе формирования базы технологических решений. Особое внимание уделяется описанию интерфейса, обеспечивающего удобный доступ к данным этого

хранилища. На конкретном примере комбинированной обработки демонстрируется практическое применение разработанных решений при создании технологий чистовой обработки широкого спектра деталей машин. Это касается не только различных отраслей машиностроения, но и смежных технических областей, что значительно расширяет возможности применения представленных методик в промышленности. В ходе построения логической структуры банка конструкторско-технологических решений чистовых методов обработки особое внимание уделено систематизации, унификации и разработке методов чистовой размерной обработки. Это объясняется увеличением спроса промышленных предприятий на данный вид обработки и недостаточным научным заделом в этой области.

В результате проведенных исследований методов электрохимической, электрофизической, ультразвуковой, лучевой обработки и их сочетаний в форме комбинированного процесса систематизировано [112; 110] свыше 40 способов обработки, включающих до 80 схем их реализации. Для каждого способа установлены типовые планы обработки, унифицированы методики определения технологических режимов, сформулированы наборы типовых решений по выбору оборудования, рабочих сред и технологической оснастки. Полученные результаты положены в основу создания электронного банка структурированных конструкторско-технологических решений физико-химических методов обработки, логическая схема которого приведена на рисунке 5.1.

Для организации доступа к данным, в банке конструкторско-технологических решений и работы с ними создана диалоговая среда конечного пользователя, которая является отображением логической схемы базы данных (рисунок 5.1) в структуру многооконных экранов (рисунок 5.2). Каждый экран диалоговой среды (рисунок 5.2) состоит из одного или нескольких окон, которые служат для визуализации предлагаемых меню, форматов.

Каждый экран диалоговой среды (рисунок 5.2) состоит из одного или нескольких окон, которые служат для визуализации предлагаемых меню, форматок для задания числовых или символьных значений входных данных, рекомендуемых вариантов технологических решений и результатов их выбора.

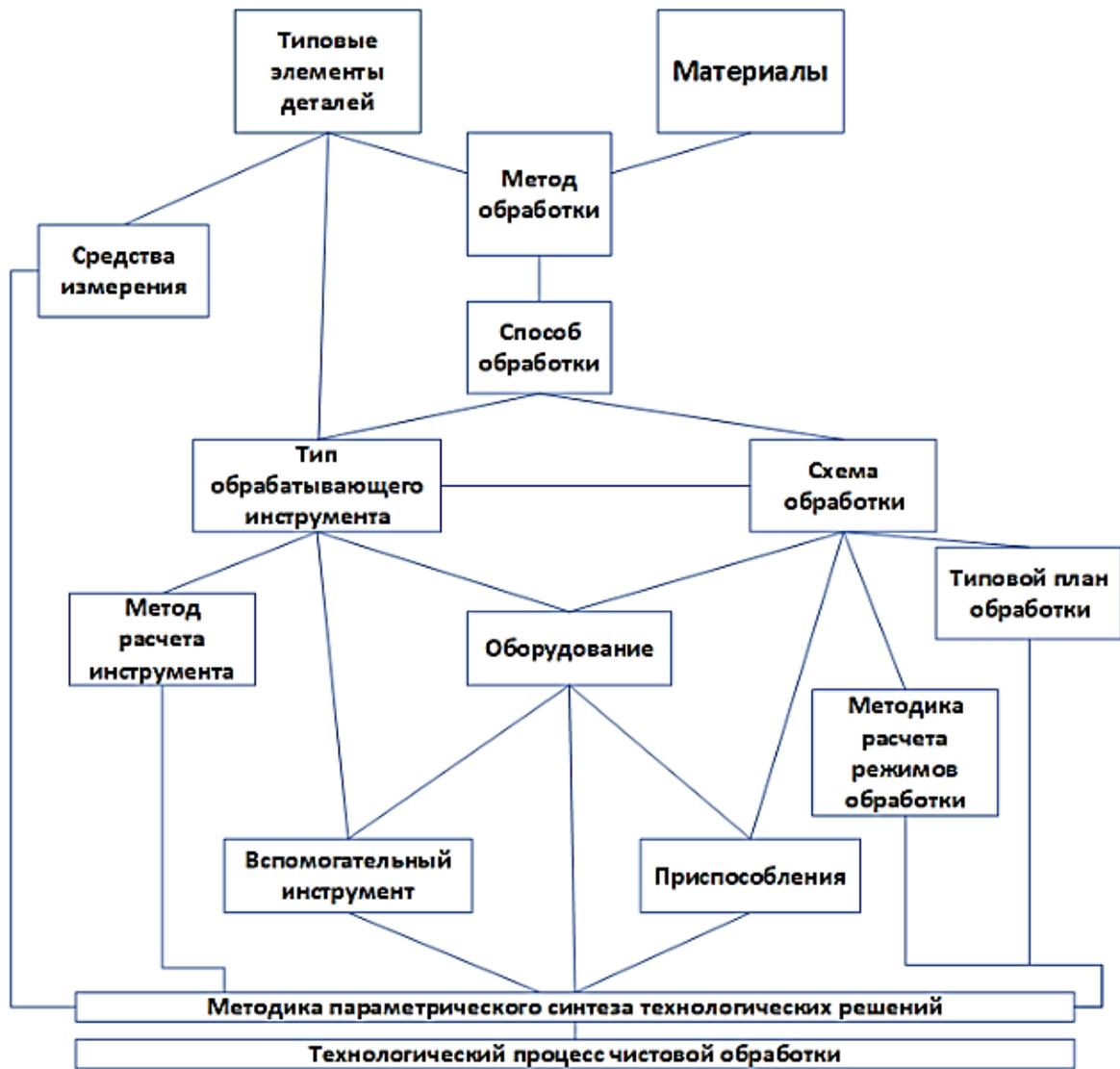


Рисунок 5.1 — Логическая схема данных электронного банка конструкторско-технологических решений

По отношению к элементам деталей и методам обработки множества конструкторско-технологических решений в структуре банка образуются инвариантные цепи: от типовых элементов инструкций деталей машин и совокупности обрабатываемых материалов через методы, способы и схемы чистовой обработки до конкретных наборов типовых планов обработки, моделей оборудования, конструкций технологической оснастки, методик расчета режимов обработки и обрабатываемого инструмента (рисунок 5.2).

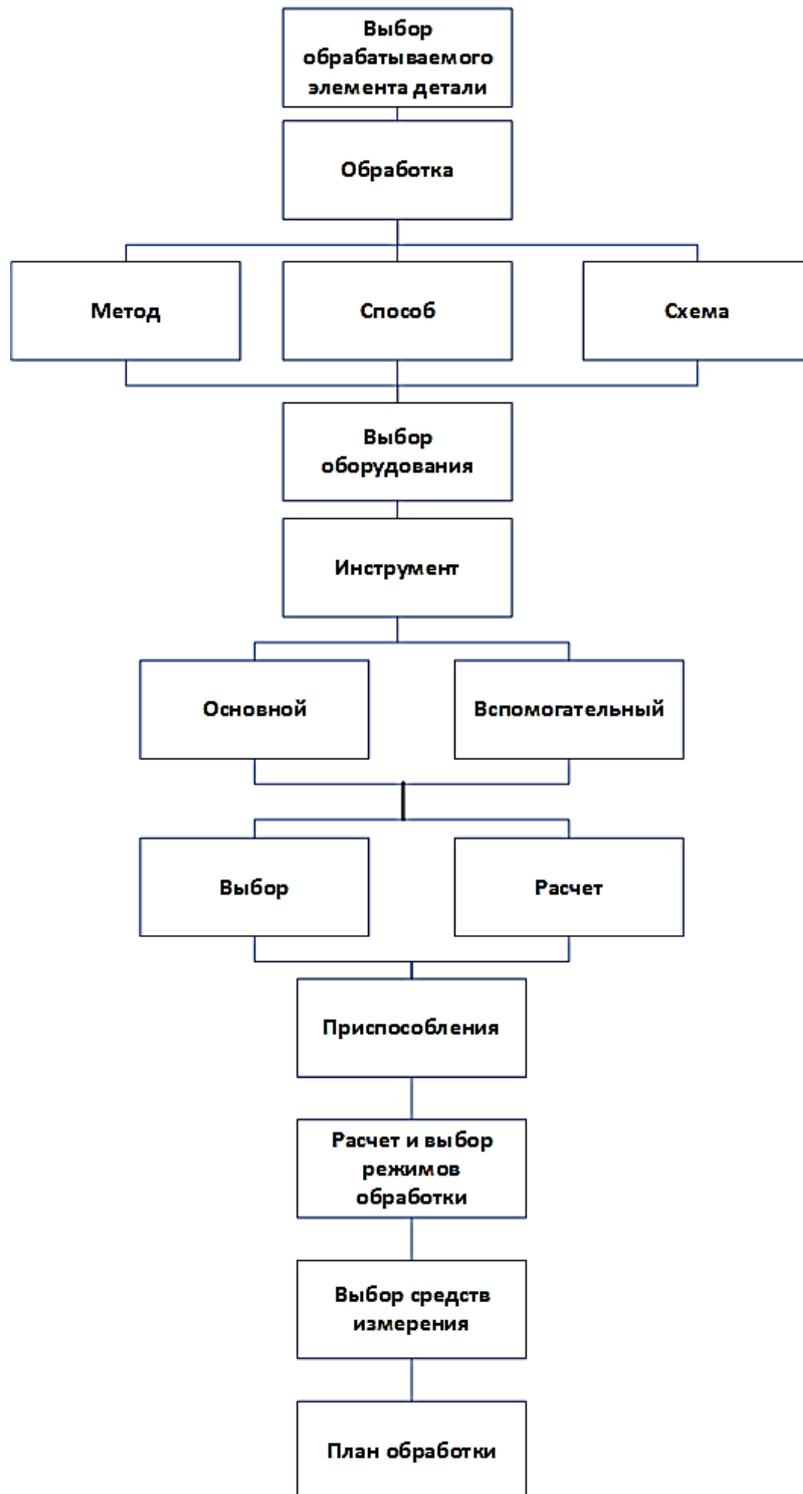


Рисунок 5.2 — Структура диалоговой среды конечного пользователя

Организация диалоговой среды на рисунок 5.2 обеспечивает управление процессом проектирования технологий, дает возможность поэтапного сжатия области поиска технологических решений путем отработки производственной технологичности за счет определения множества возможных решений, проверки

их на допустимость и выбора окончательных решений из числа допустимых. Таким образом при построении плана обработки осуществляется преобразование структуры конструктивных параметров обрабатываемой детали в структуру технологического процесса её изготовления.

Опыт показывает, что предложенный подход к созданию технологических банков данных и диалоговых сред пользователей обеспечивает возможность автоматизации проектирования большинства видов технологий чистовой обработки, в частности обработки резанием, что подтверждено созданием и промышленной эксплуатацией ряда систем автоматизированного проектирования технологических процессов изготовления наукоемких деталей машиностроения.

В ходе проведенных исследований установлен ряд перспективных способов чистовой обработки, одним из которых является комбинированная обработка внутренних поверхностей с анодным растворением припуска. Этот способ эффективен при обработке каналов различного профиля, в том числе с переменным сечением, как с прямолинейными, так и с криволинейными осями. Областью применения электрохимической и комбинированной обработки каналов являются детали редукторов, насосов, компрессоров, двигателей внутреннего сгорания, изделий энергетического машиностроения, авиационно-космической отрасли промышленности «[103]».

Способы электрохимической и комбинированной с анодным процессом обработки каналов реализуются различными схемами [126], которые отличаются друг от друга по конструкции применяемых электродов-инструментов и комбинациям относительных перемещений инструмента и заготовки. Рассматриваемой схеме комбинированной обработки соответствует следующий типовая план обработки:

1. Подготовительная стадия по схеме на рисунке 5.2 с выполнением операций:

- 1.1. Зачистка базовых поверхностей детали до металлического контакта для подвода тока при комбинированной обработке;

- 1.2 Контроль величины и места расположения припуска под обработку.

2. Операция по удалению припуска комбинированной обработкой.

2.1. Установить заготовку и после обработки снять;

2.2. Обработка заготовки.

3. Промывка объекта обработки.

4. Операция пассивации.

5. Контрольная операция.

Фрагмент структуры конструкторско-технологических решений для электрохимической и комбинированной обработки на примере изготовления наиболее простых, но широко используемых открытых и глухих круглых каналов с прямой осью, приведен на рисунке 5.3.



