

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

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Воронеж – 2025

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

Научный руководитель

Смоленцев Владислав Павлович
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты:

Саушкин Борис Петрович
доктор технических наук, профессор, профессор
кафедры «Технология и оборудование
машиностроения»
ФГАОУ ВО «Московский государственный
политехнический университет»

Норман Александр Владимирович
кандидат технических наук, директор
ГБПОУ ВО «ВАТ имени В. П. Чкалова»

Ведущая организация

Акционерное общество «Научно-производственное
объединение «Техномаш» им. С. А. Афанасьева»,
г. Москва

Защита состоится 30 октября 2025 г. в 15⁰⁰ часов в конференц-зале на заседании диссертационного совета 24.2.286.06, созданного на базе ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет» (ВГТУ), по адресу: 394026, г. Воронеж, Московский просп., 14.

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

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

Автореферат разослан «15 » июня 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат технических наук, доцент



Мандрыкин Андрей Владимирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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 негативные стороны, выявляемые 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 её интеграцией в государственную космическую программу Российской Федерации на период 2016-2025 годов. Работа была реализована в рамках опытно-конструкторской разработки «Феникс», которая получила официальное утверждение в модифицированной версии согласно постановлению Правительства РФ № 1513 от 9 декабря 2017 года, а также взаимосвязи в части реализации Стратегии развития станкоинструментальной промышленности на период до 2035 года, утвержденной Распоряжением Правительства РФ от 5 ноября 2020 года N 2869-р, которая выделяет приоритетные для РФ направления развития в области обеспечения современного отечественного производства наукоемким технологическим оборудованием и соответствующими средствами технологического оснащения.

Степень разработанности темы. В результате анализа литературных источников и публикаций ведущих специалистов в области технологии машиностроения как отечественных школ (Воронежа, Казани, Москвы, Санкт-Петербурга, Тулы, Перми, Новосибирска, Уфы, Иваново, Самары и других городов России), так и зарубежных, а также достижений отечественных и зарубежных производителей оборудования для комбинированных методов обработки (США, Болгарии, Швеции, Германии, Франции, Китая, Японии) имеются предпосылки для создания научной базы для развития различных направлений упомянутых

методов в рабочих средах с переменным агрегатным состоянием с целью получения необходимых эксплуатационных свойств высоконагруженных деталей и изделий, а также обоснования направлений научных исследований по совершенствованию технологии изготовления существующей и перспективной авиационной и космической техники.

Цель и задачи работы

Целью работы является оптимизация режимов и эксплуатационных показателей комбинированных методов обработки труднообрабатываемых металлических 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 для прогрессивных видов производства отечественных наукоемких изделий.

Объект исследований. Методология создания оптимальных рабочих режимов и подбора состава рабочих сред для получения необходимых эксплуатационных характеристик наукоемких изделий. Интегрированные технологические процессы, основанные на совместном использовании магнитного, химического, механического и термического воздействия, с возможностью регулирования через изменение характеристик технологического оборудования при работе в средах с разными постоянными и переменными агрегатными состояниями.

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. Проведение теоретических и практических исследований процесса, а также разработка технологии комбинированных методов обработки в рабочих средах с регулируемым постоянным и переменным физическим состоянием осуществлялось на базе современного сертифицированного научного оборудования, включая вычислительные системы. В работе применялось также уникальное экспериментальное и опытно-промышленное оборудование, разработанное автором на основе его собственных патентов. Все результаты исследования были многократно продублированы (не менее чем по критерию Стьюдента) для подтверждения их достоверности. Выбор методов и средств обработки был обоснован количественной оценкой технологичности с учетом результатов исследований российских и зарубежных научных школ, включая материалы автора. Достоверность полученных данных подтверждалась путем

сравнения с результатами работ других ученых и производственными показателями при организации серийного производства изделий. Такой подход обеспечил высокую надежность полученных результатов, многие из которых успешно внедрены в производственный процесс и включены в расчетные методики, часть которых представлена в приложении к диссертационной работе.

Научная новизна включает:

1. Раскрытие механизма действия технологических параметров, в том числе 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 включают сокращение количества вариантов выбора технологических методов и средств, в том числе 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. Часть методов защищены патентами соискателя, а результаты внедрены в производство.

2. Теоретические исследования по расширению зоны использования в области производственной технологичности и участие в ее внедрении 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 (филиала ФГУП «ГКНПЦ им. М.В. Хруничева»), где подтвердили свою эффективность. На основании полученных результатов материалы были внедрены в производственный процесс изготовления ракетных двигателей в АО КБХА, что позволило достичь существенной экономической выгоды. Практическая значимость разработок подтверждается их активным использованием при создании современных поколений ракетных двигателей на предприятиях Роскосмоса. Кроме того, полученные результаты нашли применение в отечественном станкостроении, способствуя развитию машиностроительной отрасли страны в целом.

