

На правах рукописи



Таминдаров Дамир Рамилевич

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА
ЛОПАТОК КОМПРЕССОРА ГТД ИЗ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ
НА ОСНОВЕ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ИХ ПОВЕРХНОСТИ
ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННЫМ ПОЛИРОВАНИЕМ**

Специальность: 2.5.6. Технология машиностроения

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Уфа – 2026

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Уфимский университет науки и технологий».

Научный руководитель:

Смыслов Анатолий Михайлович, доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты:

Захаров Олег Владимирович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры высокоэффективных технологий обработки ФГАОУ ВО "Московский государственный технологический университет "СТАНКИН", г. Москва

Дьяков Илья Геннадьевич, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры общей и теоретической физики ФГБОУ ВО «Костромской государственной академии техники и транспорта», г. Кострома

Ведущая организация:

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», г. Москва

Защита состоится «17» декабря 2026 г. в 10⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета 24.2.479.17 на базе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский университет науки и технологий» по адресу: 450008, г. Уфа, ул. К. Маркса, д. 12.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский университет науки и технологий» и на сайте: <https://uust.ru/dc/dissertations>.

Автореферат диссертации разослан «___» _____ 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
24.2.479.17, к.т.н.

Ю. М. Модина

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Титановые лопатки компрессора газотурбинного двигателя (ГТД) и энергетических установок, работающие в условиях высоких динамических нагрузок, температур и агрессивных сред, в значительной степени определяют его ресурс и надежность. Обеспечение усталостной прочности лопаток и, как следствие их ресурса, во многом определяется технологией их окончательной обработки, направленной на повышение качества поверхностного слоя.

Наиболее распространённым методом окончательной обработки поверхности пера лопаток компрессора ГТД является ручное полирование войлочными кругами с абразивом. Основными недостатками данной технологии являются зависимость качества обработки поверхности от квалификации рабочего исполнителя и качества применяемого абразивного инструмента. Кроме того, отмечается, что высокая вероятность отрыва абразивных зерен от полировального круга может привести к образованию на обрабатываемой поверхности глубоких рисков, обнаружение которых, зачастую, затруднительно на общем фоне шероховатости. Наряду с этим, данным методом полирования достаточно сложно обеспечить формирование равномерного радиуса входной и выходной кромок по высоте пера лопатки.

Альтернативой и дополнением к ручному полированию лопаток может стать новый метод электролитно-плазменного полирования (ЭПП), активно применяемый в настоящее время в машиностроении при обработке деталей из нержавеющей и конструкционных сталей. Его основными преимуществами являются высокая стабильность показателей качества поверхности и производительность. Однако, проблема ЭПП титановых сплавов изучена в недостаточной степени для использования в технологии изготовления лопаток компрессора ГТД. Существующие публикации в научных изданиях касаются, в основном, исследования ЭПП чистого титана и не освещают проблему обработки двухфазных титановых сплавов, применяемых в качестве конструкционных материалов для изготовления лопаток компрессора ГТД.

Таким образом, актуальность темы диссертационной работы обусловлена отсутствием научно-обоснованной методологии по ЭПП двухфазных титановых сплавов, что сдерживает применение данного метода в технологии изготовления лопаток компрессора ГТД и энергетических установок.

Степень разработанности темы исследования

Исследованием электролитно-плазменного полирования, занимается множество научных коллективов по всему миру. Фундаментальные основы и прикладные аспекты процесса рассмотрены в работах Российских ученых: Н.А. Амирхановой, П.Н. Белкина, Ф.М. Гайсина, И.Г. Дьякова, С.А. Кусманова, Е.В. Парфенова, И.В. Сумина, Л.А. Ушомирской, А.В. Эпельфельда и др. Теоретические основы процесса и рекомендации по выбору составов рабочих электролитов для полирования деталей из нержавеющей сталей, железоникелевых и медных сплавов приведены в работах авторов из стран СНГ: С.В. Ващенко, А.Я. Каменева, И.С. Куликова и Ю.В. Синькевича. Значительный объем исследований

физико-химических и технологических аспектов электролитно-плазменных процессов проведен зарубежными исследователями: Г. Гуптой, А. Ерохиным, А. Лейланом, А. Маттьюзом, Сю Нье и др. Опыт применения ЭПП для обработки титановых изделий медицинского назначения рассмотрен в работах К. Нестлера и Х. Цайдлера. Исследование влияния напряжения обработки, концентрации и температуры электролита на скорость процесса полирования поверхностного слоя деталей из титановых сплавов рассмотрено в работах Ю.Г. Алексеева, А.С. Будницкого, Д.А. Добрынина, А.Ю. Королева, В.С. Нисса, А.Э. Паршута, а также Сунь Хуань и Ян Дунлян. Вместе с тем, недостаточность информации о влиянии ЭПП на качество поверхностного слоя двухфазных титановых сплавов, усталостные свойства и геометрические размеры обрабатываемых деталей, затрудняют внедрение данного метода полирования в технологию обработки лопаток компрессора ГТД.