Рисунок 5.3 — Фрагмент построения структуры конструкторско-технологических решений

Логические схемы, приведенные в работе, в частности на рисунке 5.3 позволили разработать автоматизированные способы диагностики и управления процессами в машиностроении и расширить возможности комбинированных методов обработки на применение их в медицинской технике. Так с участием авторов предложены способы лечения парадонтоза, при которых введение лекарственных веществ осуществляется комбинированным воздействием анодного процесса и механического давления выработкой электрического тока за счет усилий сжатия зубов самого пациента без использования внешних источников энергии. Это позволило создать компактные приборы, обеспечивающие введение лечебных препаратов, например, в экспедициях «[103]».

Выводы по главе 5

1. В работе приведена разработанная структура банка конструкторско-технологических решений для комбинированных методов обработки обеспечивает комплексный подход, методическую, технологическую и информационную полноту информации при выборе, применении и технологическом обеспечении чистовых методов обработки при комбинации различных воздействий

2. Структура банка конструктивно-технологических решений инвариантна по отношению к большинству методов, в том числе комбинированных с применением электрических, лучевых методов чистовой обработки, и успешно используется при проектировании технологий в машиностроении и других отраслях техники.

3. Рассмотрены перспективы применения предложенных логических связей для автоматизации процессов и диагностики в медицинской технике, что существенно расширяет область использования комбинированных методов обработки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен новый подход к научному обоснованию выбора состава, условий использования и физических свойств рабочих сред по критерию полезности с возможностью мобильного управления их технологической эффективностью в комбинированных технологических процессах за счет внешних тепловых, гидравлических, механических, лучевых, импульсных, частотных, временных воздействий по сигналам обратной связи. Расширена содержательная часть принципа полезности в качестве основополагающего фактора количественной оценки уровня производственной технологичности, что позволило создать теоретические основы системы применения и выбора комбинированных методов обработки с постоянным и переменным состоянием агрегатного состояния рабочих сред, наиболее полно обеспечивающих заданные эксплуатационные параметры качества продукции. Применительно к отраслевому наукоемкому машиностроению новый подход на уровне технологических операций позволяет на 1-2 порядка снизить трудоемкость, затраты на выполнение работ по изготовлению узлов и деталей основного производства и технологической оснастки. Это достигается путем увеличения в несколько раз ресурса при замене металлообрабатывающего инструмента на безизносные схемы комбинированных процессов, сокращения загрузки имеющегося и необходимости приобретения (в основном зарубежного) специального оборудования, работающего с различными видами рабочих сред.

Для этого выполнено:

1. На базе принципа полезности по оценке и уровня производственной технологичности обоснованное назначение добавок к рабочим средам с учетом физико-технических характеристик обрабатываемых материалов и требуемых технологических характеристик изделий.
2. Разработана методология проектирования состава рабочих сред с управляемыми физическими свойствами по сигналам обратной связи,

получаемыми из зоны протекания процесса, и непрерывно регулируемые в диапазоне допустимых границ изменения параметра.

3. Установлены границы предельных изменений физических свойств рабочих сред для гарантированного обеспечения заданного качества деталей после обработки комбинированными методами с наложением внешних воздействий.

4. Показано, что путем регулирования теплового воздействия на рабочую среду от предварительного нагрева места обработки в пределах стабильного состояния агрегатного состояния среды возможно в несколько раз повысить производительность комбинированного метода обработки. Так при прошивке фасонных отверстий в фильтрах из жаропрочных сплавов в начале операции скорость подачи инструмента возрастает с 2-3 мм/мин при традиционной комбинированной обработке до 20-30 мм/мин, а за счет сокращения времени анодного процесса и подтравливания в 2-3 раза снизить погрешности по контуру и глубине канала, получить высоту микронеровностей менее $R_a=1,6-3,2$ мкм при допуске в регламентирующей документации - 6,3 мкм.

5. Установлено, что использование для импульсного магнито-импульсного воздействия локального нагрева позволяет управлять интенсификацией анодного процесса и достичь ускорения процесса до 10 раз на черновом этапе обработки, за счет чего на окончательной стадии комбинированной обработки снизить шероховатость и глубину измененного слоя до 4 раз при повышении других показателей качества изделий.

6. Предложен, изучен, уточнен и защищен патентом состав твердых рабочих сред, создана на уровне изобретений технология его использования при неподвижной сборке и переборке при ремонте сопрягаемых деталей с формированием зазоров, гарантирующих от повреждения мест их стыковки в изделии. При использовании твердых электролитов до 70% сокращается трудоемкость операции и в несколько раз энергоемкость операции.

7. Разработаны условия хранения, использования, восстановления эксплуатационных параметров и технологии комбинированных методов серийной обработки в рабочих средах с управляемыми физическими параметрами.

8. Обоснованы направления перспективных исследований в области комбинированных методов обработки с известными и вновь создаваемыми технологическими рабочими средами. Укрупненно эти перспективные исследования можно сформулировать:

- создание системы проектирования комбинированных методов обработки (КМО) с управлением процессом формообразования оптимизацией свойств и физических воздействий в едином технологическом комплексе [126;132];

- теоретические и прикладные исследования химмотологии для проектирования КМО с различными средами и учетом специфики отраслевого наукоемкого машиностроения [31;44;142;149];

- изучение состава и свойств рабочих сред при нанесении, обработке и эксплуатации покрытий [67;103;142];

- исследование области использования рабочих сред с изменяемыми постоянными и переменными характеристиками [11];

- проектирование КМО для применения в экстремальных условиях применения [67;79;103;137];

- создание технологических комплексов с адаптивной системой управления рабочими средами [97];

- аддитивные методы обработки с использованием рабочих сред с различными характеристиками [57;135].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аверченков В. И. Автоматизация проектирования технологических процессов: учебное пособие / В. И. Аверченков // Брянск : Брянский институт транспортного машиностроения, 1984. – 84 с. – EDN WBKPRT.
2. Авторское свидетельство № 513823 А1 СССР, МПК В23Р 1/04. Устройство для подачи электролита: № 2014369: заявл. 11.01.1974: опубл. 15.05.1976 / В. П. Смоленцев, И. М. Краснов, В. М. Борисов, В. М. Шишкин; заявитель Казанский химико-технологический институт имени С.М. Кирова. – EDN YEICES.
3. Авторское свидетельство № 755488. Электрод-инструмент / В. П. Смоленцев, А. А. Габагуев, З. Б. Садыков // 1980, Бюл. изобр. № 30.
4. Авторское свидетельство № 1016129 А1 СССР, МПК В23Р 1/10. Способ электроабразивной обработки в среде электролита: № 3318916: заявл. 17.07.1981: опубл. 07.05.1983 / В.П. Смоленцев, З. Б. Садыков, Ш. С. Гафиатуллин; заявитель Базовая лаборатория 104 научно-исследовательского технологического института. – EDN SZKNBQ.
5. Аддитивные технологии изготовления инструмента для комбинированных методов обработки / В. П. Смоленцев, Н. Н. Ненахов, А. А. Извеков, И. Г. Стародубцев // Научное издание «Научное обозрение». – 2022. – № 7(133). – С. 3-8. – DOI 10.30987/2223-4608-2022-1-7-3-8. – EDN TNBSVR.
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: НИАТ, 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. Болдырев А. А. Повышение точности базирования деталей реологическими средами с переменной плотностью / А. А. Болдырев, В. П. Смоленцев // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2013. – № 6(102). – С. 29-32. – EDN QAXYOR.

12. Бондарь А. В. Качество и надежность : научное издание / А. В. Бондарь ; А. В. Бондарь. // Москва : Машиностроение, 2007. – 308 с. – ISBN 978-5-94275-314-6. – EDN QMFKWJ.

13. Вайнер Л. Г. Технологическое управление абразивной обработкой на основе моделирования процессов формообразования / Л. Г. Вайнер // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2018. – № 2(212). – С. 7-10. – EDN YSSNPQ.

14. Воробей В. В. Теоретические основы проектирования технологических процессов ракетных двигателей. Технология производства жидкостных ракетных двигателей : учебник для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальности "Ракетные двигатели" направления подготовки "Двигатели летательных аппаратов" / В. В. Воробей, В. Е. Логинов ; В. В. Воробей, В. Е. Логинов. // Изд. 2-е, перераб. и доп.. – Москва : Дрофа, 2007. – (Авиация и космонавтика). – ISBN 978-5-358-01688-0. – EDN QNTPGF.

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 / К. М. Газизуллин // Воронеж: Воронежский государственный университет, 2002. - 243 с.

17. Гончаров А. И. Справочник по химии / А. И. Гончаров, М. Ю. Кириллов // Киев: Издательство «Вища школа». 1978. - 208 с.

18. Гусейнов Р. М., Кукоз Ф. И. Электронные процессы в твердых электролитах / Р. М. Гусейнов, Ф. И. Кукоз // Изд. Ростовского гос. университета, 1986. - 128 с.

19. 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.

20. Газизуллин К. М. Электрохимическая размерная обработка крупногабаритных деталей в пульсирующих рабочих средах: Научное издание // Воронеж: Воронежский государственный университет, 2002. - 243 с.

21. Гончаров А. И. Справочник по химии / А.И. Гончаров, М.Ю. Кириллов // Киев: Издательство «Вища.шк.», 1978. - 208 с.

22. Гусейнов Р. М., Кукоз Ф. И. Электронные процессы в твердых электролитах / Р. М. Гусейнов, Ф. И. Кукоз // Изд. Ростовского гос. университета, 1986. - 128 с.

23. Григорянц А. Г. Основы лазерной обработки материалов // М: Машиностроение, 1989.

24. Гурвич Р. А. Алмазно-электролитическая обработка твердосплавного волоочильного и холодновысадочного инструмента // Киев: Техника, 1992. - 142 с.

25. Евстигнеев М. И. Изготовление основных деталей и узлов авиадвигателей / М. И. Евстигнеев, И. А. Морозов, А. В. Подзей, А. М. Сулима, И. С. Цуканов // М.: Машиностроение, 1972. - 448 с.

26. 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. Изд. «Крым», 1991. - С.33-34.

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

28. Извеков, А. А. Пути повышения качества наукоемких изделий в различных рабочих средах комбинированными методами / А. А. Извеков // Справочник. Инженерный журнал. – 2025. - №4 (337). – С. 43-55.

29. Извеков А. А. Пути совершенствования качества наукоемких изделий комбинированными методами / А. А. Извеков, В. П. Смоленцев, О. Н. Кириллов // Наукоемкие технологии в машиностроении. – 2024. – № 9(159). – С. 14-24. – DOI 10.30987/2223-4608-2024-14-24. – EDN OWDLLG.

30. Расчет технологических параметров электрохимического маркирования деталей / Н. Б. Полухтин, Г. А. Сухочев, А. П. Печагин, А. А. Извеков // Современные технологии производства в машиностроении : Межвузовский сборник научных трудов. – Воронеж : Издательско-полиграфический центр "Научная книга", 2024. – С. 116-120. – EDN DIXMNX.

31. 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. – ISBN 5-7464-0587-6. – EDN QNSEUD.

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

33. Кириллов О. Н. Технология комбинированной обработки непрофилированным электродом / О. Н. Кириллов ; О. Н. Кириллов ; ГОУВПО "Воронежский гос. технический ун-т". – Воронеж : Воронежский гос. технический ун-т, 2010. – 254 с. – ISBN 978-5-7731-0272-4. – EDN OWFCCX.

34. 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(74). – С. 30-35. – EDN ZIOWSH.

35. Клоков В.В. Аналитическое исследование стационарного размерного электрохимического формообразования/ «Современная электротехнология в машиностроении», Сборник трудов ВНТК, Тула : ТГУ, 1997. - с.42-45.

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

37. 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.

39. Комбинированные импульсные термомеханические воздействия с применением электромагнитного поля и деформирующего инструмента / В.И.Бородавко и др. // В сб.тр. «Виброволновые процессы в технологии обработки деталей высокотехнологичных изделий» - Ростов на Дону: ДГТУ, 2017. - 240 с.

40. Комбинированные методы обработки : учебное пособие / В. П. Смоленцев, Е. В. Смоленцев, О. Н. Кириллов, А. В. Норман. – Воронеж : Издательско-полиграфический центр «Научная книга» , 2024. – 120 с. – ISBN 978-5-4446-1894-3. – EDN NJKFLT.

41. Коровин А. А. Изготовление теплообменных профилей для изделий, работающих с газожидкостными рабочими средами : специальность 05.02.07 "Технология и оборудование механической и физико-технической обработки", 05.02.08 "Технология машиностроения" : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Коровин Артем Александрович. – Воронеж, 2012. – 16 с. – EDN QIIZBV.