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 опубликовано 19 научных работ. В их числе: 8 – в изданиях, рекомендованных ВАК РФ; 2 патента РФ; 4 – в зарубежных научных источниках, рецензируемых в базе «Scopus»; 5 публикаций 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 2 приложений. Содержание диссертации изложено на 162 страницах с рисунками, таблицами, приложениями.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В первой главе представлен комплексный обзор существующих исследований и практического применения комбинированных методов обработки (КМО) в различных технологических процессах. Особое внимание уделяется анализу способов регулирования эксплуатационных свойств рабочих сред посредством физических параметров, а также изучению опыта внедрения подобных технологий в авиакосмической отрасли и других направлениях машиностроения. Проведенный анализ позволяет сформировать надежную теоретическую основу для дальнейшего исследования и достижения поставленных целей. В рамках обзора были изучены актуальные научные разработки последних лет, включая достижения ведущих российских научных центров в Москве, Санкт-Петербурге, Воронеже, Казани, Ростове-на-Дону, Рыбинске, Брянске, Перми, Кемерове и других городах. Кроме того, рассмотрены результаты исследований ученых из США, Японии, Великобритании, Швеции, Китая и Беларуси. Такой всесторонний подход к анализу существующих научных достижений

создает прочную методологическую базу для проведения как теоретических, так и прикладных исследований в рамках данной работы.

В главе на базе основополагающих трудов отечественных и зарубежных ученых, инженеров, производителей, предложены и научно обоснованы пути совершенствования качества наукоемких изделий, изготавливаемых в различных рабочих средах комбинированными методами при их использовании в технологических системах, включая комплексы. Раскрыты установленные в промышленности возможности повышения качества изделий отечественной техники и средств технологического оснащения за счет объективной оценки уровня технологичности при использовании различных технологических сред, часть которых предложена соискателем. При анализе технологичности автор опирался на уже проверенные и подтвержденные процессы, которые применялись как для решения задач традиционными методами, так и для разработки принципиально новых операций, которые ранее считались невыполнимыми. В работе рассматривались существующие технологические параметры, желаемые условия их выполнения, что составляет основное содержание данного исследования.

Во второй главе рассмотрены методы решения поставленных задач и достижения поставленной в работе цели. Научные гипотезы для решения задач работы:

1. В основу построения перспективных комбинированных методов с используемыми технологическими рабочими средами должен быть положен следующий принцип: каждое воздействие должно реализовываться через определенные физические параметры и быть взаимосвязанным с другими воздействиями. Важным аспектом является то, что совместное использование различных технологических воздействий в составе комплекса может значительно усилить общий положительный эффект на обрабатываемый материал. При этом эффективность процесса оценивается по двум основным критериям: достижение заданного уровня показателей в рамках разрабатываемого комбинированного процесса, а также перспективная возможность улучшения эксплуатационных характеристик обрабатываемых изделий. Такой подход позволяет создавать более эффективные технологические процессы за счет синергетического эффекта от комбинирования различных видов обработки.

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 этого 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 усредненные 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.

На базе научных гипотез созданы новые способы и устройства для выбора и критериального обоснования технологических сред. Для этого при проектировании комбинированных методов обработки используются 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. 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, 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.

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. 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.

Предложена методология выбора технологических рабочих сред. 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 осуществляется в автоматизированном режиме по представленному в работе алгоритму с использованием численных методов и искусственного интеллекта. Далее выполняется поиск и обоснование обобщенных принципов оценки полезности известных и разрабатываемых мероприятий на выбор имеющихся и показателей создаваемых

технологических рабочих сред для повышения (желательно до предельно достижимого) уровня эксплуатационных показателей изделия.

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

В главе 3 раскрыта процедура моделирования механизма оптимизации выбора технологических рабочих сред для комбинированных методов обработки, где в качестве инструмента исследований использовалась теория делового конфликта, позволяющая обосновать эффективность технологических рабочих сред и оптимизацию структуры комбинированных методов обработки.

Создание комплексных технологических процессов, в которых существенную роль играет подбор рабочих сред, представляет собой сложный многоэтапный процесс, включающий исследовательские, проектные и внедренческие мероприятия. Такая работа характеризуется существенными временными и финансовыми затратами на проведение необходимых исследований. Важным ограничением является то, что инженеры-проектировщики могут оперировать только теми физическими характеристиками рабочих сред, которые уже достаточно изучены и описаны. В этой связи часто возникают серьезные разногласия между запросами заказчика и реальными возможностями проектировщиков, что приводит к нарушению установленных сроков, превышению бюджета и проблемам с оформлением договорных отношений. Подобные несоответствия могут стать причиной конфликтных ситуаций и негативно повлиять на дальнейшее сотрудничество между участниками проекта.

