

На правах рукописи

САФОНОВ Сергей Владимирович

**МЕТОДОЛОГИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ
КОМБИНИРОВАННЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ
МОДИФИКАЦИИ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ИЗДЕЛИЙ**

Специальность: 05.02.08 – Технология машиностроения

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Рыбинск – 2018

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет» на кафедре «Технология машиностроения».

Научный консультант: доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры «Технология
машиностроения» ФГБОУ ВО «Воронежский
государственный технический университет»
Смоленцев Владислав Павлович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Технология
машиностроения» ФГБОУ ВО «Донской
государственный технический университет»
Тамаркин Михаил Аркадьевич

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры «Техническая механика и
детали машин» ФГБОУ ВО «Саратовский
государственный технический университет
имени Гагарина Ю.А.»
Бочкарев Петр Юрьевич

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры «Технология
транспортного машиностроения и ремонта
подвижного состава» ФГБОУ ВО
«Российский университет транспорта (МИИТ)»
Евсеев Дмитрий Геннадьевич

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный
технический университет»

Защита состоится «22» июня 2018 г. в 12 часов на заседании
диссертационного совета Д 212.210.01 ФГБОУ ВО «Рыбинский
государственный авиационный технический университет имени П.А.
Соловьева»

по адресу: 152934, г. Рыбинск Ярославская область, ул. Пушкина, 53, РГАТУ.
С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Рыбинский
государственный авиационный технический университет имени
П.А.Соловьева» и на сайте www.rsatu.ru.
Автореферат разослан «21» марта 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
д-р техн. наук, доцент

И.В. Надеждин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Одним из магистральных направлений развития машиностроения является управление процессом формообразования поверхностного слоя с учетом эксплуатационных требований к изделиям. В технике достаточно часто к деталям машин предъявляют технические условия, выполнение которых при традиционных технологиях неосуществимо. Так для летательных аппаратов необходимо иметь высокую прочность объектов при минимальной массе, свойственной, как правило, легким сплавам, имеющим меньшие, чем у стали, прочностные характеристики. Такие же взаимоисключающие требования имеют место при использовании жаропрочных материалов. Известные исследования показывают, что при эксплуатации изделий механические характеристики, в том числе усталостная прочность материалов, в значительной мере зависят от состояния и свойств поверхностного слоя, поэтому обоснованный выбор и проектирование технологических процессов получения изделий со свойствами, наиболее полно отвечающими условиям эксплуатации изделий, является актуальной проблемой, решение которой отвечает государственным программам России. Подобные вопросы на государственном уровне исследуются учеными всех промышленно развитых стран. Научными школами Москвы, Санкт-Петербурга, Воронежа, Волгограда, Ростова-на-Дону, Казани, Курска, Брянска, Рыбинска, Тулы, Перми, Самары, Уфы и других городов страны создан задел по созданию нового научного направления - технологического управления повышением эксплуатационных характеристик изделий за счет изменения или создания поверхностных слоев путем открытия, разработки и выбора технологических процессов, формирующих такие слои в нужном направлении. Однако в настоящее время отсутствует единый механизм адаптивного выбора и методология разработки технологических процессов для формирования эксплуатационных свойств поверхностных слоев путем научно обоснованного сочетания воздействий в едином процессе. Результаты наших исследований создают изготовителю доказательную базу для согласования решений при отработке технологичности наукоемких изделий на этапе их освоения и ускоренного запуска в производство, что является актуальным для современного машиностроения.

Работа выполнялась в соответствии с постановлением Правительства РФ №2164-П «О проведении государственной программы «Мобильный комплекс» (раздел «Техническое перевооружение»), с федеральной целевой программой «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009-2013 гг.» (раздел 1.2.1 «Проведение поисковых научно-исследовательских работ по направлению «Ракетостроение») и научным направлением ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет» по плану ГБ НИР №2010.15 «Наукоемкие технологии в машиностроении, авиастроении и ракетно-космической технике».

Целью работы является создание методологии проектирования комбинированных технологических процессов модификации поверхностного слоя для повышения эксплуатационных показателей путем оптимального выбора из ранее освоенных или разрабатываемых способов для достижения требований, заданных разработчиком на этапе отработки технологичности осваиваемых изделий.

В работе поставлены и решены следующие **задачи**:

1 Создание системы оптимального выбора и проектирования технологических способов для модификации поверхностных слоев и видов покрытий с учетом технических, организационных и экономических ограничений.

2 Разработка методологии проектирования новых комбинированных технологических процессов для получения поверхностных слоев без дефектной составляющей за счет модификации свойств и изменения геометрии поверхностных слоев с требуемыми эксплуатационными характеристиками для ответственных изделий, в том числе полученных с использованием прототипирования.

3 Формирование механизма выбора и разработки комбинированных технологических процессов на этапе отработки технологичности осваиваемых изделий путем модификации свойств и изменения геометрии поверхностного слоя с учетом заданных эксплуатационных требований к изделиям.

4 Разработка механизма образования модифицированных слоев и оптимизация их свойств с учетом эксплуатационных требований.

5 Создание новых и реализация известных способов и устройств для проектирования комбинированных технологических процессов модификации свойств поверхностного слоя деталей с целью достижения требуемых эксплуатационных свойств изделий.

6 Формирование для технологов необходимой доказательной базы для согласования результатов отработки технологичности создаваемых и осваиваемых в производстве изделий.

7 Анализ результатов внедрения комбинированных технологических процессов и разработка перспективных направлений исследований по их проектированию по прогнозу создания конкурентоспособных изделий перспективной техники.

Научная проблема. Установление ранее неизвестных эффективных связей между эксплуатационными требованиями к высоконагруженным изделиям и созданием технологии реализации эксплуатационных требований в перспективных объектах промышленной продукции путем модификации свойств и изменения геометрических размеров поверхностного слоя на материалы с анизотропными характеристиками, сочетание которых позволяет повысить эксплуатационные показатели и разработать комбинированные технологические процессы изготовления изделий нового поколения с обеспечением технического уровня, согласованного путем отработки технологичности с заказчиком и разработчиком продукции.

Научная новизна

1 Сформулирован применительно к технологии машиностроения принцип полезности, открывающий возможность разработать систему критериального выбора и создания новых технологических способов и средств для уже имеющихся и вновь разрабатываемых комбинированных технологий для формирования модифицированного поверхностного слоя, обеспечивающего достижение необходимых эксплуатационных характеристик изделий.

2 Разработаны концепция, принципы и методология проектирования комбинированных технологических процессов формирования поверхностного слоя для изготовления перспективных изделий с высокими эксплуатационными характеристиками, затребованными заказчиком и заданными разработчиком, путем сочетания в едином технологическом процессе возможных физических воздействий для модификации поверхностных слоев материалов и нанесения покрытий на детали наукоемких объектов машиностроения.

3 Сформирован механизм выбора согласованных в процессе отработки технологичности технологических способов для стабильного получения качественных поверхностных слоев за счет комбинированного управляемого воздействия технологических приемов на материал детали с учетом условий эксплуатации изделий.

4 Разработаны математические модели, описывающие процесс формообразования качественных поверхностных слоев путем их модификации для достижения требуемых разработчиком эксплуатационных показателей изделий.

5 Разработана методология автоматизированного проектирования комбинированных технологических процессов с наложением электрического поля для изготовления изделий с поверхностным слоем, обеспечивающим требуемые эксплуатационные показатели, устанавливаемые при отработке технологичности в процессе освоения изделий нового поколения техники, наиболее полно отвечающего эксплуатационным требованиям и запросам разработчиков.

Практическая значимость

1 Создание методологии разработки комбинированных технологических процессов модификации поверхностного слоя изделий и формирование для технологов на стадии отработки технологичности осваиваемой продукции научно обоснованной системы назначения известных и путей создания новых технологических способов, обеспечивающих получение требуемых эксплуатационных показателей на изделиях, разрабатываемых Воронежским АО «Конструкторское Бюро Химавтоматики» и выпускаемых ВМЗ – филиал ФГУП «ГКНПЦ им. М.В. Хруничева», а также на Воронежском станкостроительном заводе (ООО ПФК «ВСЗ-ХОЛДИНГ»), с реальным экономическим эффектом.

2 Создание и внедрение новых комбинированных способов и устройств (на уровне изобретений) для модификации свойств поверхностного слоя и изменения параметров покрытий, проектирования технологических процессов, включая прототипирование, обеспечивающих требуемые эксплуатационные характеристики деталей.

3 Обоснование использования булевых переменных для разработки методологии выбора и проектирования комбинированных технологических процессов с управляемым уровнем физических воздействий на формирование поверхностного слоя путем модификации свойств материала с целью достижения показателей, требуемых при эксплуатации создаваемых перспективных изделий.

4 Обоснование приоритетной области использования разработанных комбинированных процессов для получения высокоресурсных изделий, сочетающих низкие эксплуатационные затраты с высокими прочностными и защитными характеристиками путем модификации свойств, нанесения и удаления поверхностных слоев с достижением требуемых эксплуатационных показателей.