42. Коровин А. А. Эффективные методы получения каналов охлаждения на поверхностях деталей жидкостных ракетных двигателей / А. А. Коровин // Вестник Воронежского государственного технического университета, 2011. – Т. 7, № 11-2. – С. 29-31. – EDN OJPFID.

43. Кузовкин А. В. Выбор рабочих сред для обработки рассыпающимся катодом / А. В. Кузовкин, З. Б.Садыков, В. П. Смоленцев // Технологические проблемы производства летательных аппаратов и двигателей: Научно-техн.конф.Казань, 1991. - 91 с.

44. Лилин С. А. Научные и прикладные аспекты применения водно-органических водных растворов электролитов для анодной электрохимической обработки металлов и сплавов. Автореф. дис д-ра техн. наук. Тамбов, ТГУ, 2001.- 38 с.

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

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

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

48. Мельничук А. Ф. Формирование пористой структуры в изделиях на основе железа и титана с заданными физико-механическими и эксплуатационными свойствами : специальность 05.02.01 : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Мельничук Александр Федорович. – Комсомольск-на-Амуре, 2009. – 23 с. – EDN NKXGMP.

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

50. Андреев И. Н. Моделирование распределения тока при электрохимической обработке и нанесении покрытий с использованием подвесочной оснастки : учеб. пособие / И. Н. Андреев, Ж. В. Межевич, К. А. Зотеев ; И. Н. Андреев, Ж. В. Межевич, К. А. Зотеев ; Федеральное агентство по образованию, Гос. образовательное учреждение высш. проф. образования "Казанский гос. технологический ун-т". – Казань : Изд-во Казанского гос. технологического ун-та, 2006. – 122 с. – ISBN 5-7882-0311-2. – EDN QNBGZN.

51. Моргунов Ю. А. Электродные процессы в технологиях электрохимической обработки / Ю. А. Моргунов, Б. П. Саушкин, Н. В. Хомякова ; Под ред. Б.П. Саушкина. – Москва : Московский Политех, 2021. – 94 с. – ISBN 978-5-276-02618-3. – EDN HJGEPG.

52. Мордехай В. М. Технологические особенности контактных комбинированных электрофизических и электрохимических методов обработки // Вопросы авиационной науки и техники. Сб.научн.тр., 1990. - Вып.1 - С.24 - 29.

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

54. Нгуен М. Т. Повышение качества плоского шлифования деталей из высокопрочных коррозионно-стойких сталей высокопористыми нитридоборовыми кругами : специальность 05.02.08 "Технология машиностроения" : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Нгуен Мань Тием. – Иркутск, 2017. – 22 с. – EDN ZQEMSJ.

55. Наукоемкие технологии в машиностроении / Б. М. Базров, В. Ф. Безъязычный, Ю. С. Авраамов [и др.]. – Москва : Научно-техническое издательство "Машиностроение", 2012. – 528 с. – EDN PVWTZH.

56. 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.

57. 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.

58. Носенко В. А. Технология шлифования металлов / В. А. Носенко, С. В. Носенко // Старый Оскол : ООО «Тонкие наукоемкие технологии», 2013. – 616 с. – ISBN 978-5-94178-373-1. – EDN SMZGKD.

59. 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»

Материалы IV Международной научно-технической конференции - Чебоксары: ЧГУ им. И.Н. Ульянова, 2019. - С. 388 - 393.

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

61. Паничев Е. В. Комбинированная чистовая обработка переходных участков металлокерамических покрытий с диэлектрическими гранулами : специальность 05.02.07 "Технология и оборудование механической и физико-технической обработки" : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Паничев Евгений Владимирович, 2020. – 147 с. – EDN CNMFKP.

62. Паничев Е. В. Подготовка поверхности под нанесение жаростойкого покрытия / Е. В. Паничев, В. П. Смоленцев // Упрочняющие технологии и покрытия, 2019. – Т. 15, № 11(179). – С. 517-522. – EDN RJMDQL.

63. 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, 2020. – № 10(283). – С. 10-14. – DOI 10.14489/hb.2020.10.pp.010-014. – EDN HLZTJC.

64. Патент №119663 РФ. Имитатор для определения оптимальных технологических режимов при получении турбулизаторов в каналах охлаждения электрохимическим методом / В. П. Смоленцев, И. Т. Коптев, А. А. Коровин, Г. Н. Климова // 2012 Бюл. изобр. № 24.

65. Патент №135561 РФ. Высоконапорное устройство для подачи рабочей среды / В. П. Смоленцев, С. В. Сафонов, Г. П. Смоленцев // 2012. Бюл. изобр. № 35.

66. Патент №1797533 РФ Способ электрообработки вращающимся электродом-инструментом / В. П. Смоленцев, О. Н. Кириллов, С. В. Кретинин, Б. А. Голоденко // 1993 Бюл. изобр. № 7.

67. Патент № 2224827 РФ. Способ гальваномеханического восстановления токопроводящих деталей / С. Ю. Жачкин, В. П. Смоленцев и др. // Заявка 2002102130/02 от 23.01.2002. Опуб 27.02.2004. Бюл. №6

68. Патент №2257981 РФ. Способ электрохимической обработки / А. Р. Закирова, З. Б. Садыков, В. П. Смоленцев, К. М. Газизуллин // 2005. Бюл. изобр. № 22.

69. Патент №2261164 РФ. Способ очистки абразивной ленты на металлической основе и устройство для его реализации // В. П. Смоленцев, Г. П. Смоленцев, Г. М. Климова // 2005. Бюл. изобр. № 27.

70. Патент №2277163 РФ. Способ электрохимической обработки / В. Г. Грицюк, В. П. Смоленцев, А. Н. Некрасов, А. С. Ревин // 2006. Бюл. изобр. № 15.

71. Патент №2333821 РФ. Способ электрохимической размерной обработки и устройство для его реализации // В. П. Смоленцев, А. М. Гренькова, Е. В. Смоленцев, А. В. Перова // 2008. Бюл. изобр. № 26.

72. Пат. № 2405662 РФ, В23Н. Способ нанесения чугунного покрытия на деталь из алюминиевого сплава / Смоленцев В. П., Гребенщиков А. В., Перова А. В., Омигов Б. И. // Заявка № 2009116031 ; заявл. 27.4.2009 опубл. 10.12.2010 Бюл. № [34](#).

73. Патент №2466835 РФ. Способ эрозионно-технической обработки / С. Н. Коденцев, В. П. Смоленцев, Г. А. Сухочев, М. А. Уваров // Оpub. 20.11.2012. Бюл. №32.

74. Патент №2470749 РФ. Способ электрохимической обработки локальных участков и устройство для его использования / И. Т. Коптев, В. П. Смоленцев, А. А. Коровин и др. // 2012. Бюл. изобр. № 36.

75. Патент №2621511 РФ. Электрод для изготовления конфузорного участка в отверстии форсунки. / В. П. Смоленцев, С. В. Сафонов, Б. И. Омигов // 2017. Бюл. изобр. № 16.

76. Патент № 2625378 РФ. Способ групповой прошивки отверстий и устройство для его реализации / В. П. Смоленцев, А. В. Кузовкин, Ю. В. Шаров, В. В. Золотарев // 2017. Бюл. изобр. №20.

77. Патент №2656628 РФ. Способ подачи рабочей среды / В. П. Смоленцев, О. Н. Кириллов, А. Ю. Рязанцев // 2018. Бюл. изобр. №16.

78. Патент № 2693283 РФ, С23С 4/04, С23С 30/00, С23С 4/134. Способ получения эрозионно-стойких теплозащитных покрытий / А. И., Портных, Е. В Паничев // 2019. Бюл.изобр. № 19.

79. Патент №2778809 РФ В23Н. Способ гальваноконтактного восстановления металлических деталей и инструмент для выглаживания слоев гальванического покрытия / В. П. Смоленцев, Н. Н Ненахов, И. Г. Стародубцев // Заявка 2021116268 Принята к публикации 03 июня 2021. Оpub. 25.08.22. Бюл.изобр. №24.

80. Патент 2796389 РФ. Инструмент и способ комбинированной анодно-механической чистовой обработки теплозащитных многокомпонентных покрытий / М. В. Кондратьев, В. П. Смоленцев, А. А. Извеков, Т. В.Цымбал // 2022. Бюл.изобр. №15.

81. Патент 2809681 РФ, МПК В23Н. Электрод-инструмент и способ электроабразивной обработки полузакрытой полости детали / Н. Н Ненахов, В. П Смоленцев, О. Н. Кириллов, Д. Е.Крохин // Оpub 14.12.23. Бюл. №35.

82. Патент 2829178 РФ. Способ изготовления гибкого металлического корпуса детали / А. А.Извеков, В. П Смоленцев, А. Е. Малявин, И. Г. Стародубцев // Заявка 2023136218 от 29.12.2023. Оpubл.25.10.24. Бюл. № 30.

83. 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 // Воронеж, Воронежский государственный технический университет,1994. - 20 с.

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

85. Перова А. В. Формирование покрытий на алюминиевых сплавах методом электроэрозионного легирования / А. В. Перова, В. П. Смоленцев, А. Г. Грибанов // Авиакосмические технологии «АКТ-2008» - Воронеж : ВГТУ, 2008. - С.48-53.

86. Петров Ю. Н. 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.

87. 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.

88. Повышение качества деталей из легкоплавких материалов путем нанесения покрытий из чугуна / А. В. Норман, В. П. Смоленцев, А. В. Норман, М. В. Кондратьев // Вестник Воронежского государственного технического университета, 2023. – Т. 19, № 3. – С. 120-126. – DOI 10.36622/VSTU.2023.19.3.017. – EDN VCOKAU.

89. Портных А. И. Технология плазменного нанесения эрозионностойких термозащитных покрытий, обеспечивающих многоразовую эксплуатацию изделий : специальность 05.02.08 "Технология машиностроения" : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Портных Александр Иванович, 2019. – 176 с. – EDN LPNHHJ.

90. 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. – EDN LOTLHX.

91. Принцип действия электрохимического станка SFE [электронный ресурс] // Режим доступа: <http://www.stankofinexpo.ru>.

92. Проблемы гидродинамики и их математические модели / Лаврентьев М. А., Шабат Б. В. // Главная редакция физико-математической литературы изд-ва «Наука», 1973.

93. Ракошиц Г. С. Электроимпульсная штамповка // М: Высш.шк., 1984. - 192 с.

94. Рабинович Е. З. Гидравлика // М: Гос.издат. физ.-мат. л-ры, 1961. - 408 с.

95. Ребиндер П. А. Электрокинетические свойства капиллярных систем // М.: Машиностроение, 1956. – 264 с.
96. Саушкин Б. П. Выбор и применение электролитов для электрохимической обработки // М : ВНИИТЭМР, 1992. - 80 с.
97. Сафонов С. В. Технологическое обеспечение эксплуатационных характеристик изделий // Воронеж : Издательский дом ВГУ, 2015. - 232 с.
98. Саушкин Б. П. Наукоемкие технологии-основа технологического суверинитета страны / Сб.научн.тр. «Наукоемкие технологии в машиностроении и приборостроении» - Воронеж : Изд.ВГТУ, 1997. - С.7-23.
99. Седыкин Ф. В. Размерная электрохимическая обработка деталей машин // М:Машиностроение, 1975. - 301 с.
100. 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(176). – С. 369-374. – EDN BVZAPQ.
101. Аддитивные технологии изготовления инструмента для комбинированных методов обработки / В. П. Смоленцев, Н. Н. Ненахов, А. А. Извеков, И. Г. Стародубцев // Наукоемкие технологии в машиностроении, 2022. – № 7(133). – С. 3-8. – DOI 10.30987/2223-4608-2022-1-7-3-8. – EDN TNBSVR.
102. Смоленцев В. П. Комбинированные технологии изготовления деталей в твердых электролитах / В. П. Смоленцев, А. А. Извеков // Вестник Воронежского государственного технического университета, 2021. – Т. 17, № 6. – С. 107-110. – DOI 10.36622/VSTU.2021.17.6.015. – EDN PGBWVG.
103. Смоленцев В. П. 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. 188-192. – DOI 10.36622/1729-6501.2024.20.2.028. – EDN VDUOFJ.
104. 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(325). – С. 3-10. – DOI 10.14489/hb.2024.04.pp.003-010. – EDN XRVRWK.

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

106. Смоленцев В. П. Состояние и пути развития комбинированных методов обработки наукоемких изделий / В. П. Смоленцев, А. А. Извеков, И. Г. Стародубцев // Воронежский научно-технический Вестник, 2024. – Т. 4, № 4(50). – С. 20-30. – DOI 10.34220/2311-8873-2024-20-30. – EDN GATUMB.