Для построения процесса КМО требуется представленный в работе научно обоснованный алгоритм выполнения предпроектных изысканий, позволяющий изменять требования и возможности сторон в период до начала крупных финансовых вложений исполнителем, что может стать объектом изучения для конкретных вариантов предлагаемого алгоритма, часть которых освещена в приложениях работы.

Теория конфликта позволяет определить пределы, в рамках которых возможно урегулирование конфликтной ситуации, а также научно обосновать эти ограничения.

При разработке модели разрешения конфликтов в процессе проектирования КМО принимается базовое допущение: несмотря на изначальные разногласия между участниками, все стороны заинтересованы в достижении взаимоприемлемого и обоснованного решения. В контексте авиакосмического машиностроения данный процесс моделирования основывается на поэтапном сближении позиций участников. Это достигается путем последовательной оптимизации проектных решений со стороны исполнителей и корректировки требований заказчика в соответствии с предложенным алгоритмом преобразований. Такой подход позволяет найти баланс между техническими возможностями и потребностями заказчика, приводя к конструктивному разрешению конфликтных ситуаций.

Целью доказательного разрешения расхождений с использованием механизма управления ситуацией через теоретические положения конфликта служит получение оптимального конечного варианта объекта исследований с рядом 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 с граничными условиями, учитывающими в технологических рабочих средах возможности структурных физических воздействий или их сочетаний при проектировании КМО. Происходит 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 варианта.

Ключевым фактором, провоцирующим возникновение делового конфликта, выступают требования заказчика, которые формируют входную составляющую конфликтной системы S , состоящей из N структурных элементов. В рамках данной системы учитываются граничные условия, отражающие возможности физического воздействия на КМО через входные параметры X (требования заказчика) и выходные параметры Y (решения разработчика).

Если в процессе согласования удастся найти вариант полного или частичного решения спорных требований к созданию или выбору рабочих сред, их физических параметров или эффективности использования в КМО, то вектор входа системы принимает значение X_j^i . Тогда динамика изменения зоны конфликта между заказчиком и исполнителем представляет матрицу (1) входных требований X и приемлемых решений Y исполнителя-разработчика.

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

Часто X в (1) является параметром базового варианта КМО конфликтной системы S . Она может быть представлена декартовым произведением ($\otimes$).

$$S \subset X \otimes Y. \quad (2)$$

При необходимости выполнения нескольких значимых входных требований к технологическим средам, характеристиками их составляющих X_i является количество требований $i = \overline{1, N}$.

Входы X_{0s} для параметров внешней среды S_0 не зависят от связей s . Тогда основное (генеральное) воздействие $T_{ij} = H_0 \cdot R_i$ (R_i – вариант реакции системы $R = \{R_i\}_0$). Количество вариантов решений для выполнения требований заказчика составляет X_i , где H_0 является матрицей связи начальной структуры S_i с конечной величиной (S_j), в которой равенство $H_i=1$ возможно при конфликтной ситуации в случае согласования позиций x_i и y_j :

$$y_j = T_{ij}(c_i, X_i), \quad (3)$$

где c – текущее или конечное состояние системы; c_i – варианты состояния системы, $c = \{c_i\}$.

Основное (генеральное) воздействие оценивается как $T_{ij} = H_0 \cdot R_i$. Тогда количество вариантов решений для выполнения требований заказчика составляет X_i .

$$y_j = T_{ij}(c_i, X_i), \quad (4)$$

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

В матрице (1) левая часть раскрывает входные требования к системе, где T – вариант пути решения задачи на базе моделирования рассмотренных конфликтных ситуаций, а знак равенства показывает согласование решения обеими сторонами.

В производстве для конкретных случаев выбора технологических рабочих сред обычно применяют упрощенный метод с дискретной оценкой элементов матрицы в зависимости от их величины, получаемой 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 разработанной в работе схеме и экспериментальные подтверждения результатов.

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

1. Применение методологии искусственного интеллекта для систематизации и ранжирования частных оценок по степени их значимости, а также для исключения нереализуемых в текущих условиях вариантов решений. Процесс оценки состоит из нескольких последовательных шагов: предварительный анализ выполняется профильными экспертами в области конфликтной ситуации, в то время как финальное решение принимается руководителем на основе количественной оценки технологичности. Для проведения оценки каждому предложенному варианту решения присваивается индекс (K) по шкале натуральных чисел от 1 до $\bar{S}$, где значение S отражает максимальную значимость. Варианты с индексом K , превышающим значение $\bar{S}$ ($K > \bar{S}$), исключаются из дальнейшего рассмотрения, так как считаются неприемлемыми для реализации.