5 Создание необходимой научно обоснованной доказательной базы для ускоренной отработки производственной технологичности на этапах освоения и запуска в производство создаваемых изделий на примерах авиакосмической техники и станкостроения.

6 Разработка рекомендаций по выбору и созданию средств технологического оснащения при проведении этапов подготовки производства перспективной наукоемкой конкурентоспособной техники.

Методы и достоверность исследований. При построении работы использовались теоретические положения классических закономерностей в области технологии машиностроения, отработки технологичности изделий, теории электрических методов обработки, известные закономерности проектирования комбинированных технологических воздействий на основе булевых переменных, теоретические принципы подобия в технике, критериальный анализ для выбора воздействий, наиболее полно отвечающих запросам потребителей и разработчиков перспективной продукции машиностроения.

Достоверность результатов подтверждается получением воспроизводимых результатов при моделировании процессов, применением современных технических средств, хорошим совпадением данных различных исследователей, положительными результатами использования комбинированных технологий в процессе их освоения и внедрения в производство на предприятиях различных отраслей машиностроения.

Основные положения, выносимые на защиту

1 Обоснование и создание применительно к технологии машиностроения принципа полезности для сравнения уровня влияния на объект модификации свойств и геометрических показателей покрытия, позволяющего синтезировать комбинированные воздействия на материал с разнородными эксплуатационными характеристиками.

2 Теория критериальной оценки уровня единичного и комбинированного воздействий с применением булевых переменных, позволяющих создать технологии с комбинацией разнородных воздействий, усиливающих их положительное и устраняющих (или снижающих) негативное влияние на результирующие эксплуатационные показатели изделий с модифицированным и геометрически измененным поверхностным слоем.

3 Методология разработки комбинированных технологических процессов модификации свойств и изменения параметров покрытий поверхностного слоя с оценкой уровня их эффективности по критериям полезности, что становится основой для создания доказательной базы при отработке технологичности создаваемой техники.

4 Научное обоснование нового подхода в технологии нанесения покрытий, как составляющей комбинированного процесса при изготовлении деталей прототипированием с устранением основного недостатка ранее применяемого процесса – неравномерности эксплуатационных показателей поверхностного слоя металлических изделий.

5 Обоснование возможностей повышения эксплуатационных характеристик изделий без нарушения исходной геометрии путем поверхностных преобразований химическими, механическими, термическими, физическими воздействиями с адаптацией результатов воздействий под эксплуатационные требования к объектам производства.

6 Применение в новых комбинированных технологических процессах ранее полученных и собственных способов и устройств, защищенных охранными документами и адаптированных под эксплуатационные требования, заданные заказчиком, разработчиком продукции и примененные изготовителем по согласованию с ними после отработки технологичности изделия.

7 Результаты широкого внедрения в различных отраслях машиностроения разработанных комбинированных технологий и создание методологии автоматизированного проектирования новых технологических процессов, способствующих созданию конкурентоспособной техники с высокими эксплуатационными показателями.

Апробация работы. Основные результаты работы обсуждались и докладывались на 32 международных научно-технических мероприятиях, в том числе на III-VII международных научно-технических конференциях ССП-2010-2017 (г. Воронеж, 2010-2017 гг.); VIII международной конференции молодых специалистов организаций ракетно-космической, авиационной и металлургической промышленности России (г. Королев, НОУ ДПО «ИПК Машприбор», 2010 г.); XII всероссийской научно-технической конференции и школе молодых ученых, аспирантов и студентов «Авиакосмические технологии» (АКТ-2011, г. Воронеж, ОАО «ВАСО», 2011 г.); XVII Макеевских чтениях – Российской научно-технической конференции, посвященной 87-летию со дня рождения академика В.П. Макеева (г. Воронеж, ОАО «КБХА», 2011 г.); VII международной научно-практической

конференции «Перспективные разработки науки и техники» (Польша, г. Przemysl, 2011 г.); XV международной научно-технической конференции «Фундаментальные проблемы техники и технологии» - «Технология-2012», посвященной 120-летию со дня рождения Н.Н. Поликарпова (г. Орел, «Госуниверситет – УНПК», 2012 г.); IV международной научно-технической конференции «ТМ-2012» (г. Рыбинск, РГАТУ, 2012 г.), V International Conference «Science and Education», 2014 г.; VII международной научно-технической конференции «ТМ-2015» (Брянск, БГТУ, 2015 г.); международной научно-технической конференции «Наукоемкие и волновые технологии в машиностроении, металлообработке и других отраслях» (Ростов-на-Дону, ДГТУ, 2015 г.); III международной научно-технической конференции «Иннтехмаш-2015» (Белоруссия, Полоцк, 2015 г.); V международной научно-технической конференция «МТЕТ-2016» (Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2016); международном научном симпозиуме технологов-машиностроителей (Ростов-на-Дону, ДГТУ, 2016 г.); X международной научно-технической конференции «Современные проблемы машиностроения» (Томск, ТПУ, 2016 г.); международной научно-технической конференции «ICMTMTE 2017» (Севастополь, СевГУ, 2017 г.); IX международной научно-технической конференции «ТМ-2017» (Волгоград, ВолгГТУ, 2017 г.); международном научном симпозиуме технологов-машиностроителей «Виброволновые процессы в технологии обработки деталей высокотехнологичных изделий» (Ростов-на-Дону, ДГТУ, 2017 г.); международной научно-технической конференции «Лучшие технологические школы России» в рамках IV международного технологического форума «Инновации. Технологии. Производство» (Рыбинск, РГАТУ им. П.А. Соловьева, 2017 г.).

Реализация и внедрение результатов работы. Результаты работы прошли проверку в цехах ВМЗ – филиала ФГУП ГКНПЦ им. М.В. Хруничева и внедрены в серийное производство для ракетных двигателей, а также на НПП «Гидротехника», ФПК «ВСЗ – Холдинг», АО «Турбонасос», АО «Конструкторское Бюро Химавтоматики» с реальным экономическим эффектом. Материалы проведенных исследований используются в учебном процессе Липецкого государственного технического университета, Воронежского государственного технического университета, Юго-западного государственного университета, Брянского государственного технического университета, Донского государственного технического университета.

Публикации. По теме диссертации опубликована 61 научная работа. В их число входят 27 публикаций в изданиях по списку ВАК РФ и 4 в изданиях, входящих в международную базу цитирования Scopus. Соискателем опубликовано 4 монографии, получены 6 патентов.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 6 глав, выводов, приложений, списка литературы из 224 наименований. Работа изложена на 321 страницах с 82 рисунками и 29 таблицами.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность решаемой проблемы, сформулированы цель и задачи исследования, изложены основные положения, выносимые на защиту, показаны научная новизна и практическая значимость результатов работы.

В первой главе приведен анализ технологических воздействий на эксплуатационные характеристики высоконагруженных изделий. Рассмотрены основополагающие работы научных школ Москвы, Санкт-Петербурга, Воронежа, Волгограда, Ростова-на-Дону, Казани, Курска, Брянска, Рыбинска, Тулы, Перми, Самары, Уфы и других городов страны, а также зарубежных ученых для исследуемой области знаний. В результате анализа установлено:

1 Отсутствуют сведения о принципах и способах оценки эффективности применения совместных воздействий различных физических явлений применительно к поверхностному слою.

2 Известные методы оценки потенциалов индивидуального и комбинированного технологического воздействия не учитывают заданных эксплуатационных требований для конкретных изделий, что затрудняет проектирование эффективных комбинированных технологических процессов для формирования модифицированного поверхностного слоя.

3 Не установлено наличие и применение научно обоснованной системы критериальной оценки уровня полезности в машиностроении, что ограничивает количество применяемых эффективных сочетаний воздействий в проектируемых технологиях.

4 Не выявлены показатели численной критериальной оценки уровня полезности, а имеющиеся рекомендации в большей степени отражают качественные показатели и, как правило, учитывают только единичные воздействия, что не позволяет спроектировать комбинированные технологии для формирования поверхностного слоя, стабильно обеспечивающего эксплуатационные показатели изделий, близкие к предельно достижимым.

5 Отсутствует методология разработки комбинированных технологических процессов, основанных на совмещении известных и создаваемых способов и устройств, что препятствует интенсивному повышению эксплуатационных показателей наукоемких изделий нового поколения техники.

Анализ состояния вопроса позволяет сформулировать цель, научную проблему и задачи работы, приведенные во введении.

Во второй главе изложено научное и экспериментальное обеспечение исследований для достижения поставленной цели.

Выдвинуты и обоснованы рабочие гипотезы, создающие базу для построения работы:

1 Ряд эксплуатационных характеристик изделий определяется качеством поверхностного слоя основных деталей конструкции и зависит от результативности применяемых технологий модификации свойств и изменения геометрии покрытия материала, а также уровня их негативного воздействия на показатели качества объектов обработки.