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

108. Смоленцев В. П. Комбинированная прошивка глубоких каналов переменного сечения / В. П. Смоленцев, А. А. Широкожухова, Н. С. Поташникова // Справочник. Инженерный журнал, 2020. – № 8(281). – С. 10-13. – DOI 10.14489/hb.2020.08.pp.010-013. – EDN UNHNMС.

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

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

111. 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. – № 2-2(292). – С. 49-56. – EDN PUIVPF.

112. Смоленцев В. П. Управление системами и процессами : учебник для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки "Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств" / В. П. Смоленцев ; В. П. Смоленцев, В. П. Мельников, А. Г. Схиртладзе, под ред. В. П. Мельникова. – Москва : Академия, 2010. – (Учебник). – ISBN 978-5-7695-5732-3. – EDN QMUZZV.

113. Смоленцев В. П. Теория электрических и физико-химических методов обработки. В 2 ч. Ч. I: Обработка материалов с применением инструмента: учеб. пособие / В. П. Смоленцев, А. И. Болдырев, Е. В. Смоленцев и др. // Воронеж: ВГТУ, 2008 - 208 с.

114. 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.

115. 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.

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

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

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

119. Смоленцев В. П. Технология электрохимической обработки внутренних поверхностей // М., «Машиностроение», 1978 - 176 с.

120. 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.

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

122. Смоленцев В. П. 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.

123. Смоленцев В. П. Поддержание качества поверхностного слоя изделий в процессе их очистки от загрязнений / В. П. Смоленцев, С. В. Сафонов, В. И. Котуков // Научные технологии в машиностроении, 2014. - № 7 - С.21-23.

124. Смоленцев В. П. Качество поверхности после электроэрозионной и комбинированной обработки / В. П. Смоленцев, Н. П. Переладов // «Электронная обработка материалов», 1993. - № 6 - С.13-15.

125. Смоленцев Г. П. Теория электрохимической обработки в нестационарном режиме / Г. П. Смоленцев, И. Т. Коптев, В. П. Смоленцев // Воронеж. гос. техн. ун-т, 2000. - 104 с.

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

127. Современная электротехнология в машиностроении. Сб.тр. международной н-т конференции.- Тула : ТГУ, 2002. - 471 с.

128. Справочник по расчетам гидравлических и вентиляционных систем / Под ред. А. С. Юрьева // С.-Пб. : АНО НПО «Мир и семья», 2001. - 154 с.

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

130. Справочник металлиста. В 5 т.Т.1. / Под ред. С. А. Чернавского, В. Ф. Рещикова // М: Машиностроение, 1976. - 768 с.

131. Справочник технолога-машиностроителя. В 2 т.Т.2. / Под ред. А. С. Васильева, А. А. Кутина // М : «Инновационное машиностроение», 2018. - 818 с.

132. Справочник технолога / Под ред. А. Г. Сулова // М : «Инновационное машиностроение», 2019. - 800 с.

133. 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.

134. Сурьев А. А. Повышение качества поверхностного слоя деталей за счет совершенствования процесса комбинированного электроалмазного шлифования // Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Брянск : БГТУ, 2008. - 20 с.

135. Суслов А. Г. Технологическое обеспечение и повышение эксплуатационных свойств деталей и их соединений / А. Г. Суслов, В. П. Федоров, О. А. Горленко и др. // М.: Машиностроение, 2006. – 448 с.

136. Суслов А. Г. Проектирование функционально ориентированных технологических процессов / А. Г. Суслов, О. Н. Федонин, Д. М. Медведев // Вестник машиностроения, 2019. - № 9 - С.66-91.

137. Сухочев Г. А. Управление качеством изделий, работающих в экстремальных условиях при нестационарных воздействиях // М.: Машиностроение, 2004. - 287 с.

138. Теоретические основы проектирования технологических комплексов / А. М. Русецкий и др.; под. общ. ред. А.М. Русецкого // Минск: Беларус. Навука, 2012. – 239 с.

139. 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.

140. Усов С. В. Оценка эффективности при внедрении высоких наукоемких технологий / С. В. Усов, Д. С. Свириденко, А. А. Болдырев, С. В. Ковалев, А. В. Мандрыкин // Вестник Воронежского государственного технического университета, 2012. - Том 8, №7.1– С.87 – 91.

141. 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. - том 8, №5 – С.138 – 141.

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

143. Цветков Б. В. Повышение производительности алмазного глубинного шлифования монолитного твердосплавного инструмента // Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. - Рыбинск: РГАТУ им. П.А. Соловьева - 16 с.

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

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

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

147. 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.

148. 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.

149. 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.

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

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

152. 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.

153. 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.

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

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

156. Protection of Medical Instruments from Infection with Protective Nanocoating's / Vladislav Smolentsev, Andrei Mandrykin and Natalia Potashnikova // Determinations Nanomed Nanotechnol, 2019. -1(2) - DNN.000509. 2019.

157. Skrygin Oleg Vladislav Smolentsev and Anton Schednov [The Mass Transfer Intensification of Combined Treatment Products](#) / Oleg (Skrygin ,Vladislav Smolentsev and Anton Schednov // MATEC Web of ConferencesVolume 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>.

158. Smolentsev V., Izverov A., Nenahov N / Performance Characteristics of Coatings for Medical Instruments and Equipment // Pharmaceutical Sciences & Analytical Research Journal, 2023. - Volume 3, Issue 1.

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

160. Smolentsev V., Izverov A., Starodubtsev I Production of sheet blanks without stamping using disposable templates // Pharmaceutical Sciences & Analytical Research, 2024. - Volume 3 Issue 1.

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

162. Wege zur Leistungssteigerung bei den elektrischadtragenden Bearbeitungsverfahren. Diskussionsbeiträge // Industrie-Anzeiger, 1971, - Jg. 93, Nr. 60. - S. 1574.

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

164. Alexandr Izvekov, Vladislav Smolentsev, Nikolai Nenakhov, Igori Starodubtsev, The field of use of additive technologies // Journal of Clinical Review J.Clin Cast Rep, 2022. - Vol.7, Issue8 - P.103.

ПРИЛОЖЕНИЕ А. Акты внедрения и испытаний

УТВЕРЖДАЮ

Главный инженер АО КБХА, к.т.н.

С.С. Юхевич

« 21 » 01

2025 г.

М. П.

**АКТ ВНЕДРЕНИЯ**

Результатов использования патента №2829178 (Бюллетень №30, 2024 год) «Способ изготовления и разделения сборочных элементов детали с гибким металлическим корпусом» (Авторы: Е.А. Малявин, В.П. Смоленцев, А.А. Извеков, И.Г. Стародубцев)».

Комиссия в составе: научного руководителя аспиранта, д.т.н., профессора ВГТУ Смоленцева В.П., специалиста ЦЗЛ АО КБХА (г. Воронеж), аспиранта ВГТУ Извекова А.А., заместителя директора АО КБХА по стратегическому развитию и управлению программами ракетных двигателей, к.т.н. Стародубцева И.Г., аспиранта ВГТУ Малявина Е.А., заместителя начальника цеха №732, к.т.н. Сокольников В.Н. рассмотрела представленный материал по патенту №2829178 и результаты его применения на участке электрофизических методов обработки (участок №6) цеха механосборочного №732 АО КБХА.

При изготовлении деталей малой жесткости использовался станок типа 4Л721Ф1-02 для электрических методов обработки (электроэрозионный копировально-прошивочный станок), работающий с жидкой рабочей средой при переменной вязкости с изменяющимся агрегатным состоянием.

Комиссия приняла решение:

1. Считать срок начала использования материалов патента на участке №6 цеха №732 – 2022 год.
2. Отметить, что при подготовке предложенного способа к обработке на электроэрозионном станке с комбинированной системой формообразования деталей использовалась опубликованная информация о

применении твердых покрытий, позволяющих ускорить сборку элементов деталей малой жесткости и их разделение при использовании рабочих сред по патенту №2829178 на деталях типа штоков запорной арматуры, мембран переменного сечения.

3. Патент №2829178 включает предложенный авторами способ изготовления, сборки и переборки элементов деталей, имеющих ограниченную жесткость, комбинированными способами с наложением электрических и магнитных полей и с управлением агрегатным состоянием рабочих сред на станках для электрических методов обработки, обеспечивающих сборку и разборку агрегатов без нарушения качества продукции наукоемких изделий.

4. По сведениям, полученным от Заказчиков продукции (ПАО «Газпром», АО «Арктикгаз») с использованием способа по патенту, удалось повысить жесткость технологической оснастки, производительность операций сборки-разборки конструкций при обработке комбинированными методами на оборудовании для операций с наложением тока и полей, обеспечить высокое качество продукции всей партии выпускаемых изделий, получить годовой экономический эффект на программу 787,3 тысячи рублей.

По состоянию на 2025 год акт внедрения подтверждает эффективность полученного патента и полезность выполненной авторами работы.

Подписи:

Научный руководитель,
д.т.н., профессор ВГТУ



В.П. Смоленцев

От АО КБХА:



А.А. Извеков

И.Г. Стародубцев

В.Н. Сокольников

Е.А. Малявин

Аспирант ВГТУ

Утверждаю:

Главный металлург
А.С. Урибанов
05.04.2018

Акт проведенных работ

Для проверки влияния воздействия токами высокой частоты (ТВЧ) на сварные цилиндрические образцы из разных материалов проведены работы на установке ЛЗ-107, имеющей рабочую частоту 60-70кГц. Для минимального нагрева в момент воздействия подбирались параметры тока и напряжения анода, тока сетки.

Ток анода был снижен до минимума и при включении установки составлял 2,5-3 А, что обеспечило нагрев до $T < 150^{\circ}\text{C}$, напряжение анода составило 5 кВ, ток сетки - 0 А.

Воздействие токами высокой частоты проводилось циклами, длительность воздействия 1 сек, с интервалами между ними 2 сек. Данные по марке материала и количеству импульсов приведены в таблице.

Марка материала	Номер образца	Кол-во импульсов
30ХГСА	3-4	2
	0-5	4
	1-2	6
ЭП-410	3-4	2
	0-5	4
	1-2	6
чугун	0-1	2
	04.01.11	4
	5-8	6

Начальник цеха

С.Н. Гаврилов

Начальник ТБ

Л.Д. Кобзева

Копия верка
инженер ОК [подпись]

УТВЕРЖДАЮ:
Главный сварщик

Дортных А. П.
« 30 » 01.2019

ТЕХНИЧЕСКАЯ СПРАВКА № 153-11-81- *44*.

Для проведения последующих исследований были сварены 3 вида контрольных образцов способом ручной аргодуговой сварки в инертном газе (аргон ГОСТ10157-79) не плавящимся электродом (вольфрам лантанированным ТУ48-19-27-88 Ф3,0мм)

1. Основной материал — чугун.- Проволока Св-08Г2С ГОСТ2246-70 Ф1,6мм
2. Основной материал 30ХГСА.- Проволока Св-08Г2С ГОСТ 2246-70 Ф1,6мм
3. Основной материал ЭП410- Проволока Св- 06Х15Н60М15 ГОСТ 2246-70 Ф1,6мм.

При внешнем осмотре после сварки не допустимых дефектов не обнаружено.

Зам. начальника цеха 32

А. П. Печанин

Ведущий Инженер-технолог

Шуваева

Л. П. Шуваева

Юлия Верна



Инспектор ОК Шуваева

УТВЕРЖДАЮ:
Главный сварщик

Корни Корниных А. П.
« 4 » 02. 2019

ТЕХНИЧЕСКАЯ СПРАВКА № 153-11-81- *44*.

Для проведения последующих исследований были сварены 3 вида контрольных образцов способом ручной аргодуговой сварки в инертном газе (аргон ГОСТ10157-79) не плавящимся электродом (вольфрам лантанированным ТУ48-19-27-88 Ф3,0мм)

1. Основной материал — чугун.- Проволока Св-08Г2С ГОСТ2246-70 Ф1,6мм
2. Основной материал 30ХГСА.- Проволока Св-08Г2С ГОСТ 2246-70 Ф1,6мм
3. Основной материал ЭП410- Проволока Св- 06Х15Н60М15 ГОСТ 2246-70 Ф1,6мм.

При внешнем осмотре после сварки не допустимых дефектов не обнаружено.