Цель работы: разработать научные основы технологического обеспечения усталостной прочности и повышения качества поверхностного слоя лопаток компрессора ГТД из двухфазных титановых сплавов за счет финишной операции электролитно-плазменного полирования, направленной на устранение концентраторов напряжений и формирование профиля входной и выходной кромок пера.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Исследовать механизм финишной обработки поверхностного слоя титановых сплавов методом электролитно-плазменного полирования и формализовать его в виде феноменологической модели.
2. Разработать состав рабочего электролита для финишной операции ЭПП титановых сплавов и экспериментально определить границы его применимости.
3. На образцах из титановых сплавов исследовать влияние финишной операции ЭПП в разработанном рабочем электролите на равномерность обработки, шероховатость поверхности и усталостную прочность.
4. Разработать усовершенствованную технологию производства лопаток компрессора ГТД из двухфазных титановых сплавов, включающую финишную операцию ЭПП, и показать повышение качества их поверхностного слоя и усталостной прочности.

Научная новизна:

1. Разработана феноменологическая модель электролитно-плазменного полирования титана и титановых сплавов в рабочих электролитах на основе водных растворов фторидов, *отличающаяся* учетом роли pH среды в формировании плавиковой кислоты (HF), необходимой для растворения оксидов титана, образующихся на обрабатываемой поверхности под действием окисляющей среды парогазовой оболочки и *позволяющая* установить требования к компонентному составу рабочего электролита.
2. Установлен состав рабочего электролита для финишной операции ЭПП титановых сплавов, включающий натрий фтористый, гидроксиламин солянокислый и калий хлористый, *отличающийся* тем, что взаимосвязь между

концентрациями его компонентов определена в виде экспериментально полученной математической модели, определяющей границу его применимости по уровню минимальной концентрации HF, равной 0,08 моль/л, что *позволяет* осуществлять его технологическую корректировку.

3. Установлено влияние длительности финишной операции ЭПП и глубины погружения образцов на качество поверхностного слоя, *отличающееся* учетом профиля парогазовой оболочки по глубине погружения детали, что *позволяет* сформулировать технологические рекомендации для устранения концентраторов напряжений и формирования профиля входной и выходной кромок пера. Также показано, что финишная операция ЭПП не приводит к снижению усталостной прочности конструктивно подобных образцов.

4. Разработана усовершенствованная технология производства лопаток компрессора ГТД из двухфазных титановых сплавов, *отличающаяся* применением финишной операции электролитно-плазменного полирования взамен ручного механического, в предложенном рабочем электролите с возможностью его корректировки, а также горизонтальным расположением лопатки при обработке в две стадии с поворотом на 180° после завершения половины расчётного времени ЭПП, что *позволяет* сформировать входные и выходные кромки пера, повысить качество поверхностного слоя и усталостную прочность лопаток.

Теоретическая значимость работы состоит в развитии представлений о механизме ЭПП титана и двухфазных титановых сплавов во фторидсодержащих электролитах: установлена роль pH среды в формировании равновесной концентрации HF, определяющей условия растворения оксидных продуктов. Разработанная феноменологическая модель электролитно-плазменного полирования титана и титановых сплавов и разработанная математическая модель, устанавливающая границы применимости по уровню минимальной концентрации HF, позволяют технологам методически подходить к выбору составов рабочих электролитов на основе водных растворов фторидных солей и поддержанию их работоспособности для обеспечения стабильно-высокого качества финишной операции ЭПП. Полученные зависимости, связывающие состав РЭ, режимы ЭПП, качество поверхностного слоя могут быть использованы при проектировании маршрутных технологических процессов, включающих финишную операцию ЭПП, для широкого круга деталей из двухфазных титановых сплавов.