2 Эксплуатационные показатели металлических изделий могут быть повышены путем внешнего и внутреннего адаптивного воздействия на свойства поверхностного слоя материала детали. При этом имеется возможность сохранить и улучшить исходные показатели заготовок.

3 Формализация связей между технологическими возможностями комбинированных методов повышения качества поверхностного слоя и закладываемыми разработчиками в конструкцию эксплуатационными требованиями, согласуемыми в процессе отработки технологичности, позволяет объективно оценить эксплуатационные показатели изделия после модификации свойств изменения геометрии поверхностного слоя, обосновать его место в конструкции и создать методологию разработки и автоматизированного проектирования комбинированных технологических процессов с наиболее полным использованием потенциальных эксплуатационных возможностей деталей с модифицированным поверхностным слоем.

4 Система повышения эксплуатационных показателей изделий путем улучшения свойств их поверхностного слоя должна базироваться на принципах полезности, подобия технологических систем и критериальной оценке на этапе отработки технологичности изделия в условиях эксплуатации объектов при адаптации технологических режимов к условиям использования создаваемой техники.

5 Разработанные и создаваемые технологии модификации поверхностного слоя могут служить базой для ускоренного согласования решений на этапе отработки технологичности и достижения уровня, отвечающего требованиям наукоемких производств на стадиях проектирования, изготовления и эксплуатации изделий, в частности в авиакосмической отрасли, где они находят широкое применение и определяют техническое состояние создаваемой продукции новых поколений.

На базе приведенных гипотез обоснован и разработан показатель критерия полезности (ПКП), критериально оценивающий положительные и негативные стороны как индивидуальных, так и комбинированных воздействий в проектируемых технологических процессах формирования поверхностного слоя для достижения наиболее полного обеспечения требуемых эксплуатационных показателей изделий и ускорения технологической подготовки производства под осваиваемую технику.

Разработан алгоритм решения поставленных задач и достижения цели работы, где рассматривается не только последовательность этапов, но и закладываются основы автоматизации проведения исследований, что

позволяет сократить сроки отработки технологичности, подготовки производства под освоение новой техники, выбора и разработки рациональных комбинированных процессов, обеспечивающих достижение требуемых эксплуатационных показателей изделий.

В третьей главе рассмотрен механизм технологического воздействия на поверхностный слой с целью управления эксплуатационными характеристиками изделий. Выполнена критериальная реализация использования принятого принципа полезности и моделирование процесса выбора или разработки новых воздействий с применением булевых переменных, открывающих возможность оптимизации единичных или комбинированных воздействий в технологическом процессе формирования поверхностного слоя.

В основе системы лежит критерий полезности, который представляет обобщенный показатель эффективности применения внешнего и внутреннего воздействия на эксплуатационные характеристики деталей с измененным поверхностным слоем. Изменения всегда направлены в сторону повышения характеристик детали, но нельзя исключать, что некоторые воздействия способны, наряду с достоинствами, вызывать снижение отдельных показателей (например, экономических) в процессе изготовления объекта производства, что может потребовать разработки новых технологических решений, результативность которых оценивается с использованием принципа полезности.

Реализация принципа полезности возможна через векторную критериальную оценку воздействий на поверхностный слой, где определяющую роль играют комбинированные технологические методы с векторной оценкой, как индивидуальных воздействий, так и их комплексов.

В технике используют 3 вида показателей уровня полезности технологических воздействий на эксплуатационные характеристики изделий: заданный разработчиком создаваемого изделия из условия получения конкурентоспособной продукции; достигнутый в промышленности уровень такого показателя; теоретически или практически обоснованный предельный уровень полезного воздействия, достигнутый теоретиками или технологами, с возможностью реализации его в производстве. Требуемые количественные показатели критериальной оценки представляет разработчик в соответствии с требованиями заказчика нового изделия. Наиболее привлекательным для заказчика и разработчика новой продукции является предельный показатель, но для его использования требуется оценить потребность для достижения цели в материальных и временных затратах на разработку и освоение. Следует также учитывать специфику выпуска наукоемкой техники (особенно для авиакосмической отрасли), где происходит постоянная замена объектов производства, и время на технологическую подготовку к запуску нового изделия ограничено.

Для критериальной оценки уровня полезности введены следующие обозначения: $\Pi_{p1}, \Pi_{p2}, \dots, \Pi_{pn}$ – показатели заданных разработчиком эксплуатационных характеристик перспективного изделия, зависящие от состояния их поверхностного слоя; n – количество значимых показателей, обеспечивающих требуемые эксплуатационные характеристики изделия; $\Pi_{o1}, \Pi_{o2}, \dots, \Pi_{on}$ – достигнутые численные показатели (в дальнейшем показатели) на современном уровне развития технологии; $\Pi_{\partial1}, \Pi_{\partial2}, \dots, \Pi_{\partial n}$ – показатели достижимых перспективных технологических способов и средств повышения эксплуатационных характеристик за счет совершенствования поверхностного слоя; $\bar{K}_{o1}, \bar{K}_{o2}, \dots, \bar{K}_{on}$; $\bar{K}_{\partial1}, \bar{K}_{\partial2}, \dots, \bar{K}_{\partial m}$ – векторные показатели критерия полезности (ПКП) технологического воздействия на достигнутый и достижимый эксплуатационный показатель, определяемый свойствами поверхностного слоя; m – количество технологических воздействий, требуемых для совершенствования эксплуатационных характеристик изделий за счет изменения их поверхностных свойств; $\vec{K}_1, \vec{K}_2, \dots, \vec{K}_m$ – положительные показатели критерия полезности (ПКП), получаемые от применения технологических средств совершенствования поверхностного слоя при воздействии на достигнутый уровень эксплуатационного показателя изделия; $\bar{K}_1, \bar{K}_2, \dots, \bar{K}_m$ – показатели критерия полезности (ПКП), оценивающие возможность снижения эксплуатационных показателей от применения технологического воздействия на поверхностный слой изделия.

$$\vec{K}_1, \vec{K}_2, \dots, \vec{K}_m \rightarrow \max, \quad (1)$$

$$\bar{K}_1, \bar{K}_2, \dots, \bar{K}_m \rightarrow \min, \quad (2)$$

В общем виде критерии полезности имеют вид:

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

Результатом оценки полезности различных воздействий будут критерии, приведенные в (1), (2) и (3), где учтено как положительное изменение технологических решений (условие (1)), так и негативное изменение технико-экономических показателей (условие (2)), в том числе с учетом взаимного воздействия факторов $\vec{K}_1, \bar{K}_1, \dots, \vec{K}_n, \bar{K}_n$. Однако во всех случаях граничные условия (3) должны выполняться.

Для разработки концепции выбора или обоснования необходимости проектирования нового технологического процесса требуется применение и создание новых методов и средств, учитывающих эксплуатационные показатели, достигаемые за счет модификации свойств, изменения характеристик поверхностного слоя или возможного одновременного изменения его толщины.

Управление процессом назначения и выбора методов модификации или изменения геометрии слоя может выполняться с использованием теории подобия и нестрогого предпочтения. Для критериальной оценки предпочтительного выбора средств внешнего воздействия следует использовать заданные заказчиком и конкретизированные разработчиком значимые эксплуатационные показатели, согласованные в процессе отработки технологичности создаваемого изделия.

Если $P_{oi} \geq P_{pi}$, то для i -го технологического воздействия принимается $P_{pi} = P_{oi}$ и согласовывается с разработчиком возможность снижения заданных эксплуатационных показателей до уровня P_{oi} . Здесь может быть несколько вариантов:

- согласиться с использованием технологических воздействий для достижения меньшего эксплуатационного уровня и внести новый показатель в техническое задание на создаваемое изделие;

- предоставить технологам время на разработку новых методов и средств для совершенствования поверхностного слоя и достижения первоначально заданного уровня эксплуатационных показателей изделий;

- использовать комбинированные технологии, учитывающие при одновременном воздействии нескольких способов на показатели слоя.

Изучаемую выборку действия внешних воздействий на состояние поверхностного слоя можно ранжировать по одному (главному, генеральному) или нескольким эксплуатационным показателям.

В основу обобщенной модели положена научная концепция о возможности критериального выбора по ПКП совместимых последовательных технологических воздействий на поверхностный слой с помощью принципа полезности.

Начальные условия для построения модели следующие: наличие исследованных методов и средств модификации поверхностного слоя и изменения его толщины для получения требуемых эксплуатационных свойств изделий; возможность разработки новых технологических процессов модификации и изменения толщины покрытия для оптимизации характеристик изделий в допустимые сроки их создания. Здесь по принципу полезности и с помощью булевых переменных выполняется анализ достижимых технологических возможностей создаваемого способа, а его возможности на повышение эксплуатационных свойств оценивают с использованием булевых переменных, дающих возможность установления связей между технологическими показателями комбинированных способов воздействия и эксплуатационными показателями изделия по рассматриваемому параметру.