Зам. начальника цеха 32

А. П. Печанин

Ведущий Инженер-технолог

Шуваева

Л. П. Шуваева

Юлия Верна



Инспектор ОК Анто

ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Управляющие программы

1. Программа построения множества решений задачи термоэластостатики с учетом действия массовых сил:

Фрагмент исходного текста программы Листов 06 Авторы: Иванов Д.А. и др. © Липецк 2024 г.

```
pribl = Input@" SetDirectory@dINPUTD; 88a1,1, a1,2, a1,3<< =
Get@"ElasticParameters.x"D; mantissa = 100; SetDirectory@dWORKD; 8μ1, μ2< =
Get@"ComplexParameters.x"D; garmP = 80, 0, 8<<; If
@ToString@FileType@"GarmonPolinom Bas.x"DD "File",
HDeleteFile@"GarmonPolinom Bas.x"D; Save@"GarmonPolinom Bas.x", garmPDL,
Save@"GarmonPolinom Bas.x", garmPDD; Print@"В базисе содержится: "D;
Print@"– количество гармонических многочленов: ", NPolinD; Print@"– порядок
гармонических многочленов: ", OpolD; Print@D; Opol = Input@ "Введите
наибольший порядок гармонических многочленов: 0 – базис не меняется"D; NPolin
= 4 Opol; BasZ1 = Array@Null, NPolinD; Do@Hk = Hi - 1L * 4 + j; Which@j 1, p =
z1 ^-i, j 2, p = z1^-i, j 3, p = z1 ^i, j 4, p = z1^ iD; BasZ1PkT = pL, 8i, 1, Opol<;
PrintA"В базисе гармонических многочленов содержится элементов: ", garmPP1TE;
PrintA"Максимальный порядок гармонических многочленов: ", garmPP2TE; oOpol
= garmP@@2DD; BasZ1 = garmP@@3DD; BasZ2 = garmP@@4DD; oOpRab =
Input@"Введите рабочий порядок гармонических многочленов"D; IfBoOpRab >
oOpol, PrintB"ПРЕВЫШЕНИЕ ЗАРЕЗЕРВИРОВАННОГО ПОРЯДКА!"F,
Print@"Рабочий порядок гармонических многочленов: ", oOpRabDF; NPolinRab = 2
oOpRab; SostRab = 2 NPolinRab; H* Базис гармонических векторов *L F@i_, j_D =
0; garm = Array@F, 8SostRab, 2<; M, 8i, 1, SostRab<; SetDirectory@dWORKD; If
@ToString@FileType@"BasicKSI.x"DD "File", HDeleteFile@"BasicKSI.x"D;
Save@"BasicKSI.x", ksiBASDL, Save@"BasicKSI.x", ksiBASDD; Clear@ksiBASD; 2
Текст программы.nb H* ТЕСТЫ *L H* 1.Уравнения равновесия в напряжениях *L
rRU = Array@Null, 8SostRab, 2< = Sij@@nDD; rRU@@n, 1DD =
ExpandDenominator@Together@∂X SXX + ∂Y SXYDD; rRU@@n, 2DD =
ExpandDenominator@Together@∂X SXY + ∂Y SYDDLD; Print@rRUD; H*
```

2. Уравнения совместности деформаций *L def = Array@Null, SostRabD;
 Print@"Уравнения совместности деформаций: "D; 8EXX, EYY, EXY < =
 Sij@@nDD; ForAn = 1, n ≤ SostRab, n++, I defPnT =
 ChopAExpandDenominatorATogetherAδy,y EXX + δx,x EYY - 2 δx,y EXYEE EME;
 N@defD Н* 3. Закон Гука в случае анизотропной плоской деформации *L zg =
 Array@Null, 8SostRab, 3 < = Sij@@nDD; zg@@n, 1DD = Eij@@n, 1DD
 Expand@a1,1 SXX + a1,2 SY Y + a1,3 SXYD; zg@@n, 2DD = Eij@@n, 2DD ==
 Expand@a1,2 SXX + a2,2 SY Y + a2,3 SXYD; zg@@n, 3DD = Eij@@n, 3DD ==
 Expand@Ha1,3 SXX + a2,3 SY Y + a3,3 SXYL ê 2DL D; Print@N@Chop@zgDDD;
 Н* Просмотр компонент упругого поля *L Print@"Базисный набор векторов
 перемещений:"D; N@Chop@UDD êê MatrixForm Print@"Базисный набор тензоров
 напряжений:"D; N@Chop@SijDD êê MatrixForm Print@"Базисный набор тензоров
 деформаций:"D; N@Chop@EijDD êê MatrixForm

2. Программа построения множества упругих состояний в задаче кручения трансформного тела:

Фрагмент исходного текста программы Авторы: Иванычев Д.А., Малявин Е.А. и др. © Липецк 2023 г. * 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 пространств 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"

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 $\gamma_1 + y$; $\Psi_2 = \partial \xi_2 \phi_2 \hat{e} \xi_2 \rightarrow z \hat{e} \gamma_2 + y$; $\Psi_3 = \partial \xi_3 \phi_3 \hat{e} \xi_3 \rightarrow z \hat{e} \gamma_3 + y$; H* Базис векторов перемещений *L uxP = ComplexExpand@Re@p1 H $\phi_1 \hat{e} \xi_1 \rightarrow z \hat{e} \gamma_1 + y$ L + p2 H $\phi_2 \hat{e} \xi_2 \rightarrow z \hat{e} \gamma_2 + y$ LDD; uyP = ComplexExpand@Re@ q1 H $\phi_1 \hat{e} \xi_1 \rightarrow z \hat{e} \gamma_1 + y$ L + q2 H $\phi_2 \hat{e} \xi_2 \rightarrow z \hat{e} \gamma_2 + y$ LDD; u η P = ComplexExpand@-Re@ q3 H $\phi_3 \hat{e} \xi_3 \rightarrow z \hat{e} \gamma_3 + y$ LDD; a = 2 Ceiling@i ê 6D; b = 0; ux n = ExpandB, n=b a HuxP Cos@n ω D + uxP Sin@n ω D L F; uy n = ExpandB, n=b a HuyP Cos@n ω D + uyP Sin@n ω D L F; u η n = ExpandB, n=b a H-u η P Sin@n ω D + u η P Cos@n ω D L F; w = Expand@1 ê H2 π L Integrate@ux n ê. y \rightarrow r Cos@ ω - fiD, 8 ω , 0, 2 π r Cos@ ω - fiD, 8 ω , 0, 2 π r Cos@ ω - fiD, 8 ω , 0, 2 π <; ksiBAS@@@2DD = Append@ksiBAS@@2DD, UD; H* Базис тензоров деформаций *L Err = Expand@ ∂r uD; E $\theta\theta$ = Expand@1 ê r * ∂fi v + u ê rD; Ezz = Expand@ ∂z wD; Ezr = Expand@H ∂r w + ∂z uL ê 2D; Er θ = Expand@H1 ê r * ∂fi u + ∂r v - v ê rL ê 2D; Ez θ = Expand@H ∂z v + 1 ê r * ∂fi wL ê 2D; Eij = 8Err, E $\theta\theta$, Ezz, Er θ , Ezr, Ez θ <; ksiBAS@@@3DD = Append@ksiBAS@@3DD, EijD; H* Базис тензоров напряжений *L 2 Текст программы.nb SxP = ComplexExpand@-Re@ $\gamma_1^2 \Psi_1 + \gamma_2^2 \Psi_2$ DD; SyP = ComplexExpand@Re@ $\Psi_1 + \Psi_2$ DD; SxyP = ComplexExpand@-Re@ $\gamma_1 \Psi_1 + \gamma_2 \Psi_2$ DD; S η P = Expand@vr SyP + vz er ê ez SxPD; Sx η P = ComplexExpand@Re@ $\gamma_3 \Psi_3$ DD; Sy η P = ComplexExpand@-Re@ Ψ_3 DD; Sx n = ExpandB, n=b a HSxP Cos@n ω D + SxP Sin@n ω D L F; Sy n = ExpandB, n=b a HSyP Cos@n ω D + SyP Sin@n ω D L F;

$zG_{Pn,4T} = Chop@TrigToExp@Er\theta D \quad TrigToExp@1 \hat{=} H2 \quad grL \quad Sr\theta DD;$ $zG_{Pn,5T} = Chop@TrigToExp@EzrD \quad TrigToExp@1 \hat{=} H2 \quad gzL \quad SzrDD;$ $zG_{Pn,6T} = Chop@TrigToExp@Ez\theta D \quad TrigToExp@1 \hat{=} H2 \quad gzL \quad Sz\theta DD \quad LD;$ $N@Chop@zGDD$
 Н*Просмотр множества частных решений*L Print@"Базисный набор векторов перемещений:"D; $N@Chop@ksiBAS@@@2DDDD \hat{=} MatrixForm$ Print@"Базисный набор тензоров напряжений:"D; $N@Chop@ksiBAS@@@4DDDD \hat{=} MatrixForm$ Print@"Базисный набор тензоров деформаций:"D; $N@Chop@ksiBAS@@@3DDDD \hat{=} MatrixFo$

3. Программа построения упругих полей для анизотропной плоской многосвязной области Фрагмент исходного текста программы Авторы: Подболотов А.Ю., Малявин Е.А., Иванычев Д.А ©:

```

SetDirectory@dINPUTD; 88a1,1, a1,2, a1,3<< = Get@"ElasticParameters.x"D;
mantissa = 100; SetDirectory@dWORKD; 8μ1, μ2< = Get@"ComplexParameters.x"D;
garmP = 80, 0, 8<<; If @ToString@FileType@"GarmonPolinom Bas.x"DD "File",
HDeleteFile@"GarmonPolinom Bas.x"D; Save@"GarmonPolinom Bas.x", garmPDL,
Save@"GarmonPolinom Bas.x", garmPDD; Print@"В базисе содержится: "D;
Print@"– количество гармонических многочленов: ", NPolinD; Print@"– порядок
гармонических многочленов: ", OpolD; Print@D; Opol = Input@ "Введите
наибольший порядок гармонических многочленов: 0 – базис не меняется"D; NPolin
= 4 Opol; BasZ1 = Array@Null, NPolinD; Do@Hk = Hi - 1L * 4 + j; Which@j 1, p =
z1 ^-i, j 2, p = z1^-i, j 3, p = z1 ^i, j 4, p = z1^ iD; BasZ1PkT = pL, 8i, 1, Opol<;
PrintA"В базисе гармонических многочленов содержится элементов: ", garmPP1TE;
PrintA"Максимальный порядок гармонических многочленов: ", garmPP2TE; oOpol
= garmP@@@2DD; BasZ1 = garmP@@@3DD; BasZ2 = garmP@@@4DD; oOpRab =
Input@"Введите рабочий порядок гармонических многочленов"D; IfBoOpRab >
oOpol, PrintB"Превышение зарезервированного порядка!"F, Print@"Рабочий
порядок гармонических многочленов: ", oOpRabDF; NPolinRab = 2 oOpRab;
SostRab = 2 NPolinRab; Н* Базис гармонических векторов *L F@i_, j_D = 0; garm =
Array@F, 8SostRab, 2<; M, 8i, 1, SostRab<; SetDirectory@dWORKD; If

```

@ToString@FileType@"BasicKSI.x"DD "File", HDeleteFile@"BasicKSI.x"D;
Save@"BasicKSI.x", ksiBASDL, Save@"BasicKSI.x", ksiBASDD; Clear@ksiBASD;

4. Программа расчета комплексных параметров анизотропной среды

Фрагмент исходного текста программы Авторы: Иванов Д.А. Подболотов А.Ю. Малявин Е.А. © Липецк 2022 г.:

Н* Технические параметры среды *L Н* Структура записи:
 mechPAR=88a_{1,1},a_{1,2},a_{1,3},a_{1,4},a_{1,5},a_{1,6}<,8a_{1,2},a_{2,2},...a_{2,6}<,...8a_{1,3},a_{2,3},...a_{6,6}<< – набор упругих коэффициентов;
 prmechPAR=88β_{1,1},β_{1,2},β_{1,3},β_{1,4},β_{1,5},β_{1,6}<,8β_{1,2},β_{2,2},...β_{2,6}< – набор приведенных упругих постоянных;
 uprPAR=8e₁,e₂,e₃,g_{1,2},...,η_{1,2,3},alf< – набор упругих постоянных и угол поворота.
 *L e₁ = Input@"Введите значение модуля Юнга в направлении оси x"D; e₂ = Input@"Введите значение модуля Юнга в направлении оси y"D; e₃ = Input@"Введите значение модуля Юнга в направлении оси z"D; g_{1,2} = Input@"Введите значение модуля сдвига в плоскости xy"D; g_{1,3} = Input@"Введите значение модуля сдвига в плоскости xz"D; g_{2,3} = Input@"Введите значение модуля сдвига в плоскости yz"D; μ_{1,2} = Input@"Введите значение коэффициента Пуассона для координатных осей xy"D; μ_{1,3} = Input@"Введите значение коэффициента Пуассона для координатных осей xz"D; μ_{2,3} = Input@"Введите значение коэффициента Пуассона для координатных осей yz"D; ν_{3,1,2,3} = Input@"Введите значение коэффициента Ченцова для плоскостей xz и yz"D; ν_{3,1,1,2} = Input@"Введите значение коэффициента Ченцова для плоскостей xz и xy"D; ν_{3,2,1,2} = Input@"Введите значение коэффициента Ченцова для плоскостей zy и xy"D; η_{2,3,1} = Input@"Введите значение коэффициента взаимного влияния для плоскости yz и оси x"D; η_{3,1,1} = Input@"Введите значение коэффициента взаимного влияния для плоскости zx и оси x"D; η_{1,2,1} = Input@"Введите значение коэффициента взаимного влияния для плоскости xy и оси x"D; η_{2,3,2} = Input@"Введите значение коэффициента взаимного влияния для плоскости yz и оси y"D; η_{3,1,2} = Input@"Введите значение коэффициента