Практическая значимость работы:

1. Установленная взаимосвязь pH среды фторидсодержащего РЭ, наличия оксидных пленок и следов избирательного травления межфазных границ на поверхности титана и двухфазных титановых сплавов *позволила* разработать 3-х компонентный состав РЭ на основе натрия фтористого, гидроксидов солянокислого и калия хлористого с высокими буферными свойствами, обеспечивающий отсутствие концентраторов напряжений после финишной операции ЭПП;

2. Установленная зависимость между концентрациями компонентов РЭ, а также соответствующее ей значение граничной концентрации HF, обеспечивающее электролитно-плазменное полирование титановых сплавов (без избирательного травления структурных составляющих и образования непрозрачных оксидных пленок), позволили разработать способ полирования деталей из титановых сплавов и технологические рекомендации по корректировке РЭ, используемые при серийной обработке лопаток компрессора ГТД в НПП «УАСТ» г. Уфа (патент РФ № 2552203);

3. Установленные закономерности изменения геометрических размеров обрабатываемых деталей в ходе финишной операции ЭПП, позволили разработать технологические рекомендации по расположению обрабатываемых лопаток в ванне ЭПП, обеспечивающие гарантированное формирование профиля входной и выходной кромок пера;

4. Установленные закономерности позволили разработать способ электролитно-плазменного полирования изделий из титановых и железохромоникелевых сплавов (патент РФ № 2706263), положенный в основу усовершенствованной технологии производства лопаток компрессора ГТД из двухфазных титановых сплавов BT6 и BT8M-1, обеспечивающей снижение неравномерности съема материала с 5,0 до 1,6 мкм и параметра шероховатости поверхности с Ra 0,30 до Ra 0,10 мкм, а также, повышение предела выносливости с 363 ± 4 до 384 ± 4 МПа (на базе 2×10^7 циклов) по сравнению с серийной технологией ручного полирования.

Методология и методы исследования

Работа выполнена с использованием теоретических и экспериментальных методов исследования. Для решения поставленных задач использовались стандартные методы проведения исследований: оптическая металлография, растровая электронная микроскопия (РЭМ), рентгеноструктурный анализ (РСА), растровая электронная микроскопии (РЭМ), рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия (РФЭС). Усталостные испытания проводили на образцах и натурных лопатках на электродинамическом вибростенде. Измерение шероховатости поверхности проводили профилографическим методом. Обработку экспериментальных данных и теоретические расчеты производили с использованием программного обеспечения Excel и Maple.

Положения, выносимые на защиту:

1. Феноменологическая модель процесса ЭПП титана и титановых сплавов, формализующая механизм финишной обработки поверхностного слоя (соответствует п. 3 паспорта специальности);

2. Состав рабочего электролита для финишной операции ЭПП титановых сплавов (соответствует п. 4 паспорта специальности);

3. Результаты экспериментального исследования влияния финишной операции ЭПП на качество поверхностного слоя и усталостную прочность лопаток ГТД (соответствует п. 7 паспорта специальности);

4. Усовершенствованная технология производства лопаток компрессора ГТД из двухфазных титановых сплавов с применением финишной операции

электролитно-плазменного полирования взамен ручного механического (соответствует п. 2 паспорта специальности).

Степень достоверности и апробация результатов

Степень достоверности результатов диссертационной работы обеспечивается согласованностью полученных экспериментальных данных с опубликованными результатами других исследователей; применением поверенного измерительного оборудования и стандартизованных методик измерения; большим количеством экспериментов и натурных испытаний, дающих значимые результаты; апробацией основных результатов работы через публикации в рецензируемых научных изданиях и представление на всероссийских и международных конференциях.

Результаты научных исследований представлены и обсуждены на Международной школе конференции «UUST Nanomaterials Days» (Уфа, 2026); IX Международном технологическом форуме «Инновации. Технологии. Производство» (Рыбинск, 2023); Международной научно-технической конференции «Климовские чтения – 2022: перспективные направления развития авиадвигателестроения» (Санкт-Петербург, 2022); 5th international conference «Recent trends in structural materials», (Pilsen, 2018); V Международной конференции «Электрохимические и электролитно-плазменные методы модификации металлических поверхностей» (Кострома, 2016); Научно-практической конференции, посвященной 80-летию вечернего факультета УГАТУ при УМПО «Интеграция науки, образования и высокотехнологичного производства как основной фактор инновационного развития» (Уфа, 2012).

Личный вклад автора заключается в формулировании цели и задач работы, проведении экспериментальных исследований и анализе полученных данных, выявлении и построении феноменологических и математических зависимостей, а также в обобщении полученных результатов для разработки технологического процесса.

Практическая реализация результатов работы

Результаты работы внедрены в ООО НПП «Уралавиаспецтехнология» и НПА «Технопарк АТ» для серийной обработки лопаток компрессора направляющего аппарата ГТД из двухфазных титановых сплавов BT6 и BT8M-1 для ПАО «ОДК-УМПО».