Граничные условия включают: предельные требуемые показатели эксплуатационных свойств изделий с модифицированным поверхностным слоем; обоснованность финансовых и временных затрат на создание новых

процессов; возможность и целесообразность использования и приобретения требуемых технологий на стороне; степень собственной правовой защиты требуемых способов и устройств, допустимые затраты на экологию и защиту окружающей среды и оценку выполнения других ограничений, как правило, заложенных в документации.

Моделирование может выполняться в виде задачи многокритериальной оптимизации с булевыми переменными. Моделирование формируется на критериях, изложенных ранее.

Конечный результат (R) синтеза (i) всех технологических воздействий на изделие (U)

$$R \subset \otimes U_n, n \in \Pi_p, \quad (4)$$

где \otimes – декартово произведение, $i = \overline{0, \Pi_{pi}}$ – множество возможных методов модификации поверхностного слоя для заданного изделия; Π_p – параметр конкретного изделия U , заложенный разработчиком, где главное воздействие оказывает Π_{pi} , где Π_{pi} – заданный показатель полезности i -го воздействия; R – результирующий показатель комбинации всех воздействий; n – количество применяемых воздействий.

Технологический процесс может быть задан через множества (m_i)

$$i \subset \otimes \{m_i; i \in m\}, \quad (5)$$

где $i = \overline{0, m}$ – множество внешних воздействий, реализуемых в возможных технологических процессах модификации и покрытий поверхностного слоя; m – количество перспективных реально достигаемых технологических воздействий на поверхностный слой для повышения эксплуатационных показателей изделия.

Методология создания технологических способов процесса модификации свойств поверхностного слоя для обеспечения требуемых эксплуатационных показателей строится на обобщающей закономерности

$$\langle R_i, K_{di} \rangle = \arg \text{ext } P\{\Psi \subset (R, K) \otimes \Pi_{di}\} = \Pi_{pi}, i \in n, \quad (6)$$

где P – вероятность положительного воздействия ПКП ($\overrightarrow{K_{oi}}; \overrightarrow{K_{di}}$) оценивается по принципу полезности; Ψ_i – функция, характеризующая связь между технологическим воздействием и главным эксплуатационным показателем, зависящем от характеристик поверхностного слоя.

Методология проектирования технологии выполняется с учетом возможностей достигнутых и достигаемых единичных или комбинированных одновременных воздействий в несколько этапов:

1 Определение количества допустимых решений (\overline{R}) с учетом принятых ограничений и начальных условий (\overline{T} – допустимый технологический процесс из совокупности существующих (T)).

$$\overline{R} \in R; \overline{T} \in T \quad (7)$$

2 Сравнительный анализ единичных воздействий

$$\langle \overline{R}_i, \overline{T}_i \rangle \text{ при } \overline{R} \otimes \overline{T} \quad (8)$$

3 Возможность проектирования допустимой технологии (\bar{T}) при комбинированном воздействии несколько факторов.

4. Комбинирование воздействий в допустимых технологиях (\bar{T}) при условии $\bar{K}_{\partial i} \rightarrow \max$; $\bar{K}_{\partial i} \rightarrow \min$ и последовательного изменения эксплуатационных показателей, подчиняющегося законам линейного программирования, где каждый расчет выполняется относительно предшествующего, но не начального, путем перемножения показателя критерия полезности (ПКП) на каждом переходе.

Оценку воздействий выполняют по зависимостям, приведенным в таблице 1.

Таблица 1 – Выбор факторов при проектировании технологий с единичным и комбинированным воздействием

Описание процесса	Вид технологического процесса	
	С главным единичным воздействием	С комбинированным воздействием нескольких факторов
Логические связи	Оценка по главному (генеральному) воздействию	Рассматриваются комбинированные воздействия на заданный эксплуатационный показатель
Зависимости для формализации связей	$\bar{T}_{\partial i} U_i$ при $i = \overline{1, m}$	$i \in \bar{T}_{\partial i} U_i; i = \overline{1, n}$
Критериальный выбор технологий	$i \in (\bar{T}_{\partial 1} U_1 \dots \dots \bar{T}_{\partial m} U_m)$	$i \in (\bar{T}_{\partial 1} U_1 \dots \dots \bar{T}_{\partial m} U_m) > (\bar{T}_{\partial 1} U_i \dots \dots \bar{T}_{\partial m} U_m)$

На следующем этапе создания комбинированного способа и проектирования ТП необходимо обосновать выбор одного главного (генерального) воздействия, закладываемого заказчиком (Π_{∂}) для всего изделия и детально определяемого разработчиком для его составных частей.

Для комбинированного воздействия (таблица 1) требуется упорядочивание как известных (n), так и перспективных (m) воздействий по эксплуатационным показателям. Здесь для каждого главного (генерального) показателя может оказаться несколько сочетаний воздействий, где присутствуют как положительные (\bar{K}_i) так и негативные (\bar{K}_i) показатели критерия полезности (ПКП). После ранжирования воздействий выполняется перебор их комбинаций с учетом ограничений и уровня полезности. После этого создается способ и формируется комбинированный технологический процесс для модификации свойств поверхностного слоя.

Для оценки результатов взаимодействия в комбинированном процессе нескольких факторов может быть использована система

$$\left. \begin{aligned} \delta_{in} &= \text{arc ext } \{ \Pi_{\delta i} \triangleq \Psi_i [f(\delta_{in})] \} \\ \sum_1^n \delta_{in} &= 1, n = \overline{1, n} \\ \sum_1^m \delta_{im} &= 1, m = \overline{1, m} \\ \vec{K}_{\delta i} - \vec{K}_{oi} + n\delta_{in} &\leq n - 1, n = \overline{1, n} \end{aligned} \right\}, \quad (9)$$

где $\Pi_{\delta i}$ – допустимый показатель достижимого уровня воздействия при $\vec{K}_{\delta i} \rightarrow \max$, $\vec{K}_{oi} \rightarrow \min$; Δ – оператор входящих разностей.

Объединение воздействий в группы $n = \overline{1, i}, m = \overline{1, m}$ выполняется с помощью булевых переменных δ_{in} и δ_{im} .

Суммарное воздействие в комбинированном способе обработки может оказывать как положительное, так и отрицательное влияние проектирующего процесса на эксплуатационные показатели.

При разработке методологии проектирования технологических процессов для изменения параметров поверхностного слоя может использоваться несколько приемов:

– если получение требуемого результата возможно при использовании только одного воздействия, заданного разработчиком, для получения эксплуатационного показателя Π_{pi} , то решается задача линейного программирования с попарной оценкой \vec{K}_{oi} , \vec{K}_{oi} и $\vec{K}_{\delta i}$, $\vec{K}_{\delta i}$;

– если имеется необходимость использования для достижения требуемого эксплуатационного показателя комбинации нескольких независимых технологических воздействий, то проектирование комбинированного процесса выполняется по (10), (11).

$$\Pi_{\delta i}(\vec{K}_{\delta i}) > \Pi_{pi}, \text{ если } \Pi_{\delta i} > \Pi_{oi} \quad (10)$$

$$\Pi_{oi}(\vec{K}_{oi}) > \Pi_{pi}, \text{ если } \Pi_{\delta i} \leq \Pi_{oi} \quad (11)$$

Для заданных (Π_p) , достигнутых (Π_o) , достижимых (Π_δ) эксплуатационных показателей требуется соответственно n и m воздействий. Требуемая система может быть сформирована путем выбора, создания способов и проектирования комбинированных технологических процессов (Т) при наибольшем значении показателя критерия полезности при разработке комбинированных процессов по методологии, приведенной в разработанном алгоритме.

В четвертой главе выполнена критериальная оценка получаемых показателей критерия полезности (ПКП) с возможностями воздействия технологических способов на показатели поверхностного слоя и достижение требуемых эксплуатационных свойств. Такую оценку следует использовать для наиболее употребительных технических объектов машиностроения: режущий инструмент, детали основного производства, при ремонте и восстановлении изделий. Рассматриваются несколько уровней полезности:

– первый, оцениваемый показателем критерия полезности \vec{K}_{op} , изменение эксплуатационных показателей от замены ранее используемых и

принятых разработчиком технологий на известные, освоенные в промышленности (Π_o), относительно затребованных разработчиком (Π_p)

$$\overrightarrow{K_{op}} = \frac{\Pi_o}{\Pi_p} \quad (12)$$

Здесь полезность оценивается с учетом степени освоения новых технологий воздействия на поверхностный слой у конкретного производителя.