взаимного влияния для плоскости zx и оси y "D; $\eta_{1,2,2} = \text{Input@}$ "Введите значение коэффициента взаимного влияния для плоскости xy и оси y "D; $\eta_{2,3,3} = \text{Input@}$ "Введите значение коэффициента взаимного влияния для плоскости yz и оси z "D; $\eta_{3,1,3} = \text{Input@}$ "Введите значение коэффициента взаимного влияния для плоскости zx и оси z "D; $\eta_{1,2,3} = \text{Input@}$ "Введите значение коэффициента взаимного влияния для плоскости xy и оси z "D; $\text{alf} = \text{Input@}$ "Введите значение угла поворота осей x и y "D; $\text{mantissa} = \text{Input@}$ "Введите значение мантиссы"D ;; $\text{const} = \text{N@Rationalize@}$ $8.81 \hat{e} e_1, -\mu_{1,2} \hat{e} e_2, -\mu_{1,3} \hat{e} e_3, \eta_{2,3,1} \hat{e} e_1, \eta_{3,1,1} \hat{e} e_1, \eta_{1,2,1} \hat{e} e_1 <<<$; $\text{ForBi} = 0, i \leq 5, i++ \text{BForBj} = 0, j \leq 5, j++ \text{Bai}, j = , m=1 \ 6 , n=1 \ 6 \ \text{Hconst@} @m, n \ \text{DD} * \ \text{tab@} @i, \ m \ \text{DD} * \ \text{tab@} @j, \ n \ \text{DDL} \ \text{FFFF}; \ \text{Off@N::}$ "meprec"D; $\text{DoAINARationalizeAI}$ $\beta_{i,j} = a_{i,j} - a_{i,3} a_{j,3} \hat{e} a_{3,3} \text{ME}, \ \text{mantissaEM}, \ 8i, \ 1, \ 6 <<<<$; H* Комплексные параметры среды $*L \ \text{H*}$ Структура записи: $\text{complPar} = 8\mu_{1,2,3}, \lambda_{1,2,3} < *L \ \text{har} = \text{H}\beta_{1,1} \mu^4 - 2\beta_{1,6} \mu^3 + \text{H}2\beta_{1,2} + \beta_{6,6}L \mu^2 - 2\beta_{2,6} \mu + \beta_{2,2}L * \text{H}\beta_{5,5} \mu^2 - 2\beta_{4,5} \mu + \beta_{4,4}L - \text{H}\beta_{1,5} \mu^3 - \text{H}\beta_{1,4} + \beta_{5,6}L \mu^2 + \text{H}\beta_{2,5} + \beta_{4,6}L \mu - \beta_{2,4}L^2$ 0; Off@NSolve:: "precw"D; $\text{korn} = \text{NSolve@har}, \mu, \ \text{WorkingPrecision} \rightarrow \text{mantissaD}$; $\text{HFor@} i = 1, i \leq 6, i++, \ \text{If@Im@}\mu \hat{e}. \ \text{korn@} @i \ \text{DDD} > 0, \ \mu_1 = \mu \hat{e}. \ \text{korn@} @i \ \text{DD}$; Goto@step2DDD ; Label@step2D ; $\text{For@} i = 3, i \leq 6, i++, \ \text{If@Im@}\mu \hat{e}. \ \text{korn@} @i \ \text{DDD} > 0, \ \mu_2 = \mu \hat{e}. \ \text{korn@} @i \ \text{DD}$; Goto@step3DDD ; Label@step3D ; $L \ 2$ Текст программы.nb $\text{For@} i = 5, i \leq 6, i++, \ \text{If@Im@}\mu \hat{e}. \ \text{korn@} @i \ \text{DDDD} > 0, \ \mu_3 = \mu \hat{e}. \ \text{korn@} @i \ \text{DDDD}$; L $\text{Clear@}\mu \ \text{D}$; $\lambda_1 = -\text{H}\beta_{1,5} \mu^3 - \text{H}\beta_{1,4} + \beta_{5,6}L \mu^2 + \text{H}\beta_{2,5} + \beta_{4,6}L \mu - \beta_{2,4}L \hat{e} \text{H}\beta_{5,5} \mu^2 - 2\beta_{4,5} \mu + \beta_{4,4}L$; $\lambda_2 = -\text{H}\beta_{1,5} \mu^2^3 - \text{H}\beta_{1,4} + \beta_{5,6}L \mu^2^2 + \text{H}\beta_{2,5} + \beta_{4,6}L \mu - \beta_{2,4}L \hat{e} \text{H}\beta_{5,5} \mu^2^2 - 2\beta_{4,5} \mu + \beta_{4,4}L$; $\lambda_3 = -\text{H}\beta_{1,5} \mu^3^3 - \text{H}\beta_{1,4} + \beta_{5,6}L \mu^3^2 + \text{H}\beta_{2,5} + \beta_{4,6}L \mu - \beta_{2,4}L \hat{e} \text{H}\beta_{1,1} \mu^3^4 - 2\beta_{1,6} \mu^3^3 + \text{H}2\beta_{1,2} + \beta_{6,6}L \mu^3^2 - 2\beta_{2,6} \mu + \beta_{2,2}L$; $\text{compl} = \text{N@}$ $8\mu_1, \mu_2, \mu_3, \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$

5. Программа построения множества упругих полей для анизотропных тел вращения в задаче от действия массовых сил **Фрагмент исходного текста программы. Авторы: Малявин Е.А. и др. © Липецк 2022 г.**

```

pribl = Input@"Введите приближение при формировании частных
решений"D; SetDirectory@dINPUTD; mantissa = Input@"Введите требуемое число
знаков после запятой"D; upPar = StringJoin@8"UprugParameters.x"< = Get@upParD;
Н* Комплексные параметры среды *L Off@NSolve::"precw"D; korn = NSolve@H1
- vz ^ 2 er ê ezL γ^4 - Hez ê gz - 2 vz H1 + vrLL γ^ 2 + H1 - vr ^ 2L ez ê er 0, γ,
WorkingPrecision → mantissaD; HFor@i = 1, i ≤ 4, i++, If@Re@γ ê. korn@@iDDD >
0, γ1 = γ ê. korn@@iDD; Goto@step2DDD; Label@step2D; For@i + 1, i ≤ 4, i++,
If@Re@γ ê. korn@@iDDD > 0, γ2 = γ ê. korn@@iDDDD;L IfBγ1 == 1 & γ2 1,
PrintB"Среда изотропна\nДальнейшее решение невозможно"FF; IfBγ1 == γ2 ≠ 1,
PrintB "Недопустимый случай\nДальнейшее решение невозможно"FF; compl = 8γ1,
γ2<; SetDirectory@dWORKD; If @ToString@FileType@"ComplexParameters.x"DD
"File", HDeleteFile@"ComplexParameters.x"D; Save@"ComplexParameters.x",
complDL, Save@"ComplexParameters.x", complDD; Н* Формирование системы
мономов *L Uxyo = monom = 8<; is = 0; For@n = 0, n ≤ pribl, n++, H For@α = 0, α ≤
n, α++, H is = is + 1; monom = Append@monom, ya z n-αD; Uxyo = Append@Uxyo,
88y α z n-α, 0< , 80, ya z n-α<< = Uxyo@@iDD; Н* Базис векторов перемещений
*L wo = Expand@1 ê H2 πL Integrate@uxxo ê. y → r Cos@βD, 8β, 0, 2 π<; Н* Базис
тензоров деформаций *L Erro = Expand@∂r uoD; Eθθo = Expand@uo ê rD; Ezzo =
Expand@∂z woD; Ezro = Expand@H∂z uo + ∂r woL ê 2D; Erθo = 0; Ezθo = 0; EijopiT
= 8Erro, Eθθo, Ezzo, Erθo, Ezro, Ezθo<; Н* Базис тензоров напряжений *L Srro = -
Erro er ez + Eθθo er ez vr + Ezzo er ez vz + Ezzo er ez vr vz - Erro er 2 vz 2 + Eθθo er 2
vz 2 H1 + vrL I-ez + ez vr + 2 er vz 2M ; Sθθo = - Eθθo er ez + Erro er ez vr + Ezzo er
ez vz + Ezzo er ez vr vz + Erro er 2 vz 2 - Eθθo er 2 vz 2 H1 + vrL I-ez + ez vr + 2 er vz
2M ; Szzo = - ez HEzzo ez - Ezzo ez vr + Erro er vz + Eθθo er vzL -ez + ez vr + 2 er vz
2 ; Srθo = 0; Szro = 2 Ezro gz; Szθo = 0; SijopiT = 8Srro, Sθθo, Szzo, Srθo, Szro, Szθo<
; Н* Базис массовых сил *L Ro = -H∂r Srro + ∂z Szro + HSrro - SθθoL ê rL; Zo =
-H∂r Szro + ∂z Szzo + Szro ê rL; FoPiT = 8Ro, Zo< , 8i, 1, SostRabo<; delet = 3;
SostRabo = SostRabo - delet; Uo = Drop@Uo, deletD; Eijo = Drop@Eijo, deletD; Sijo
= Drop@Sijo, deletD; Fo = Drop@Fo, deletD; ksiBASo = 8SostRabo, Uo, Eijo, Sijo,
Fo<; Print@"Гармонических векторов: ", SostRaboD; SetDirectory@dWORKD; If

```

```

AToString@FileType@"BasicKSI_o.x"DD "File", IDeleteFile@"BasicKSI_o.x"D;
Save@"BasicKSI_o.x", ksiBASoDM, Save@"BasicKSI_o.x", ksiBASoDE;
Clear@ksiBASoD; 2 Текст программы.nb H* ТЕСТЫ *L H* 1.Уравнения
равновесия в напряжениях *L rRU = Array@Null, 8SostRabo, 2< = Sijo@@nDD;
8Ro, Zo< = Fo@@nDD; rRU@@n, 1DD = Expand@∂r Srro + ∂z Szro + HSrro - SθθoL
ê r + RoD; rRU@@n, 2DD = Expand@∂r Szro + ∂z Szzo + Szro ê r + ZoDLD;
Print@Chop@rRUDD; H* 2.Уравнения совместности деформаций *L def =
Array@Null, 8SostRabo, 2< = Eijo@@nDD; defPn,1T = Chop@Expand@Erro - ∂r Hr
EθθoLDD; defPn,2T = Chop@Expand@∂z,z Erro + ∂r,r Ezzo - 2 ∂r,z EzroDD; LD; def
H* 3.Закон Гука *L zg = Array@Null, 8SostRabo, 6< = Sijo@@nDD; 8Erro, Eθθo,
Ezzo, Erθo, Ezro, Ezθo< = Eijo@@nDD; zg@@n, 1DD = Sijo@@n, 1DD == ExpandB
- Erro er ez + Eθθo er ez vr + Ezzo er ez vz + Ezzo er ez vr vz - Erro er 2 vz 2 + Eθθo er
2 vz 2 H1 + vrL I-ez + ez vr + 2 er vz 2M F; zg@@n, 2DD = Sijo@@n, 2DD == ExpandB
- Eθθo er ez + Erro er ez vr + Ezzo er ez vz + Ezzo er ez vr vz + Erro er 2 vz 2 - Eθθo er
2 vz 2 H1 + vrL I-ez + ez vr + 2 er vz 2M F; zg@@n, 3DD = Sijo@@n, 3DD ==
ExpandB- ez HEzzo ez - Ezzo ez vr + Erro er vz + Eθθo er vzL -ez + ez vr + 2 er vz 2
F; zg@@n, 4DD = Sijo@@n, 4DD 0; zg@@n, 5DD = Sijo@@n, 5DD == Expand@2
Ezro gzD; zg@@n, 6DD = Sijo@@n, 6DD 0; F; Print@N@Chop@zgDDD;
H*Просмотр множества частных решений*L Print@"Базисный набор векторов
перемещений:"D; N@Chop@UoDD ê MatrixForm Print@"Базисный набор
тензоров напряжений:"D; N@Chop@SijoDD ê MatrixForm Print@"Базисный набор
тензоров деформаций:"D; N@Chop@EijoDD ê MatrixForm Print@"Базисный набор
тензоров объемных сил:"D; N@Chop@FoDD ê MatrixForm