2. В процессе проведения серии опросов среди руководителей подразделений осуществляется оценка степени совпадения их мнений согласно установленным критериям оценки. В случае если общие показатели оценок, зафиксированные при первичном опросе (5), значительно отличаются от данных, полученных в результате последующих исследований, возникает потребность в дополнительной корректировке решения, которое было предложено в ходе опроса.

$$\sum_{i=1}^{\bar{S}} K_1 > \sum_{i=1}^{\bar{S}} K_2 . \quad (5)$$

Чтобы принять обоснованное решение, необходимо применить критерий (6) для проведения финального анализа и оценки достигнутого результата.

$$\sum_{i=1}^{\bar{S}} K_n < \sum_{i=1}^{\bar{S}} K_{n+1} . \quad (6)$$

Такое сравнение следует выполнять на всех этапах выбора и обоснования граничных условий.

3. В состав базы знаний входит специальная матрица, куда заносятся результаты оценки частных критериев для всех рассматриваемых альтернатив решения на основе данных последнего проведенного опроса.

Разработанный в рамках исследования алгоритм принятия решений представляет собой комплексную систему, которая обеспечивает внедрение процесса обработки информации с помощью электронных вычислительных машин, корректировку параметров поисковой зоны для достижения оптимальных результатов, гибкую адаптацию экспертного состава в зависимости от потребностей, разработку стратегий улучшения технико-экономических показателей посредством анализа технологичности, формирование научно обоснованных подходов к управлению качеством выпускаемой продукции.

Данный алгоритм позволяет эффективно интегрировать современные технологии и экспертное мнение для достижения поставленных целей. По предложенной модели и алгоритму ее реализации в КМО с обоснованным назначением рабочих сред разработана структура выбора и назначения технологических показателей рабочих сред для комбинированных методов, обеспечивающих требуемое качество наукоемких изделий. В рассматриваемом случае процесс раскрыт 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 влияние от силового действия потока в зоне обработки. Кроме того, рассмотрены рабочие среды в виде деионизированной воды, прокачиваемой через инструмент под давлением не ниже 2МПа, где качественно сохраняются характеристики предшествующей среды, а также процессы, осуществляемые в вязких углеводородах различной густоты при использовании режимов прямой и обратной полярности с импульсами различной длительности. Объектом исследования служат анализ интенсивности процессов, участвующих в комбинированных воздействиях, количественные показатели анализа и результирующие оценки технологичности выбора применяемых в средах физических воздействий, вытекающих из свойств изучаемых рабочих веществ. Для обобщенной оценки уровня технологичности всех сред применялся параметр производительности, являющийся одновременно и граничным условием. В случае прошивки отверстий производительность оценивается по величине продольной подачи ($L_{пр}$). Результаты выполнения операции прошивки на примере высоколегированной стали и конструкционной стали приведены на рисунке 1.

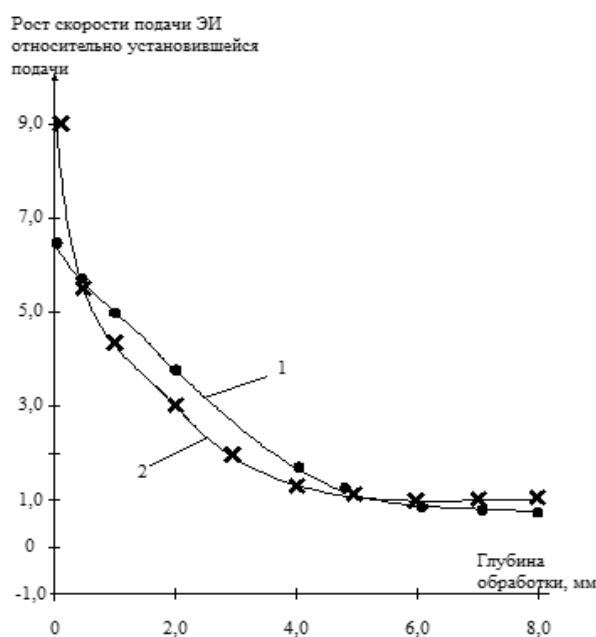


Рисунок 1 – Изменение скорости подачи электрода-инструмента при комбинированной электроэрозионно-химической обработке по глубине отверстия: 1 – нержавеющая высоколегированная сталь типа 12X18H10T; 2 – конструкционная сталь типа ст45.

Граничное значение $L_{пр}$ устанавливается как функция (ψ) от параметров процесса:

$$L_{пр} = \psi (P_{уд}, P_n, P_{ж}, S, L_c, \eta_{тр}), \quad (7)$$

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; $\eta_{\text{тр}}$ – коэффициент трения пузырьков со стенками электродов.