Публикации

По теме диссертации опубликовано 14 научных работ, из них 3 статьи в рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК РФ, 1 статья в рецензируемых журналах, включенных в базы данных Web of Science и/или Scopus, 2 патента РФ на изобретение, 8 публикаций в иных изданиях.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы из 123 наименования источников и 2 приложений. Работа содержит 145 страниц, включая 75 рисунков и 19 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы исследования, приведены цель, задачи и основные положения, выносимые на защиту, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы.

В **первой главе** проанализированы условия работы лопаток компрессора ГТД, отмечено отрицательное влияние концентраторов напряжений от ненормированной шероховатости поверхности при механической обработке на предел выносливости и циклическую долговечность, а также возможность применения ЭПП для их финишной обработки.

Показано, что при механическом полировании поверхности пера лопаток компрессора, не смотря на возможность достижения величины параметра шероховатости Ra 0,6...0,4 мкм, существует высокая вероятность образования глубоких рисок, обнаружение которых затруднительно на общем фоне шероховатости. Кроме этого, существует высокая вероятность локального перегрева материала обрабатываемой поверхности ввиду износа инструмента. При этом отмечается большая сложность обеспечения требуемого радиуса профиля входной и выходной кромок по всей высоте пера лопатки.

Анализ достоинств и недостатков известных методов полирования поверхности показал перспективность технологии ЭПП для финишной обработки лопаток компрессора ГТД, внедрение которого осложнено недостаточной исследованностью процесса применительно к титановым сплавам. Опубликованные научные статьи по ЭПП титановых сплавов ограничиваются изучением скорости изменения шероховатости в зависимости от режимов обработки, без учета влияния состава РЭ и не затрагивают влияние ЭПП на качество поверхностного слоя.

На основании анализа проблемы, поставлена цель работы и сформулированы решаемые задачи.

Вторая глава посвящена выбору материала для изготовления экспериментальных образцов и описанию методик проведения исследований, применяемых в ходе выполнения работы.

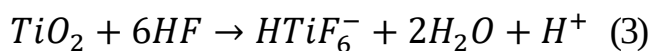
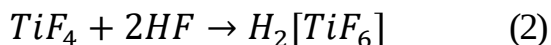
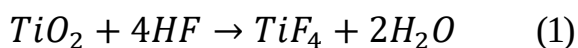
Для проведения экспериментов был выбран двухфазный титановый сплав ВТ6, как наиболее широко применяемый в конструкциях лопаток компрессора ГТД. Электролитно-плазменную обработку образцов и лопаток производили на установке ЕРР-50ЕМ (производитель НПП «УАСТ», г. Уфа). Высокую точность дозирования компонентов для приготовления экспериментальных РЭ обеспечивали использованием их концентрированных растворов.

Экспресс-оценку состояния поверхности, при подборе концентраций компонентов РЭ, обеспечивающих эффект полирования, проводили по величине параметра шероховатости Ra и принятой в работе 4-х бальной шкале качества, характеризующей отсутствие оптически не прозрачных оксидных пленок и селективного травления структурных составляющих материала на отдельных участках обработанной поверхности по наличию на них зеркального блеска. Усталостные испытания образцов проводили методом «лестницы» по ОСТ1-00870-77 «Лопатки газотурбинных двигателей», который позволяет определить

средний предел выносливости для заданной базы испытаний без построения усталостной кривой. Усталостные испытания лопаток проводили по ГОСТ 19533-74 «Надежность изделий машиностроения. Ускоренная оценка пределов выносливости методом ступенчатого нагружения (Локати)».

Третья глава посвящена обоснованию компонентного состава рабочего электролита.

Результаты ЭПП образцов из титанового сплава ВТ6 с использованием известных РЭ показали наличие большого количества локальных участков с оптически непрозрачной оксидной пленкой на полированной поверхности, концентрация кислорода в которых достигает 12% вес., или участков с растравливанием структурных составляющих сплава, что является недопустимым для полированной поверхности пера лопаток. Для обеспечения контролируемого протекания процесса ЭПП титана и его сплавов был проведен анализ механизма их химического растворения в водных растворах фторидных солей, который показал, что растворение оксидных пленок на поверхности титана обеспечивается плавиковой кислотой, образующейся только в кислых средах в результате смещения равновесия диссоциации плавиковой кислоты ($\text{HF} \rightleftharpoons \text{H}^+ + \text{F}^-$) в сторону образования молекулярной HF при повышенных концентрациях ионов водорода. Наглядно, зависимость концентрации HF от pH среды, построенная на основании констант диссоциации плавиковой кислоты и уравнения материального баланса, представлена на Рисунке 1. При взаимодействии HF с оксидами титана формируются хорошо растворимые промежуточные формы фторида титана TiF_4 и устойчивые в водных растворах комплексные ионы $[\text{TiF}_6]^{2-}$:



Аналогичным образом происходит растворение оксидов алюминия и ванадия, являющихся основными легирующими компонентами большинства двухфазных титановых сплавов.