При этом следует учитывать ограничения, свойственные выбираемому способу в условиях допущения технологии разработчиком для конкретного изделия и промышленного использования его предприятием – изготовителем с учетом ограничений, оцениваемых через $\overrightarrow{K_{op}}$. В этом случае ПКП $\overrightarrow{K_{op}}$ включает оценку ограничений по части затрат (З) на освоение изделия в производство, привлечение результатов исследования и средств разработчика, допустимость сроков разработки способов в пределах периода освоения. Для оценки затрат на реализацию критерия полезности требуется выполнение граничных условий

$$Z_o \leq Z_p; t_o \leq t_p \quad (13)$$

где Z_o – затраты на приобретение (при необходимости) или разработку нужных технологий; Z_p – объемы финансирования, выделяемые заказчиком на освоение рассматриваемых технологических процессов; t_o – временной период, запрашиваемый производителем для перестройки производства под использование предлагаемых процессов; t_p – период времени, ограниченный рамками освоения рассматриваемого процесса, с учетом начала поставки изделий заказчику. В ряде случаев потребуются экономическое обоснование предлагаемых процессов.

– второй уровень дает количественную оценку по показателям критерия полезности с учетом потенциала перспективных разработок, что должно давать существенно большие показатели относительно всех известных воздействий (ПКП $\overrightarrow{K_{op}}$), относительно ранее применявшегося ($\overrightarrow{K_{op}}$)

$$\overrightarrow{K_{op}} = \frac{\Pi_o}{\Pi_p} \text{ при } \overrightarrow{K_{op}} > \overrightarrow{K_{op}} \quad (14)$$

Ограничения для обоснования принципа полезности остаются аналогичными (13).

В качестве примера проведена оценка принципа полезности для металлорежущего инструмента и других средств технологического оснащения.

Были получены количественные значения для расчета ПКП $\overrightarrow{K_{op}}$ и $\overrightarrow{K_{op}}$ в процессе испытания стандартных (у изготовителя) и натуральных (в основном у разработчика) образцов, отработанных по созданным способам для разработанных технологических способов. При обосновании целесообразности принятия нового способа обработки учитывалось влияние

ограничений и негативных явлений, сопутствующих применению известных и перспективных воздействий на поверхностный слой (например, дефицитность материала, его электрофизические свойства, эрозионная стойкость, что необходимо для электродов-инструментов и др.).

Разработана система критериальной оценки полезности технологических воздействий на детали основного производства. Полученные критериальные оценочные показатели являются доказательной базой изготовителя для согласования при отработке технологичности применения комбинированных технологий с целью обеспечения требуемых эксплуатационных показателей. Численные значения эксплуатационных показателей оцениваются в процессе испытаний изделий и их составных частей, как правило, у разработчика, что показано в работе на примерах деталей двигателей летательных аппаратов, работающих в сложных (а часто и в экстремальных) условиях.

В пятой главе даны результаты исследований по повышению эксплуатационных характеристик изделий путем модификации поверхностного слоя для достижения требуемых эксплуатационных показателей. Рассмотрены возможности и перспективы реализации критериальной оценки принципа полезности для формирования поверхностных слоев с требуемыми свойствами. Показано изменение эксплуатационных характеристик изделий путем модификации свойств, нанесения и удаления поверхностного слоя, а также возможности комбинированных методов обработки для формирования слоев, наиболее полно отвечающих требованиям заказчика и разработчика на этапе отработки технологичности изделия. Рассматриваются возможности съема с материала дефектных слоев для восстановления эксплуатационных характеристик изделий.

Технологических воздействий, направленных на достижение заданных эксплуатационных показателей, может быть большое количество, и экспериментально оценить их возможности на этапе отработки технологичности нереально из-за недопустимо длительных сроков выполнения исследований, затягивания сроков подготовки производства новых изделий, проявления сопутствующих негативных факторов. Задачей технолога становится ускоренный и безошибочный выбор по принципу полезности и ПКП рационального варианта технологического процесса для достижения заданных эксплуатационных показателей, согласованных с разработчиком. Здесь может быть несколько вариантов решения:

1) берется за основу уже имеющийся технологический процесс, удовлетворяющий требованиям заказчика. Задача решена, и дальнейших действий по подбору или проектированию процессов не требуется;

2) если освоенные способы и технологические процессы не обеспечивают достижение заданных эксплуатационных показателей, то

требуется разработать новый комбинированный способ и технологический процесс. Тогда необходимо провести по ПКП анализ всех возможных технологических процессов путем критериальной оценки достигнутых показателей относительно требуемых разработчиком для обеспечения главных эксплуатационных требований заказчика. В его основу заложен принцип полезности, который реализуется с помощью алгебры Буля.

Методология выбора и разработки технологических процессов модификации поверхностного слоя включает несколько этапов.

На I этапе критериальный анализ позволяет из известных технологических процессов выбрать те, которые в принципе возможны для рассматриваемой операции.

На II этапе по ПКП сравниваются достигнутые показатели всех рассматриваемых процессов по каждому заданному эксплуатационному показателю. При этом учитываются предельно достигнутые (например, экспериментально или из опыта эксплуатации) показатели каждого известного процесса и показатели, согласованные с разработчиком. Образуется некоторое множество показателей, которые не суммируются, а только сравниваются, и из этого массива в форме матрицы, выбирается группа технологических процессов, наиболее полно обеспечивающих достижение заданного эксплуатационного показателя.

На III этапе уже для этой группы по принципу полезности анализируются отрицательные и ограничительные технико-экономические показатели, на основании чего выбирается один или несколько технологических процессов. Если таких процессов несколько, то вводятся дополнительные условия их использования, как правило, не связанные с заданными эксплуатационными требованиями, например, наличие материально-технической базы предприятия, квалифицированных кадров, и определяется один наиболее рациональный технологический процесс.

В работе представлен алгоритм для обоснования одного или нескольких воздействий для обеспечения требуемых эксплуатационных показателей с учетом ограничений, что позволяет спроектировать технологические процессы для конкретных изделий.

В шестой главе представлена методология разработки комбинированных технологических процессов (ТП) на базе критериального использования принципа полезности. В основу методологии заложены разработанные и приведенные в главе 3 модели управления повышением эксплуатационных свойств путем комбинации технологических воздействий на показатели поверхностного слоя материалов наукоемких изделий.

Кроме эксплуатационных показателей при проектировании ТП учитываются ограничения по параметрам, заданным разработчиком и согласованным с технологами в процессе отработки технологичности. Особенностью методологии является учет использования не только

эксплуатационных показателей заложенных заказчиком и разработчиком, но и критериальной оценки достигнутого и достижимого уровня, основанного на использовании комбинированных способов и устройств, часть которых известна только в виде патентов отечественных и зарубежных ученых. Реализация этих материалов в создаваемых ТП требует оценки целесообразности материальных и временных затрат, так как достижимый уровень эксплуатационных показателей может оказаться полезным только в случае детальной разработки новых способов в пределах заданного периода освоения создаваемых изделий.

Автоматизированная разработка перспективных ТП включает 2 этапа:

1) приведенный в предыдущей главе этап проектирования на стадии технологической подготовки производства, когда на основании принципа полезности и методологии проектирования комбинированных ТП обосновывают выбор рациональных технологических воздействий. Если критерий полезности имеет пониженное значение, то ведут поиск среди известных технологических воздействий, применяемых в промышленности и обеспечивающих положительный показатель критерия полезности. При этом по модели в главе 3 обосновывают выбор наиболее эффективного воздействия, включающего как уровень значимости положительного значения критерия, так и влияние на технологические воздействия негативных последствий, что может быть формализовано по неравенствам алгебры Буля.

Достижимые уровни технологических воздействий, оцениваемые в основном путем сравнения предельно достижимых результатов, заявленных в патентах, с требуемыми, заданными разработчиком, должны осуществляться с учетом генеральных показателей изделий, заложенных в технических заданиях и тактико-технических требованиях к создаваемым объектам с учетом ожидаемых достижений мирового уровня в этой отрасли.

2) Этап детальной разработки ТП применительно к конкретным изделиям. Этот этап выполняется по разработанным и представленным в работе алгоритмам проектирования ТП, которые служат базой для создания комбинированных процессов.

В общем виде методология разработки ТП открывает возможность создания доказательной базы для согласования с разработчиком в процессе отработки технологичности этапов освоения новых изделий с привязкой их к конкретным конструкциям с использованием принятых на первом этапе критериев оценки уровня полезности, что гарантирует оптимизацию ТП по показателю воздействия на поверхностный слой для получения требуемых научно-обоснованных согласованных эксплуатационных показателей.

В работе приведены результаты освоения технологических процессов, спроектированных на базе принципа полезности на примерах создания и применения комбинированных методов обработки.

В качестве примеров в работе рассмотрена модификация свойств поверхностного слоя, путем нанесения или снятия поверхностного слоя.

Исследования выполнялись в основном на деталях постоянно обновляемых изделий авиакосмической техники по принципу полезности с целью обеспечения требуемого главного (генерального) эксплуатационного показателя повышения стойкости и ресурса на примерах использования комбинированных методов обработки.