Максимальная глубина обработки определяется множеством параметров, включая тип и комбинации воздействий при комбинированном прошивании, размер обрабатываемой области, вязкость и электропроводность материала, стабильность рабочей среды и прочие характеристики процесса. Согласно проведенным расчетам для стандартной рабочей среды при электроэрозионно-химической обработке нержавеющей стали на оптимальных технологических режимах достижимая максимальная глубина $L_{\text{пр}}$ составляет $3,5 \div 4$ мм. Данные теоретические выводы подтверждены практическими исследованиями как отечественных, так и зарубежных специалистов. В ходе экспериментов был зафиксирован разброс значений в интервале от 3 до 5 мм (см. рисунок 1). При этом отклонение полученных результатов от расчетных показателей не превышает 10%, что подтверждает достоверность проведенных измерений.

Анализируя представленные на рисунке 1 графические зависимости, можно сделать вывод, что в интервале глубин от 0,5 до 3 мм изменение скорости прошивки различных типов углублений и отверстий носит линейный характер. Это позволяет использовать для расчета данных показателей их стабильные значения, которые были определены ранее при работе с аналогичными материалами.

Основным ограничением при обработке в данной рабочей среде выступает общая погрешность комбинированной эрозионно-химической обработки (δ). Количественную оценку данной погрешности можно произвести с помощью формулы, представленной в зависимости (8):

$$\delta = \delta_1 + \delta_2 + \delta_3, \quad (8)$$

где δ_1 – боковой зазор, возникающий вследствие эрозионных процессов, δ_2 – боковое анодное растворение обрабатываемого материала, δ_3 – различные факторы, влияющие на точность работы технологических систем.

В условиях интенсивной комбинированной обработки процесс бокового расширения отверстия преимущественно обусловлен действием анодного растворения материала. Учитывая данный факт при проведении расчетных вычислений допустимо принять:

$$\delta_2 = \sqrt{2\eta \frac{\alpha\chi}{\gamma} (U - \Delta U) \frac{L}{V_{\text{срк}}} + S_{\text{бок}}^2} - S_{\text{бок}}, \quad (9)$$

где η – выход по току; α – электрохимический эквивалент обрабатываемого материала; γ – плотность материала; χ – электропроводность электролита.

В процессе комбинированной прошивки базовым вариантом служат растворы с пониженной концентрацией нитрата натрия (NaNO_3), что теоретически подтверждается концепцией делового конфликта. При этом учитываются следующие параметры: напряжение между электродами (U), составляющее 20-25 В; величина потерь напряжения (ΔU); начальный боковой зазор ($S_{\text{бок}}$) на границе окончания инструмента. Ключевым показателем качества комбинированной прошивки, который принимается во внимание при оценке технологичности процесса, является средняя скорость комбинированной обработки ($V_{\text{срк}}$).

$$V_{\text{срк}} = \left[\frac{(V_0 + V_{\text{уст}})}{2} L_{\text{пр}} + V_{\text{уст}}(L - L_{\text{пр}}) \right] \frac{1}{L} = \frac{L_{\text{пр}}}{2L} (V_{\text{ко}} - V_{\text{уст}}), \quad (10)$$

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.

Для обеспечения необходимой минимальной шероховатости поверхности, которая гарантирует требуемое качество готового изделия, необходимо правильно определить скорость подачи инструмента (V_k) в процессе комбинированной обработки. Данный параметр рассчитывается с помощью уравнения (11), которое применяется для определения скорости анодного растворения на завершающей стадии обработки. В случае существенного расхождения полученных значений рекомендуется провести корректировку результатов, первоначально рассчитанных по уравнению (10):

$$V_k = \frac{\eta \alpha \chi (U - \Delta U)}{\gamma S_T}, \quad (11)$$

где S_T – торцевой зазор. В начале процесса обработки $S_T = 0,05 \div 0,1$ мм, после углубления на установившемся режиме $S_T = 0,25 \div 0,3$ мм, что объясняется ухудшением условий очистки зазора механическим действием жидкой струи и наличием в нем большого количества токопроводящих продуктов электроэрозионной обработки, увеличивающих рабочий межэлектродный промежуток. Для глубины обработки большей $L_{пр}$ здесь не требуется рассчитывать среднюю скорость, достаточно найти подачу инструмента на установившемся режиме.

Важным критерием качества изделия при выполнении комбинированной прошивки отверстий в данной рабочей среде выступает параметр шероховатости поверхности (R_{zk}). При его оценке необходимо учитывать процесс выравнивания микронеровностей между лунками, которые образуются под воздействием теплового импульса, а также их последующее сглаживание благодаря локальному химическому анодному растворению материала.

$$R_{zk} = R_z - \left(\sqrt{2\eta \frac{\alpha}{\gamma} \chi (U - \Delta U) \frac{R_{zk}}{V_k} + S_0^2} - S_0 \right), \quad (12)$$

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

$$R_z = K_n \cdot A_u^p. \quad (13)$$

В (13) K_n – экспериментальный коэффициент комбинированной обработки (для базовой рабочей среды $K_n = 10 \div 20$); A_u – энергия импульса; P – показатель степени (для комбинированного процесса $P \approx \frac{1}{3}$); S_0 – начальный зазор, определяется экспериментально для каждого вида рабочей среды по нижнему значению пробойного напряжения. При комбинированном процессе прошивки в базовой рабочей среде $S_0 = 0,05 \div 0,1$ мм.