```

6. Программа построения множества частных решений задачи сложного сопротивления для анизотропных полых стержней Фрагмент исходного текста программы Авторы: Цымбал Т.В.и др. © Липецк 2023 г.

```

SetDirectory@dINPUTD; ge3D = Get@"3Dparametric.x"D; 8S, I1, I2< =
Get@"StatikPar.x"D; ametric = StringJoin@8"GeometryKartaTor", tandn, ".x"< =

```

```

Get@ametricDD; 88a11, a12, a13, a14, a15, a16<< = Get@"ElasticParameters.x"D; kart
= StringJoin@8"GeometryKarta", tandn, ".x"<< = Get@"PrElasticParameters.x"D; 8μ1,
μ2, μ3, λ1, λ2, λ3< = Get@"ComplexParameters.x"D; ksiBAS = Get@bsuD; uprFun =
Get@upuD; tor = Get@touD; mantissa = 100; mng = 1; kgt = 100; garmP =
Get@"GarmonPolinom Bas.x"D; PrintA"В базисе гармонических многочленов
содержится элементов: ", garmPP2TE; Print@"В базисе содержится гармонических
векторов: ", ksiBASP1TD; PrintA"Максимальный порядок гармонических
многочленов: ", garmPP2TE; oOpol = garmP@@@3DD; BasZ1 = garmP@@@4DD;
BasZ2 = garmP@@@5DD; BasZ3 = garmP@@@6DD; If@ksiBAS@@@1DD 0, SostRab =
Input@"Введите количество генерируемых векторов"D, Hprr = Input@"Введите
приращение генерируемых векторов"D; SostRab = ksiBAS@@@1DD + prrLD; numb
= 0; ots = 0; IfBSostRab ê 6 > oOpol, PrintB"ПРЕВЫШЕНИЕ
ЗАРЕЗЕРВИРОВАННОГО ПОРЯДКА!"F, Print@"Рабочий порядок гармонических
многочленов: ", SostRab ê 6DF; NPolinRab = 6 garmPP3T; Н* Базис гармонических
векторов *L F@i_, j_D = 0; SwitchAgarmPP1T, 1, Н garm = Array@F, 8NPolinRab,
3<, torP = 8a, b, c, d< = torF; SYZ = SYZ - ∂x ψ0; SXZ = SXZ + ∂y ψ0; SZZ =
Expand@1 ê a33 Ha x + b y + cL - 1 ê a33 Ha13 SXX + a23 SYY + a34 SYZ + a35 SXZ
+ a36 SXYLD; Sij = Expand@8SXX, SYY, SZZ, SYZ, SXZ, SXY<; ksiBAS@@@2DD
= Append@ksiBAS@@@2DD, UD; Н* Базис тензоров деформаций *L EXX =
Expand@∂x uD; 4 6_BasicKSI.nb EYY = ExpandA∂y vE; EZZ = Expand@∂z wD; EYZ
= ExpandAI∂z v + ∂y wM ë 2E; EXZ = Expand@H∂x w + ∂z uL ê 2D; EXY =
ExpandAI∂y u + ∂x vM ë 2E; Eij = 8EXX, EYY, EZZ, EYZ, EXZ, EXY< ê. a → a ê. b
→ b ê. c → c ê. d → d; ksiBAS@@@3DD = Append@ksiBAS@@@3DD, EijD;
ksiBAS@@@1DD = i; Clear@a, b, c, dD; Print@"Выполнено:", iD; F;
SetDirectory@dWORKD; ngu = ToString@karte@@@karte@@@1DD + 2DDD; bsu =
StringJoin@8"BasicKSI", ngu, ".x"< = ksiBAS@@@4, nDD; rRU@@@n, 1DD =
Chop@∂X SXX + ∂Y SXYD; rRU@@@n, 2DD = Chop@∂X SXY + ∂Y SYXD;
rRU@@@n, 3DD = Chop@∂X SXZ + ∂Y SYZDLD; Print@N@rRUDD; Н*
2.Уравнения совместности деформаций *L def = Array@Null, 8SostRab, 6< =
ksiBAS@@@3, nDD; defPn,1T = ChopATogetherA∂y,y EXX + ∂x,x EYY - 2 ∂x,y

```

$EYEE$; $dfPn,2T = ChopATogetherA\partial z, z EYY + \partial y, y EZZ - 2 \partial y, z EYZEE$; $dfPn,3T = Chop@Together@\partial x, x EZZ + \partial z, z EXX - 2 \partial x, z EXZDD$; $dfPn,4T = ChopATogetherA\partial x I-\partial x EYZ + \partial y EXZ + \partial z EXYM - 2 \partial y, z EXXEE$; $dfPn,5T = ChopATogetherA\partial y I\partial x EYZ - \partial y EXZ + \partial z EXYM - 2 \partial x, z EYEE$; $dfPn,6T = ChopATogetherA\partial z I\partial x EYZ + \partial y EXZ - \partial z EXYM - 2 \partial x, y EZZEE$; ME; N@dfD 6_BasicKSI .nb 5 Н* 3.Закон Гука *L Print@"Уравнения совместности перемещений в напряжениях:"D; $df = Array@Null, 8SostRab, 9< = ksiBAS@@@4, nDD$; $8u, v, w< = ksiBAS@@@2, nDD$; $If@karte@@@karte@@@1DD + 2DD 1, 8a, b, c, d< = tor@@@nDD, 8a, b, c, d< = torD$; $8u, v, w< = ksiBAS@@@2, nDD$; $dfPn,1T = N@Chop@ExpandDenominator@Together@\partial x u == \beta_{11} SXX + \beta_{12} SYY + \beta_{13} SZZ + \beta_{14} SYZ + \beta_{15} SXZ + \beta_{16} SXY + a_{13} \hat{e} a_{33} Ha x + b y + cLDDDD$; $dfPn,2T = N@Chop@ExpandDenominator@Together@\partial y v == \beta_{12} SXX + \beta_{22} SYY + \beta_{23} SZZ + \beta_{24} SYZ + \beta_{25} SXZ + \beta_{26} SXY + a_{23} \hat{e} a_{33} Ha x + b y + cLEEEEE$; $dfPn,3T = N@Chop@ExpandDenominator@Together@\partial z w Ha x + b y + cLDDDD$; $dfPn,4T = N@Chop@ExpandDenominator@ Together@\partial z w == a_{13} SXX + a_{23} SYY + a_{33} SZZ + a_{34} SYZ + a_{35} SXZ + a_{36} SXYDDDD$; $dfPn,5T = N@Chop@ExpandDenominator@TogetherA\partial z v + \partial y w == \beta_{14} SXX + \beta_{24} SYY + \beta_{34} SZZ + \beta_{44} SYZ + \beta_{45} SXZ + \beta_{46} SXY + a_{34} \hat{e} a_{33} Ha x + b y + cLEEEEE$; $dfPn,6T = N@Chop@ExpandDenominator@Together@\partial x w + \partial z u == \beta_{15} SXX + \beta_{25} SYY + \beta_{35} SZZ + \beta_{45} SYZ + \beta_{55} SXZ + \beta_{56} SXY + a_{35} \hat{e} a_{33} Ha x + b y + cLDDDD$; $dfPn,7T = N@Chop@ExpandDenominator@TogetherA\partial y u + \partial x v \beta_{16} SXX + \beta_{26} SYY + \beta_{36} SZZ + \beta_{46} SYZ + \beta_{56} SXZ + \beta_{66} SXY + a_{36} \hat{e} a_{33} Ha x + b y + cLEEEEE$; $dfPn,8T = N@Chop@ExpandDenominator@Together@\partial x Hw \hat{e}. z \rightarrow 0L == \beta_{15} SXX + \beta_{25} SYY + \beta_{35} SZZ + \beta_{45} SYZ + \beta_{55} SXZ + \beta_{56} SXY + a_{35} \hat{e} a_{33} Ha x + b y + cL + d yDDDD$; $dfPn,9T = N@Chop@ExpandDenominator@TogetherA\partial y Hw \hat{e}. z \rightarrow 0L == \beta_{14} SXX + \beta_{24} SYY + \beta_{34} SZZ + \beta_{44} SYZ + \beta_{45} SXZ + \beta_{46} SXY + a_{34} \hat{e} a_{33} Ha x + b y + cL - d xEEEE$ ME; N@dfD Н* 4.Дифференциальные уравнения равновесия в напряжениях *L Print@"Дифференциальные уравнения равновесия в напряжениях:"D; $du = Array@Null, 8SostRab, 2< = ksiBAS@@@4, nDD$; $If@karte@@@karte@@@1DD + 2DD 1, 8a, b, c, d< = tor@@@nDD, 8a, b, c, d< = torD$; $duPn,1T = ChopANATogetherA\partial y, y H\beta_{11}$

$S_{XX} + \beta_{12} S_{YY} + \beta_{13} S_{ZZ} + \beta_{14} S_{YZ} + \beta_{15} S_{XZ} + \beta_{16} S_{XYL} + \partial_{x,x} \text{H} \beta_{12} S_{XX} +$
 $\beta_{22} S_{YY} + \beta_{23} S_{ZZ} + \beta_{24} S_{YZ} + \beta_{25} S_{XZ} + \beta_{26} S_{XYL} - \partial_{x,y} \text{H} \beta_{16} S_{XX} + \beta_{26} S_{YY}$
 $+ \beta_{36} S_{ZZ} + \beta_{46} S_{YZ} + \beta_{56} S_{XZ} + \beta_{66} S_{XYL} \text{OEEE}; \text{duPn,2T} =$
 $\text{NACHopAExpandDenominatorATogetherA} \partial_y \text{H} \beta_{15} S_{XX} + \beta_{25} S_{YY} + \beta_{35} S_{ZZ} + \beta_{45}$
 $S_{YZ} + \beta_{55} S_{XZ} + \beta_{56} S_{XYL} - \partial_x \text{H} \beta_{14} S_{XX} + \beta_{24} S_{YY} + \beta_{34} S_{ZZ} + \beta_{44} S_{YZ} + \beta_{45}$
 $S_{XZ} + \beta_{46} S_{XYL} == -2 d + \text{H} a a^3_4 - b a^3_5 L \hat{e} a^3_3 \text{EEEE ME}; \text{Print@duD}; \text{H*Просмотр}$
 базиса внутренних состояний*L Print@"Базисный набор векторов
 перемещений:"D; N@Chop@ksiBAS@@@2DDDD \hat{e} MatrixForm Print@"Базисный
 набор тензоров напряжений:"D; N@Chop@ksiBAS@@@4DDDD \hat{e} MatrixForm
 Print@"Базисный набор тензоров деформаций:"D; N@Chop@ksiBAS@@@3DDDD
 \hat{e} MatrixForm

7. Программа построения множества решений задачи термоэластостатики с учетом действия массовых сил
Фрагмент исходного текста программы Авторы: Левина Е.Ю., Цымбал Т.В. и др. © Липецк 2024 г.