При освоении новых конструкций авиационных двигателей алюминиевые лопатки компрессора начали заменять на детали из титановых сплавов. Основным методом обработки пера этих деталей остался электрохимический процесс. В новых изделиях используются лопатки повышенной длины с уменьшенным сечением (рис. 1).



Рисунок 1 – Лопатки турбореактивного двигателя из титановых сплавов

Замена материала и изменение размеров детали увеличили электрическое сопротивление при подводе к заготовке технологического тока и вызвали необходимость повышения напряжения с 12-18 В до 30-36 В. Это привело у технологической оснастки (контейнеров с токоподводами) к повышенному износу базовых поверхностей, снижающих установленный срок службы и период работоспособности (работоспособность) технологической оснастки.

Для рассматриваемых деталей контейнера и токоподводов из стали 12Х18Н10Т срок службы снизился с $P_{o1} = 600$ часов до $P_{o1} = 1,9 \div 2,1$ часа и $\vec{K}_{o1} = 300$. Для изготовления опытных партий изделий требуется иметь срок службы оснастки не менее $P_{p1} = 19 \div 21$ часа, для которого $\vec{K}_{op1} = 10$.

На этапе отработки производственной технологичности по принципу полезности и булевым переменным были проанализированы ранее применяемые способы повышения стойкости оснастки. Рассмотрено 6 допустимых решений \vec{R} по (7) и 4 варианта технологических решений \vec{T} по (8)

для модификации свойств поверхностного слоя оснастки без изменения размеров базовых поверхностей: химико-термический способ азотирования; покрытие поверхности хромом (напыление); кадмием, цинком (гальваника); замена материала на металлические и композиционные марки, обладающие высокой устойчивостью к анодному растворению. Критериальный анализ позволил сразу же отклонить часть способов: азотирование из-за высокой температуры нагрева и коробления контейнера, значительных затрат на операцию, что дало $\overline{K_{op}}=1,9$, вызвавшее недопустимое повышение себестоимости продукции. Покрытия не обеспечили заданного P_p , а использование медно-графитовых композиций потребовало повышения напряжения тока, превышающего допустимый предел. По аналогии со стандартной оценкой коррозионной стойкости материалов (процессы коррозии и анодного растворения имеют близкую природу) по критериям принципа полезности (1), (2) была установлена целесообразность использования для контейнеров и токоподводов титановые сплавы, ранее уже применявшиеся для изготовления аналогичной оснастки. Было оценено по (2) увеличение стоимости изготовления, материала на контейнер и токоподвод, доступность и освоенность процессов обработки материалов оснастки. При заданном $P_{p1} = 19 \div 21$ часа выполнены расчеты $\overline{K_{op}}$, которые показали, что наименьшие значения имеют сплавы ОТ4-1 и ВТ3-1. Была проведена обработка образцов из сплавов, используемых для титановых лопаток (рис. 1), и установлена скорость износа базовых поверхностей оснастки. При допуске на износ 0,5 мм срок службы ОТ4-1 составил $P_{o2} = 25,2$ часа ($\overline{K_{op1}} = 12,6$), для ВТ3-1 $P_{o3} = 22$ часа ($\overline{K_{op1}} = 11$). $\overline{K_{op}}$ для обоих способов практически одинаков, и дает увеличение себестоимости обработанной детали по сравнению с использованием стальных контейнеров около 10 %, тогда по критерию (1) предпочтительнее использование сплава ОТ4-1, который на стадии освоения производства двигателей обеспечивает выпуск опытной партии деталей для сборки мотокомплекта и испытания изделия.

Для достижения требуемого срока службы оснастки ($P_{o1} = 600$ часов) был выбран ранее созданный способ комбинированной химико-магнитной обработки по а.с. №745638, который позволяет в слабых магнитных полях получить пассивированную поверхность, обеспечивающую подачу требуемого для обработки лопаток технологического тока при минимальном износе базовых поверхностей. Понадобилась разработка технологических режимов, учитывающих особенности пассивации рассматриваемой оснастки, срок службы которой первоначально составлял не более 100 часов.

Обоснованы и экспериментально подтверждены новые параметры режимов: степень загрязненности используемой рабочей среды продуктами обработки 4,5-5% (по объему), величина зазора между электродами при

пассивации 3-3,5 мм, напряжение 10–16 В; рабочая среда – 15% раствор хлористого натрия с температурой 18–24 °С. Дифференциальное изменение силы тока в импульсе при используемом диапазоне межэлектродных зазоров не более 12%, что обеспечивает гарантированное получение поверхностного слоя, создающего защиту от анодного растворения. При проектировании технологических процессов (ТП) применен механизм адаптации управления процессом по сигналу обратной связи от измененного межэлектродного зазора с компенсацией изменения силы технологического тока по величине напряжения на электродах.

Предложенный способ осуществлялся на станках для электрохимической обработки без перестановки технологической оснастки, при проектировании блока модификации установки для пассивации оснастки был использован ранее созданный патент соискателя № 135561 для обеспечения требуемого цикла подачи рабочей среды. Это позволило минимизировать увеличение себестоимости операции за счет дополнительных затрат на выполнение операции и модернизацию оборудования, которое не превышает 10%, что укладывается в допустимый показатель производственной технологичности.

По разработанному технологическому процессу были изготовлены образцы, испытание которых на экспериментальной установке позволило рассчитать увеличение среднего срока службы оснастки до $\Pi_{03} = 548$ часов и показателя (ПКП) до $\vec{K}_{003} = 27,4$.

Тогда общий ПКП $\vec{K}_{др} = \vec{K}_{003} \vec{K}_{op1} = 27,4 \cdot 12,6 = 345,24$.

Критерий (2) выполняется ($345,24 > 300$).

$\Pi_{др} = 345,24 \cdot 2 = 690,48$, и критерий (3) выполняется ($690,48 > 600$).

Ограничения касаются экономической эффективности использования комбинированного ТП, но увеличение себестоимости выполнения операции в пределах 10% в расчетах может не учитываться, т.к. находится в пределах рассеивания результатов.

Опыт использования результатов на примерах отработки производственной технологичности при освоении изделий за последнее десятилетие показал, что за счет ускоренного выполнения мероприятий у изготовителя этот период в основном не нарушается, а при грамотном планировании технологических разработок они занимают не более половины установленного срока, что в 1,5-2 раза меньше того, что имело место быть ранее.

Полученные результаты приведены в таблице 2.

Таблица 2 - Оценка полезности разработанных способов для повышения сроков службы технологической оснастки, применяемой при электрохимической размерной обработки титановых лопаток двигателей

Стадия отработки производственной технологичности	Способ повышения срока службы технологической оснастки	Показатели и критерии оценки полезности		Достигнутые эксплуатационные показатели (повышение срока службы оснастки), час
		$\overrightarrow{K_{op}}$	$\overrightarrow{K_{dp}}$	
Запуск изделия в производство	Термическая обработка на разработанных технологических режимах	12,6 (>11)		$P_o = 25,2$ (> $P_p = 20$)
Освоение серийного производства изделий	Пассивация поверхностного слоя комбинированным способом		345,24 (>300)	Повышение срока службы оснастки до $P_{dp} = 690,48$ (> $P_{d1} = 600$)

В особо сложных условиях работают турбонасосные агрегаты (ТНА) ракетных двигателей (рис. 2, а), где наряду с высокими механическими воздействиями имеется высокий перепад температур, наличие агрессивных сред. Рабочие колеса (рис. 2, б) обычно выполняются цельными с зазором между лопатками в несколько миллиметров, что ограничивает доступ инструмента. Здесь состояние поверхностного слоя определяет принципиальную возможность создания современных двигателей.



а)



б)

Рисунок 2 – Турбонасосный агрегат ракетного двигателя (а) и детали ТНА с лопатками (б)

В связи с созданием ракетных двигателей многоразового использования потребовалось увеличить ресурс лопаток турбины и турбонасосного агрегата с 119 до 240 секунд, что вызывает необходимость либо в снижении температуры перед турбиной (а, следовательно, и снижения мощности генератора), либо создания поверхностного слоя с большей термостойкостью. Первый вариант нежелателен, т.к. он резко ухудшает все эксплуатационные показатели изделия и делает его неконкурентоспособным. Перед технологами была поставлена задача повышения жаростойкости лопаток без ухудшения других показателей (например, шероховатости покрытий).

Анализ по коэффициенту полезности и критериальным оценкам множества технологических мероприятий, проведенных в авиакосмической отрасли для повышения жаростойкости и ресурса турбинных лопаток до 500 и даже 800 секунд показал, что все они требуют замены или улучшения характеристик, т.к. не отвечают показателям, установленным разработчиками новой техники. Для увеличения ресурса лопаток и турбонасосного агрегата (ТНА) было предложено нанесение термостойких покрытий. Исследован и защищен патентом (патент соискателя № 2619410) новый способ комбинированной обработки, в котором по предложенной методологии создана эффективная технология нанесения многослойных покрытий на лопатки ТНА, где используется электроэрозионное покрытие из жаростойких материалов, а поверхность выравнивается лучевым методом. Разработанные покрытия лопаток прошли производственные испытания и применяются в двигателестроении.