Анализ результатов показывает, что комбинированная обработка обеспечивает более низкую шероховатость поверхности в сравнении с чисто электроэрозионной обработкой. Такое улучшение связано с особыми условиями формирования микронеровностей под действием импульсного тока и созданием модифицированного слоя (Т). Поскольку механизмы формирования этих характеристик имеют схожую природу, их можно использовать для вычисления предельного значения шероховатости при заданной скорости подачи инструмента (V_k) в процессе комбинированной обработки с применением базового состава рабочей среды. Для расчета глубины модифицированного слоя (Т) необходимо учитывать всего два параметра: коэффициент глубины лунки (K_n) и коэффициент толщины измененного слоя (K_T) после воздействия импульсного тока. Эти коэффициенты позволяют точно определить характеристики модифицированного слоя, что важно для оптимизации процесса обработки:

$$T_k = \frac{K_T}{K_n} R_{zk}. \quad (14)$$

Используя данные о высоте микронеровностей, возможно рассчитать прогнозируемое влияние на усталостную прочность материала (σ_{-1}) после его обработки комбинированным способом в различных рабочих средах. При этом для учета данного влияния применяется универсальный экспериментальный коэффициент A , значения которого представлены в работе для каждой из рассматриваемых рабочих сред:

$$\sigma_{-1} = A \cdot R_a^\alpha. \quad (15)$$

Полученные в работе 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 комбинированного варианта, что позволило при анализе сравнительных испытаний исключить дополнительные дорогостоящие и длительные усталостные испытания для обоснования выбора или при проектировании новых рабочих сред.

Результаты анализа для подтверждения правомерности моделирования на базе теоретических положений делового конфликта доказывают, что предложенное выделение расчетных параметров для всех видов комбинированной обработки с указанными рабочими средами достаточно полно совместимо с предлагаемыми к рассмотрению вариантами обработки и пригодно для сравнения и оценки технологичности выполненных операций. Если применить для рассматриваемого случая установленные в работе количественные оценки, где базовому варианту присваивался уровень «10», то для изучаемых 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 конкурентности 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 углеводородов) 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 скоростной обработке на обратной полярности не обеспечивалось получение требуемого качества поверхностного слоя (граничное условие модели) и нарушались прочностные характеристики.

В качестве примера использования КМО с обоснованными составами рабочих сред на рисунке 2 приведены форсунки, прошивка отверстий в которых выполнялась комбинированными методами в различных рабочих средах.

Для форсунок, установленных в едином блоке (а, б на рисунке 2) проточная часть имеет одинаковую форму и размеры с диаметром каналов в пределах миллиметра. На рисунке 2, г показана проточная часть, где аналогичные каналы имели различные углы относительно оси детали, но постоянный (в пределах допуска) диаметр каналов. При экспериментах комбинированная обработка выполнялась в базовой рабочей среде, состав которой рассчитан и подтвержден при испытаниях КМО в других рабочих средах.

Предложенная в работе модель позволяет проектировать перспективные комбинированные технологические процессы с использованием рабочих сред с различным агрегатным состоянием и составом, что открывает возможность управлять физическими характеристиками в зависимости от требований заказчиков наукоемкой продукции. На основании опыта выполнения операций правомерность применения модели доказана на примере выполнения технологической операции прошивания трактов в форсунках различной геометрии для подачи топлива в зону горения, востребованных большими тиражами и обеспечивающих 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 рассогласований, выявленных на этапах проектирования или при реализации в процессе внедрения КМО в серийное производство.