pribl = Input@"Введите приближение при формировании частного решения"D;
 SetDirectory@dINPUTD; mantissa = 400; upPar = StringJoin@8"UprugParameters.x"<
 = Get@upParD; SetDirectory@dWORKD; complPar =
 StringJoin@8"ComplexParameters.x"< = Get@complParD; Uxyo = monom = 8<; is = 0;
 For@n = 0, n ≤ pribl, n++, H For@α = 0, α ≤ n, α++, H is = is + 1; monom =
 Append@monom, yα z n-αD; Uxyo = Append@Uxyo, 88yα z n-α, 0<, 80, yα z n-α<<
 = Uxyo@@iDD; H* Базис векторов перемещений *L wo = Expand@1 \hat{e} H2 πL
 Integrate@uxxo \hat{e} . y → r Cos@βD, 8β, 0, 2 π<; H* Базис тензоров деформаций *L Erro
 = Expand@∂r uoD; Eθθo = Expand@uo \hat{e} rD; Ezzo = Expand@∂z woD; Ezro =
 Expand@H∂z uo + ∂r woL \hat{e} 2D; Erθo = 0; Ezθo = 0; EijopiT = 8Erro, Eθθo, Ezzo, Erθo,
 Ezro, Ezθo<; H* Базис тензоров напряжений *L Srro = -IErro er ez + Eθθo er ez vr +
 Ezzo er ez vz + Ezzo er ez vr vz - Erro er 2 vz 2 + Eθθo er 2 vz 2M \hat{e} IH1 + vrL I-erz +
 ez vr + 2 er vz 2MM; Sθθo = -IEθθo er ez + Erro er ez vr + Ezzo er ez vz + Ezzo er ez vr
 vz + Erro er 2 vz 2 - Eθθo er 2 vz 2M \hat{e} IH1 + vrL I-erz + ez vr + 2 er vz 2MM; Szzo = -

ez HEzzo $ez - Ezzo$ ez $vr + Erro$ er $vz + E\theta\theta$ er $vzL -ez + ez$ $vr + 2$ er vz 2 ; $Sr\theta_0 = 0$;
 $Szr_0 = 2$ Ezr_0 gz ; $Sz\theta_0 = 0$; $Sij_0PiT = 8$ Sr_0 , $S\theta\theta_0$, Sz_0 , $Sr\theta_0$, Szr_0 , $Sz\theta_0$ <; Н* Базис
 массовых сил *L $R_0 = -H\hat{r}$ $Sr_0 + \hat{z}$ $Sz_0 + HSr_0 - S\theta\theta_0L \hat{e}$ rL ; $Z_0 = -H\hat{r}$ $Szr_0 + \hat{z}$
 $Sz_0 + Szr_0 \hat{e}$ rL ; $F_0PiT = 8$ R_0 , Z_0 <; $T_0PiT = 0$, δ_i , 1 , $SostRabo$ <; $delet = 3$; $SostRabo$
 $= SostRabo - delet$; $U_0 = Drop@U_0$, $deletD$; $Eij_0 = Drop@Eij_0$, $deletD$; $Sij_0 =$
 $Drop@Sij_0$, $deletD$; $F_0 = Drop@F_0$, $deletD$; $T_0 = Drop@T_0$, $deletD$; $ksiBAS_0 =$
 8 $SostRabo$, U_0 , Eij_0 , Sij_0 , F_0 , T_0 <; $Print@$ "Гармонических векторов: ", $SostRaboD$;
 $SetDirectory@dWORKD$; If $AToString@FileType@"BasicKSI_o.x"DD$ "File",
 $IDeleteFile@"BasicKSI_o.x"D$; $Save@"BasicKSI_o.x"$, $ksiBAS_0DM$,
 $Save@"BasicKSI_o.x"$, $ksiBAS_0DE$; $Clear@$ α , βD ; Н* Добавление базисных
 элементов уравновешенного упругого состояния *L $SetDirectory@dWORKD$;
 $garmP = Get@"GarmonPolinom Bas.x"D$; $ksiBAS = 80$, 8 <<; $oOpol = garmP@$ $2DD$;
 $Bas\xi_1 = garmP@$ $3DD$; $Bas\xi_2 = garmP@$ $4DD$; $SostRab = SostRabo$; $numb = 0$; ots
 $= 0$; $NPolinRab = 4$ $garmPP2T$; Н* Базис гармонических векторов *L $F@i_, j_D = 0$;
 $garm = Array@F$, 8 $NPolinRab$, 2 $z \hat{e}$ $\gamma_1 + y$; $\Psi_2 = \partial\xi_2 \phi_2 \hat{e}$. $\xi_2 \rightarrow z \hat{e}$ $\gamma_2 + y$; Н* Базис
 векторов перемещений *L $uxx = ComplexExpand@Re@p_1 H\phi_1 \hat{e}$. $\xi_1 \rightarrow z \hat{e}$ $\gamma_1 + yL$
 $+ p_2 H \phi_2 \hat{e}$. $\xi_2 \rightarrow z \hat{e}$ $\gamma_2 + yLDD$; $uyy = ComplexExpand@Re@q_1 H\phi_1 \hat{e}$. $\xi_1 \rightarrow z \hat{e}$
 $\gamma_1 + yL + q_2 H \phi_2 \hat{e}$. $\xi_2 \rightarrow z \hat{e}$ $\gamma_2 + yLDD$; $w = Expand@1 \hat{e}$ $H^2 \piL$ $Integrate@uxx \hat{e}$.
 $y \rightarrow r \text{Cos}@$ βD , 8β , 0 , 2π <; $ksiBAS@$ $2DD = Append@ksiBAS@$ $2DD$, UD ; Н*
 Базис тензоров напряжений *L $Syy = ComplexExpand@Re@\Psi_1 + \Psi_2DD$; $Sxx =$
 $ComplexExpand@-Re@$ $\gamma_1^2 \Psi_1 + \gamma_2^2 \Psi_2DD$; $Sxy = ComplexExpand@-Re@$
 $\gamma_1 \Psi_1 + \gamma_2 \Psi_2DD$; $S\eta\eta = ComplexExpand@Re@H_1 - \epsilon_1L \Psi_1 + H_1 - \epsilon_2L \Psi_2DD$; $AaC =$
 $1 \hat{e}$ $H^2 \piL$ $Integrate@HSxx \hat{e}$. $y \rightarrow r \text{Cos}@$ βDL , 8β , 0 , 2π <; $ksiBAS@$ $4DD =$
 $N@Rationalize@Append@ksiBAS@$ $4DD$, $SijD$, $0D$, $mantissaD$; Н* Базис тензоров
 деформаций *L $Ezz = Expand@1 \hat{e}$ $ez HSzz - vz HSrr + S\theta\theta LLD$; $E\theta\theta = Expand@1 \hat{e}$
 $er HS\theta\theta - vr SrrL - vz \hat{e}$ $ez SzzD$; $Err = Expand@1 \hat{e}$ $er HSrr - vr S\theta\theta L - vz \hat{e}$ $ez SzzD$;
 $Ezr = Expand@1 \hat{e}$ $H^2 gzL SzrD$; $Er\theta = 0$; $Ez\theta = 0$; $Eij = 8$ Err , $E\theta\theta$, Ezz , $Er\theta$, Ezr , $Ez\theta$ <;
 $_.nb$ 3 $ksiBAS@$ $3DD = Append@ksiBAS@$ $3DD$, $EijD$; $ksiBAS@$ $1DD = i$;
 $Print@$ "Выполнено:", iD ; F ; Н* Добавление базисных элементов термоупругого
 состояния *L $SetDirectory@dINPUTD$; $mantissa = 400$; $upPar =$

```

StringJoin@8"UprugParameters.x"< = Get@upParD; SetDirectory@dWORKD;
8SostRabo, Uo, Eijo, Sijo, Fo, T0< = Get@"BasicKSI_o.x"D; garmP =
Get@"GarmonPolinom Bas.x"D; ksiBAST = 80, 8<<; oOpol = garmP@@@2DD; Basξ1 =
garmP@@@3DD; Basξ2 = garmP@@@4DD; Basξ0 = garmP@@@5DD; SostRabt =
SostRabo; numb = 0; ots = 0; NPolinRab = 6 garmPP2T; Print@"Базис гармонических
векторов пополняется до: ", SostRabtD; γ0 = κz ê κr ; g0 = Hez - vz ^2 erL Hy1^2 -
γ0 ^2L Hy2 ^2 - γ0 ^2L ê Hy0 ^2 Haz ez + αr vz erL - αr ez H1 + vrLL; p0 = γ0 ê ez
HHaz + αr vz er ê ezL g0 - γ0^ 2 H1 - vz ^2 er ê ezL - vz H1 + vrLL; q0 = -H1 + vrL ê
ez Har g0 + H1 - vrL ez ê er + vz γ0 ^2L; ε0 = 1 - vr + Hvz γ0^ 2 + αr g0L er ê ez; ForBi
= ksiBAST@@@1DD + 1, i ≤ SostRabt, i++, φ0 = garmP@@@5, iDD; Ψ0 = ∂ξ0 φ0 ê. ξ0 ->
z ê γ0 + y; Н* Базис векторов перемещений *L uxh = ComplexExpand@Re@p0 H φ0
ê. ξ0 -> z ê γ0 + yLDD; uyy = ComplexExpand@Re@ q0 H φ0 ê. ξ0 -> z ê γ0 + yLDD;
w = Expand@1 ê H2 πL Integrate@uxh ê. y → r Cos@βD, 8β, 0, 2 π<; ksiBAST@@@2DD
= Append@ksiBAST@@@2DD, UD; Н* Базис тензоров напряжений *L Syu =
ComplexExpand@Re@Ψ0DD; Sxx = ComplexExpand@-Re@γ0 ^2 Ψ0DD; Sxy =
ComplexExpand@-Re@ γ0 Ψ0DD; Sηη = ComplexExpand@Re@H1 - ε0L Ψ0DD;
AaC = 1 ê H2 πL Integrate@HSxx ê. y → r Cos@βDL, 8β, 0, 2 π<; ksiBAST@@@4DD =
N@Rationalize@Append@ksiBAST@@@4DD, SijD, 0D, mantissaD; Н* Базис функции
температур *L T0i = 1 ê H2 πL Integrate@ComplexExpand@Re@g0 ê ez Ψ0 D ê. y →
r Cos@βDD, 8β, 0, 2 π<; ksiBAST@@@3DD = Append@ksiBAST@@@3DD, EijD;
ksiBAST@@@1DD = i; Print@"Выполнено:", iD; F; Н* Объединение базисов в стеке
*L SostRabo = 3 SostRabo; Do@ Uo = Insert@Uo, ksiBAS@@@2DD@@@iDD, i + iD;
Eijo = Insert@Eijo, ksiBAS@@@3DD@@@iDD, i + iD; Sijo = Insert@Sijo,
ksiBAS@@@4DD@@@iDD, i + iD; Fo = Insert@Fo, 80, 0<; _nb 5
Print@"Гармонических векторов: ", SostRaboD; SetDirectory@dWORKD; If
AToString@FileType@"BasicKSI_o.x"DD "File", IDeleteFile@"BasicKSI_o.x"D;
Save@"BasicKSI_o.x", ksiBASoDM, Save@"BasicKSI_o.x", ksiBASoDE;
Print@"Базис гармонических векторов пополнен до: ", SostRaboD; Н* ТЕСТЫ *L
SetDirectory@dWORKD; 8SostRabo, Uo, Eijo, Sijo, Fo, T0< = Get@"BasicKSI_o.x"D;
SetDirectory@dINPUTD; upPar = StringJoin@8"UprugParameters.x"< = Get@upParD;

```

Н* 1. Уравнения равновесия в напряжениях *L rRU = Array@Null, 8SostRabo, 2< = Sijo@@nDD; 8Ro, Zo< = Fo@@nDD; rRU@@n, 1DD = Expand@∂r Srro + ∂z Szro + HSrro - S00oL ê r + RoD; rRU@@n, 2DD = Expand@∂r Szro + ∂z Szzo + Szro ê r + ZoDLD; Print@Chop@rRUDD; Н* 2. Уравнения совместности деформаций *L def = Array@Null, 8SostRabo, 2< = Eijo@@nDD; defPn,1T = Chop@Expand@Erro - ∂r Hr E00oLDD; defPn,2T = Chop@Expand@∂z,z Erro + ∂r,r Ezzo - 2 ∂r,z EzroDD; LD; def Н* 3. Закон Гука *L zG = Array@Null, 8SostRabo, 6< = Sijo@@nDD; 8Err, E00, Ezz, Er0, Ezr, Ez0< = Eijo@@nDD; zGPn,1T = Simplify@Err == Expand@1 ê er HSrr - vr S00L - vz ê ez Szz + αr T0@@nDDDD; zGPn,2T = Simplify@E00 == Expand@1 ê er HS00 - vr SrrL - vz ê ez Szz + αr T0@@nDDDD; zGPn,3T = Simplify@Ezz == Expand@1 ê ez HSzz - vz HSrr + S00LL + αz T0@@nDDDD; zGPn,4T = Er0 0; zGPn,5T = Simplify@Ezr == Expand@1 ê H2 gzL SzrDD; zGPn,6T = Ez0 0LD; N@Chop@zGDD Н*Просмотр базиса внутренних состояний*L Print@"Базисный набор векторов перемещений:"D; N@Chop@UoDD êê MatrixForm Print@"Базисный набор тензоров напряжений:"D; N@Chop@SijoDD êê MatrixForm Print@"Базисный набор тензоров деформаций:"D; N@Chop@EijoDD êê MatrixForm Print@"Базисный набор тензоров массовых сил:"D; N@Chop@FoDD êê MatrixForm Print@"Базисный набор температур.