Одной из массовых деталей в энергетических машинах являются форсунки (рис. 3), которые в настоящее время разрабатываются для создаваемых космических аппаратов многократного использования и от надежности которых напрямую зависит надежность работы тепловых агрегатов.



а)



б)

Рисунок 3 – Форсунки: а – центробежная форсунка; б – фрагмент огневой доски с форсунками

Разработчиками ЖРД была поставлена задача повысить надежность и ресурс работы форсунок, которая имеет несколько вариантов решения:

применение жаростойких материалов; порядок размещения форсунок на огневой доске; снижение шероховатости поверхности проточной части; снижение температуры горения топлива на срезе сопла и другие.

Для решения поставленной задачи в процессе отработки технологичности было рассмотрено множество конструкторских и технологических вариантов, где по принципу полезности была выполнена критериальная оценка возможности повышения ресурса форсунок для многократного пуска двигателей и их последовательного использования. Была обоснована и внедрена технология электроэрозионной прошивки каналов различного сечения (диаметр от 0,25 до 1,5 мм), что значительно повысило точностные характеристики (а, следовательно, и стабильность работы форсунок по распылу и расходу). Созданный технологический способ (патент № 2466835) комбинированной эрозионно-химической обработки обеспечивает получение эксплуатационных свойств, согласованных с разработчиком при отработке технологичности изделия. Был достигнут показатель критерия полезности 1,5 при снижении показателя по трудоемкости до 1,2 относительно ранее применяемого варианта ТП, что согласуется с требованиями разработчика.

Для разработки новой технологии потребовалось изобретение нового способа и конструкции электрода (патент № 2621511) для получения конфузорного участка в отверстии форсунки. Это позволило повысить термостойкость форсунки до 2 раз по сравнению с применением ранее использованного способа комбинированной прошивки цилиндрического отверстия и многократное повышение относительно периода использования для изготовления каналов сверления.

Испытания изготовленных форсунок на работоспособность показали возможность повысить их ресурс до 1,8 раза.

Полученные эксплуатационные показатели от применения созданных процессов подтверждены актами внедрения с крупным реальным экономическим эффектом (десятки миллионов рублей).

Созданная методология разработки комбинированных технологических процессов модификации поверхностного слоя с наложением электрического поля для изменения эксплуатационных характеристик за счет физических воздействий и достижения требуемых эксплуатационных показателей путем изменения свойств, нанесения или удаления покрытий перспективна для применения во всех отраслях машиностроения. Приведенный соискателем прогноз использования технологических воздействий отражает достигнутый уровень повышения эксплуатационных воздействий и может служить исходным показателем для выполнения целевых научно-исследовательских работ по повышению эксплуатационных свойств изделий выше уровня показателей созданных в мире объектов наукоемкой конкурентоспособной техники.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ПО РАБОТЕ

Сформирован новый подход к применению известных и созданию новых технологий комбинированной обработки с наложением электрического поля для формирования поверхностного слоя, наиболее полно обеспечивающих получение наукоемких изделий с требуемыми эксплуатационными характеристиками, в основу которого положен принцип полезности, реализуемый через критериальную оценку технологических воздействий, что создает научную базу для дальнейшего совершенствования качества и эксплуатационных показателей создаваемых изделий новых поколений конкурентоспособной техники. Создана научно обоснованная доказательная база изготовителя для согласования при отработке технологичности возможности достижения требуемых эксплуатационных показателей. Разработаны новые способы и устройства для реализации технологий модификации и придания нужных параметров поверхностным слоям металлических изделий, отвечающих требованиям разработчиков. Для этого предложены принципы, критерии и разработана методология разработки комбинированных технологических процессов модификации поверхностного слоя, синтезирующего полезные воздействия, устраняющего негативные факторы и обеспечивающего достижение заданных эксплуатационных показателей осваиваемых изделий, что позволяет сделать общие выводы по работе:

1 Созданная и введенная в практику система критериальной оценки эффективности технологических воздействий и принцип полезности позволили через разработанные критерии выбора технологических методов и средств получить повышенные (вплоть до предельно достижимых) эксплуатационные показатели за счет совершенствования поверхностного слоя изделий.

2 Предложенный новый концептуальный подход к ускоренной разработке способов и устройств, для формирования в процессе отработки технологичности заданных показателей поверхностного слоя как единой системы, объединяющей запросы потребителей, разработчиков наукоемкой техники с возможностями технологов по использованию освоенных и созданию новых технологий для выпуска перспективной техники позволяет учитывать технические, экономические, временные ограничения, в том числе вопросы импортозамещения наукоемкой продукции для приоритетных отраслей отечественного машиностроения. Предложенный подход базируется на анализе более 200 объектов интеллектуальной собственности, технологической базы 8 базовых предприятий авиакосмической отрасли (АО «Конструкторское Бюро Химавтоматики», АО «Турбонасос», ВМЗ – филиал ФГУП «ГКНПЦ им. М.В. Хруничева», ПАО «Воронежское акционерное самолётостроительное общество» и др.).

3 Разработанная критериальная структура формализации связей между эксплуатационными требованиями потребителей, разработчиков изделий и технологическими показателями, достигнутыми в настоящее время и предельно достижимыми на перспективу, позволила на производстве при отработке технологичности осваиваемых изделий создать научную доказательную базу для ускорения этапа согласования с разработчиком технологических вопросов.

4 Разработанная методология проектирования рациональных комбинированных технологических процессов позволила обеспечить максимальное использование полезного потенциала технологических воздействий, а также повысить эксплуатационные показатели технологической оснастки до 30 раз, при создании авиационных двигателей до 3 раз, в ракетных двигателях новых поколений в узлах турбонасосных агрегатов этот показатель возрос до 2 раз, для форсунок и огневых досок – до 3 раз, при этом возможность негативных воздействий не превышает 0,5, что оправдывает дополнительные затраты на разработку комбинированных способов модификации поверхностного слоя.

5 Доказанная целесообразность использования получаемых комбинированной обработкой толстослойных металлических покрытий с требуемыми эксплуатационными свойствами в качестве конечного слоя подтвердила высокую эффективность использования критериальной оценки по принципу полезности при отработке технологичности осваиваемой техники.

6 Разработанные с участием соискателя новые (на уровне изобретений) способы и устройства дали возможность проектировать оригинальные технологии, обеспечивающие повышение характеристик поверхностного слоя, и создание изделий с требуемыми эксплуатационными показателями в условиях высоких внешних силовых воздействий при оптимизации сроков и стоимости исследовательских работ на этапе их освоения и запуска в производство.

7 Использование результатов исследований позволило освоить новые изделия на ведущих предприятиях оборонно-промышленного комплекса Российской Федерации, где по критериям полезности были созданы банки способов формирования поверхностного слоя для повышения эксплуатационных показателей изделий, внесены и осуществляются с реальным экономическим эффектом от внедрения мероприятия по реконструкции технологической базы для выпуска импортозамещающей продукции, а материалы работы запрошены специалистами Белоруссии, Украины, Польши, Китая, Германии.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ:

Публикации в изданиях в системе Scopus

1 Smolentsev, V.P. Magnetic pulse cleaning of products / V.P. Smolentsev, S.V. Safonov, E.V. Smolentsev, O.N. Fedonin// Published under licence by IOP Publishing Ltd IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 124, Number 1, 2016.

2 Smolentsev, V.P. Stampless fabrication of sheet bars using disposable templates/ V.P. Smolentsev, S.V. Safonov, E.V. Smolentsev, Simkin A.Z// Published under licence by IOP Publishing Ltd IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 124, Number 1, 2016.

3 Smolentsev, V.P. Processing of Channels in Heat Engine Filters/ V.P. Smolentsev, S.V. Safonov, V.V. Zolotarev//Procedia Engineering, 150, 2016. P. 1124-1130.

4 Smolentsev, V.P. The technological methods of surface layer modification in construction materials/ V.P. Smolentsev, S.V. Safonov // International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment (ICMTMTE 2017). Volume 129, 2017.

Публикации в изданиях, рекомендованных перечнем ВАК РФ

5 Пешков, В.В. Влияние микрогеометрии поверхности на кинетику развития контакта при высокотемпературной термомеханической обработке / В.В. Пешков, С.В. Сафонов, А.Б. Булков, А.С. Стрыгин, Д.Н. Балбеков // Вестник Воронежского государственного технического университета, Воронеж: ВГТУ, том 8, №4, 2012. С. 140-145.

6 Гадалов, В.Н. Исследование тонкопленочных конденсаторов с диэлектриков из окиси тантала, полученных высокочастотным реактивным распылением / В.Н. Гадалов, С.В. Сафонов, Б.Н. Квашнин, В.М. Рощупкин, В.В. Горецкий // Вестник Воронежского государственного технического университета, Воронеж: ВГТУ, том 9, №3.1, 2013. С. 82-85.