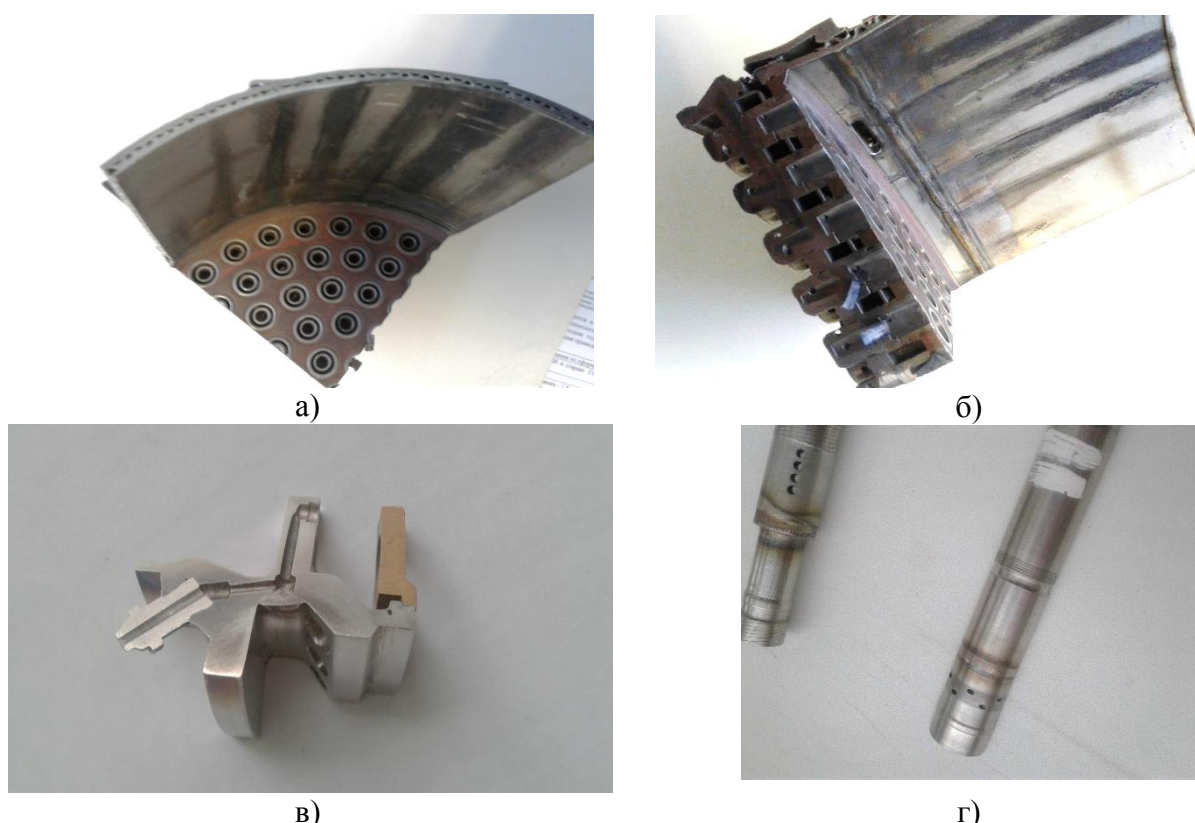


Рисунок 2 – Элементы проточной части и форсунки жидкостных двигателей: а) часть огневого диска с форсунками; б) форсунки с тангенциальными каналами в сборке; в) разрез по каналам и струйному осевому отверстию для подачи топлива; г) тангенциальные каналы в форсунке

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, что рассмотрено в главе 4 как создание комбинированных процессов с эффективными рабочими средами. В их числе вакуумирование зоны обработки, использование газов, жидкостей, твердых веществ и их сочетаний.

Для изготовления массово применяемых во многих отраслях машиностроения металлических фильтров используют электронно-лучевые методы прошивки отверстий, где наряду с тепловым концентрированным воздействием электронного луча происходят термические операции на границе отверстия. Здесь учитываются мощность подводимой

энергии, интенсивность термических преобразований, условия выполнения операций. Технология изготовления фильтров на электронно-лучевых установках подробно рассмотрена в литературе, указанной в диссертации. 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. Для этого предложено при прошивке 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 по фотошаблонам, что рассмотрено в главе 5 работы, получены высокие предварительные оценки уровня полезности (глава 3) для дальнейшего исследования процесса.

В общем виде алгоритм проектирования работоспособной технологии изготовления однослойных и многослойных фильтров приведен в диссертации, где предложена численная оценка уровня полезности по модели (1) и технологическим параметрам из главы 3, что позволило обосновать использование технологических рабочих сред для изготовления конкретных видов фильтров (преимущественно металлических многослойных) с учетом выполнения эксплуатационных требований, в частности для авиакосмической отрасли.

В главе 4 рассмотрен материал по упрочнению в различных технологических средах при воздействии тепловой, механической и химической энергии, обеспечивающих получение на металлической рабочей кромке бездефектного поверхностного слоя с формированием локальных участков высокой твердости на месте расположения микротрещин, выходящих на кромку инструмента. Показаны методы расчета траектории перемещения инструмента, упрочняемого в жидком азоте, позволяющие получить высокостойкие режущие кромки.

Проведена оценка энергопотребления процесса упрочнения в жидком азоте, что является базой для отработки производственной технологичности при освоении нового технологического процесса упрочнения инструмента.

Освещены опыт и особенности организации на машиностроительных предприятиях участков для упрочнения кромки режущего инструмента.

Показаны возможность и целесообразность применения исследуемого процесса для медицинского инструмента с целью повышения стойкости и устранения микродефектов, способствующих распространению инфекций.