7 Гадалов, В.Н. Физическая модель зажигания слаботочного разряда в скрещенных электрических и магнитных полях / В.Н. Гадалов, С.В. Сафонов, Е.Ф. Романенко, Н.А. Корневский // Вестник Воронежского государственного технического университета, Воронеж: ВГТУ, том 9, №3.1, 2013. С. 107-110.

8 Гадалов, В.Н. Реновация машиностроительной и сельскохозяйственной техники гальваническими железохромистыми покрытиями с применением цементации / В.Н. Гадалов, С.В. Сафонов, В.И. Серебровский, Ю.В. Скрипкина, В.В. Горецкий // Вестник Воронежского государственного технического университета, Воронеж: ВГТУ, том 9, №4, 2013. С. 54-58.

9 Гадалов, В.Н. Эволюция микроструктуры при развитии динамической рекристаллизации в процессе горячей прокатки

конструкционных сталей / В.Н. Гадалов, С.В. Сафонов, Е.Ф. Романенко, А.В. Филонович // Вестник Воронежского государственного технического университета, Воронеж: ВГТУ, том 9, №5.1, 2013. С. 13-16.

10 Гадалов, В.Н. Повышение эксплуатационной надежности и качества тяжело нагруженных деталей / В.Н. Гадалов, С.В. Сафонов, Ю.В. Скрипкина, Б.Н. Квашнин // Вестник Воронежского государственного технического университета, Воронеж: ВГТУ, том 9, №6.2, 2013. С. 121-123.

11 Гадалов, В.Н. Оценка усталости хромистых сталей после термической и химико-термической обработки / В.Н. Гадалов, С.В. Сафонов, Ю.В. Скрипкина, А.Е. Гвоздев, Н.А. Корневский // Вестник Воронежского государственного технического университета, Воронеж: ВГТУ, том 9, №6.2, 2013. С. 124-126.

12 Гадалов, В.Н. Повышение износостойкости порошкового титанового сплава ТЮ7М2Ф2Ц2 электроискровым легированием сплавом ПГ410Н401 / В.Н. Гадалов, С.В. Сафонов, Е.Ф. Романенко // Упрочняющие технологии и покрытия, №12, 2013. С. 20-24.

13 Сальников, В.Г. Разработка теоретических предпосылок создания из вторичных техногенных неорганических веществ новых наноструктурированных абразивных материалов, обладающих заданным набором свойств / В.Г. Сальников, В.Н. Гадалов, С.В. Сафонов, А.Г. Романенко, Д.В. Климов // Известия Юго-Западного государственного университета, Курск: Изд-во ЮЗГУ, №3 (48), 2013. С. 123-127.

14 Сафонов, С.В. Режимы электроискрового легирования и покрытия металлических изделий / С.В. Сафонов, В.П. Смоленцев, В.Г. Грицюк // Научные технологии в машиностроении, №5, 2014. С. 27-31.

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

16 Смоленцев, В.П. Технология импульсно-вибрационной очистки прецизионных литых деталей/ В.П. Смоленцев, С.В. Сафонов, А.Ю. Рязанцев, В.И. Котуков. Сб. Рыбинского государственного технического университета (РГТУ). 2014, № 1. С. 40-44.

17 Смоленцев, В.П. Свойства высокотемпературных покрытий, наносимых на алюминиевые сплавы/ В.П. Смоленцев, А.В. Перова, С.В. Сафонов, Е.С. Бобров. Сб. Рыбинского государственного технического университета (РГТУ), 2014. № 2. С. 91-96.

18 Сафонов, С.В. Электроискровое легирование и покрытие металлических изделий/ С.В. Сафонов, В.П. Смоленцев, В.Г. Грицюк. Ж. «Инженерный журнал. Справочник», №11, 2014. С. 13-19.

19 Смоленцев, В.П. Эксплуатационные свойства изделий после электроискрового легирования и нанесения покрытий/ В.П. Смоленцев, В.Г.

Грицюк, С.В. Сафонов. Ж. «Упрочняющие технологии и покрытия». №12, 2014. С. 31-37.

20 Смоленцев, В.П. Проектирование технологического процесса электроискрового легирования и покрытия металлических изделий / В.П. Смоленцев, В.Г. Грицюк, С.В. Сафонов. Ж. «Упрочняющие технологии и покрытия». № 11, 2014. С. 36-41.

21 Сафонов, С.В. Модификация поверхностного слоя металлических изделий/ С.В. Сафонов, С.Н. Григорьев, В.П. Смоленцев // Вестник Воронежского государственного технического университета, Воронеж: ВГТУ, том 2, 2015. С. 19-26.

22 Сафонов, С.В. Повышение эксплуатационных свойств изделий путем нанесения и удаления покрытий/ С.В. Сафонов, С.Н. Григорьев, В.П. Смоленцев // Вестник Воронежского государственного технического университета, Воронеж: ВГТУ, том 11, №3, 2015. С. 15-23.

23 Смоленцев, В.П. Изготовление фильтров многоэлектродным инструментом/ С.В. Сафонов, В.П. Смоленцев, Ю.В. Шаров. Авиационная техника. 2016, № 2. С. 70-74.

24 Смоленцев, В.П. Доводка расхода и распыла форсунок для подачи топлива в двигателях летательных аппаратов/ С.В. Сафонов, В.П. Смоленцев, И.И. Коптев. Авиационная техника. 2016, № 4. С. 117-123.

25 Сафонов, С.В. Критериальная система проектирования и использования технологических процессов для повышения эксплуатационных характеристик поверхностного слоя // Вестник Воронежского государственного технического университета. Воронеж: ВГТУ, том 11, №3, 2015. С. 4-10.

26 Сафонов, С.В. Моделирование процесса проектирования технологии модификации и изменения толщины покрытий// Вестник Воронежского государственного технического университета. Воронеж: ВГТУ, том 11, №5, 2015. С. 8-12.

27 Григорьев, С.Н. Проектирование комбинированных процессов модификации поверхностного слоя типовых деталей / С.Н. Григорьев, С.В. Сафонов, В.П. Смоленцев// Вестник Воронежского государственного технического университета, Воронеж: ВГТУ, том 12, №4, 2016. С. 54-61.

28 Сафонов, С.В. Оптимизация выбора технологических процессов на базе принципа подобия в машиностроении / С.В. Сафонов, С.Н. Григорьев // Вестник РГАТУ им. П.А. Соловьева, Рыбинск: РГАТУ, том 2 (41), 2017. С. 37-42.

Монографии

29 Гадалов, В.Н. Химико-термическая, электрофизическая обработка металлов, сплавов и гальванических покрытий / В.Н. Гадалов, В.Р. Петренко, В.В. Пешков, С.В. Сафонов. М.: АРГАМАК-МЕДИА, 2013. 320 с.

30 Сафонов, С.В. Повышение эксплуатационных характеристик деталей путем модификации поверхностного слоя/ С.В. Сафонов, В.П.

Смоленцев, А.И. Портных. В монографии «Прогрессивные машиностроительные технологии, оборудование и инструменты». В 5 т. Т.3/Под ред. А.В. Киричека. М: Изд. дом «Спектр», 2014. С. 365-406.

31 Гадалов, В.Н. Исследование быстрозакристаллизованных порошков на основе титана и никеля, полученных электроэрозионным диспергированием и возможности их компактирования // В.Н. Гадалов, С.В. Сафонов и др. М: АРГОМАК-Медиа, 2015. 119 с.

32 Сафонов, С.В. Технологическое обеспечение эксплуатационных характеристик изделий. Воронеж: ИПЦ ВГУ, 2015. 224 с.

Патенты

33 Патент 2619410 (РФ). В23Н. Способ плазменного напыления покрытий. Авторы: В.П. Смоленцев, Е.В. Смоленцев, С.В. Сафонов, М.В. Кондратьев, Е.С. Бобров. Заявка 2015101658 от 20.01.2015. Опуб. 15.05.2017. Бюл. №14.

34 Патент 2621511 (РФ) Электрод для изготовления конфузорного участка в отверстии форсунки. Авторы: В.П. Смоленцев, С.В. Сафонов, Б.И. Омигов. Заявка 2015110337 от 23.03.2015. Опуб. 06.06.2017. Бюл. №16.

35 Патент 135561 (РФ). В23Н. Полезная модель: высоконапорное устройство для подачи рабочей среды. Авторы: В.П. Смоленцев, С.В. Сафонов, Е.В. Смоленцев. Заявка 2012140008 от 19.09.2012. Опуб. 20.12.2013. Бюл. №35.

36 Патент 132018 (РФ). В23Н. Полезная модель: электрод-щетка. Авторы: В.П. Смоленцев, О.Н. Кириллов, С.В. Сафонов, А.В. Мандрыкин. Заявка 2012154163 от 13.12.2012. Опуб. 10.09.2013. Бюл. №25.