Разработаны и запатентованы инновационные твердые электролиты, которые демонстрируют значительный потенциал при производстве стандартных деталей с использованием комбинированных технологий и электрического поля как основного воздействующего фактора. Существенным достижением стало создание метода разъединения сборочных элементов путем формирования промежутка между соединяемыми деталями при ограниченном доступе жидкой рабочей среды к зоне обработки. Это позволяет осуществлять локальный сьем излишнего материала в зоне соединения и удалять достаточный слой материала для разборки узлов. Представленная технология открывает широкие возможности для производства сборных конструкций и показывает высокую эффективность при проведении ремонтных работ различных машин.

В главе 5 обоснованы перспективы развития комбинированных методов обработки с эффективными составами и свойствами технологических рабочих сред. Рассмотрены 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 использованием новых рабочих сред и реализация результатов исследований в производство с применением критериев теории технологичности.

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 агрегатным состоянием 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.

Для этого выполнено следующее:

1. На базе принципа полезности по оценке уровня производственной технологичности обосновано 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 $2 \div 3$ мм/мин при традиционной комбинированной обработке до $20 \div 30$ мм/мин, а за счет сокращения времени анодного процесса и величины подтравливания удалось в $2 \div 3$ раза снизить погрешности по контуру и глубине канала, получить высоту микронеровностей менее $R_a = 1,6 \div 3,2$ мкм при допуске в регламентирующей документации – 6,3 мкм.

5. Установлено, что использование импульсного воздействия локального нагрева на жидкую рабочую среду при КМО позволяет управлять интенсификацией анодного процесса и достичь на черновом этапе обработки ускорения процесса до 10 раз. При этом на окончательной стадии комбинированной обработки шероховатость и глубина измененного слоя может быть снижены 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, ремонте сопрягаемых деталей с формированием зазоров, гарантирующих защиту от повреждения мест их стыковки в изделии. При использовании твердых электролитов до 70% сокращается трудоемкость и в несколько раз снижается энергоемкость операции.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. **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.

2. **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.

3. 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.

4. 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.

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

6. 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.

7. 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.

8. Смоленцев, В. П. Упрочнение режущей кромки инструмента в среде азота / В. П. Смоленцев, **А. А. Извеков**, А. В. Норман // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2025. – Т. 21, № 3(243). – С. 131-137. – DOI 10.36652/1813-1336-2025-21-3-131-137. – EDN ECGSKS.

Патенты

9. Патент № 2796389 С1 Российская Федерация, МПК В23Н 5/06, В23Н 5/10, В23Н 9/00. Инструмент и способ комбинированной анодно-механической чистовой обработки теплозащитных многокомпонентных покрытий: № 2022110699: заявл. 19.04.2022: опубл. 22.05.2023 / М. В. Кондратьев, В. П. Смоленцев, **А. А. Извеков**, Т. В. Цымбал ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Воронежский государственный технический университет". – EDN NOAALG.

10. Патент № 2829178 С1 Российская Федерация, МПК В23Н 5/06, В23Р 15/00. Способ изготовления и разделения сборочных элементов детали с гибким металлическим корпусом : № 2023136218 : заявл. 29.12.2023 : опубл. 25.10.2024 / Е. А. Малявин, В. П. Смоленцев, **А. А. Извеков**, И. Г. Стародубцев ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Воронежский государственный технический университет". – EDN ESPVBM.

Зарубежные публикации

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

12. Smolentsev, V. Performance Characteristics of Coatings for Medical Instruments and Equipment / V. Smolentsev, **A. Izvekov**, N. Nenahov // Pharmaceutical Sciences & Analytical Research Journal – 2023, Vol. 3, Issue 1.

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

14. Smolentsev, V. Production of sheet blanks without stamping using disposable templates / V. Smolentsev, **A. Izvekov**, I. Starodubtsev // Pharmaceutical Sciences & Analytical Research – 2024. - Vol. 3, Issue 1.

Публикации в научных сборниках и материалах конференций

15. 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.

16. Портных, А. И. Влияние лазерной обработки титановых сплавов на структуру и механические свойства / А. И. Портных, В. П. Смоленцев, **А. А. Извеков** // Современные технологии производства в машиностроении : МЕЖВУЗОВСКИЙ СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ. Том Выпуск 16. – Воронеж : Издательско-полиграфический центр "Научная книга", 2023. – С. 136-140. – EDN OUFQIT.

17. Скрыгин, О. В. Интенсификация процесса обработки путем кавитации рабочих сред / О. В. Скрыгин, **А. А. Извеков**, М. Г. Поташников // Современные технологии производства в машиностроении : Сборник научных трудов / Редколлегия: В.Г. Грицюк [и др.]. Том Выпуск 15. – Воронеж : Издательско-полиграфический центр "Научная книга", 2022. – С. 10-19. – EDN WALXWT.

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

19. 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.

Подписано в печать 05.06.2025

Формат 60x84x16. Бумага для множительных аппаратов

Усл. печ. л. 1,0. Тираж 60 экз. Заказ № 126

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»

394006, Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84