Анализ механизма растворения титана и титановых сплавов в водных фторидсодержащих средах позволил разработать феноменологическую модель процесса их электролитно-плазменного полирования. Предложенная модель уточняет существующие представления о механизме растворения поверхностного слоя и предполагает наличие чередующихся на обрабатываемой поверхности процессов окисления химически активными компонентами парогазовой оболочки, с образованием оксидов и гидроксидов с катионами металлов, и химического растворения образующихся продуктов окисления

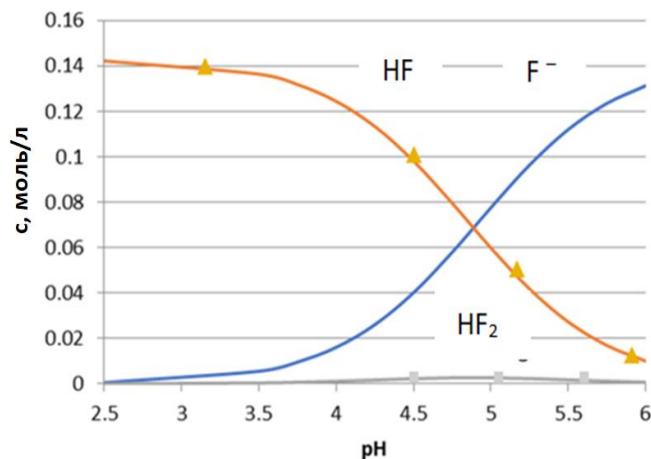


Рисунок 1 – Расчетная диаграмма распределения равновесных концентраций фторидных компонентов для водного раствора с концентрацией NaF 6 г/л

плавиковой кислотой, образующейся в кислых средах, содержащих фторид ионы, в моменты образования электролитных мостиков.

Состоятельность предложенной модели проверена экспериментально, путем уменьшения значения pH среды известного РЭ для ЭПП титановых сплавов добавлением соляной кислоты. Получившийся, таким образом, РЭ обеспечил кратковременный эффект полирования поверхности на сплаве ВТ6 с достижением зеркального блеска и отсутствием оптически непрозрачных оксидных пленок (Рисунок 2 б). Непродолжительный срок службы, полученного таким образом РЭ, обусловлен быстрым расходом образующейся в нем HF.

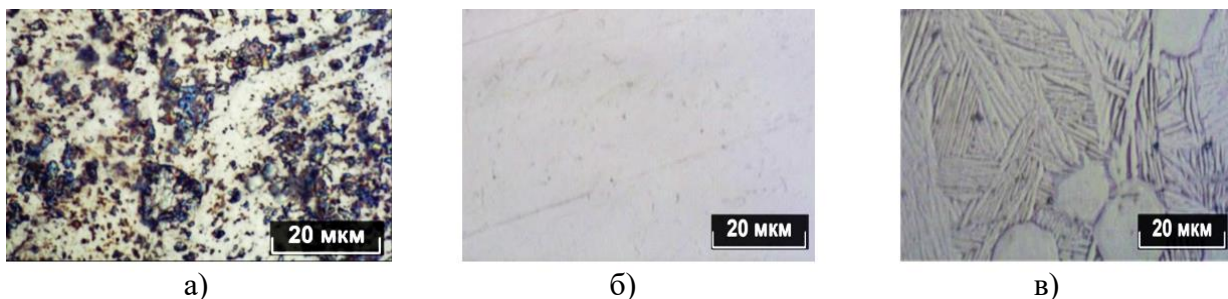


Рисунок 2 - Состояние поверхности сплава ВТ6 после 1 мин ЭПП в растворе NH_4F -7,4 г/л, KCl -30 г/л с добавкой HCl : а) 0 мл; б) 1 мл; в) 2 мл

На основании анализа литературных данных по растворам для химического полирования титана и титановых сплавов выбран компонентный состав РЭ на основе соли плавиковой кислоты (NaF) и гидроксилamina солянокислого ($\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}$). Для регулирования электропроводности РЭ предложено использовать хлорид калия. В отличие от известных РЭ для титана и двухфазных титановых сплавов, концентрация HF в которых, согласно произведённым расчетам, не может быть выше $2,2\cdot 10^{-3}$ моль/л (Рисунок 3), предлагаемый раствор позволяет регулировать ее концентрацию в диапазоне 0,04...0,11 моль/л (Рисунок 4), за счет изменения количественного соотношения компонентов, и обладает буферными свойствами в отношении pH среды.

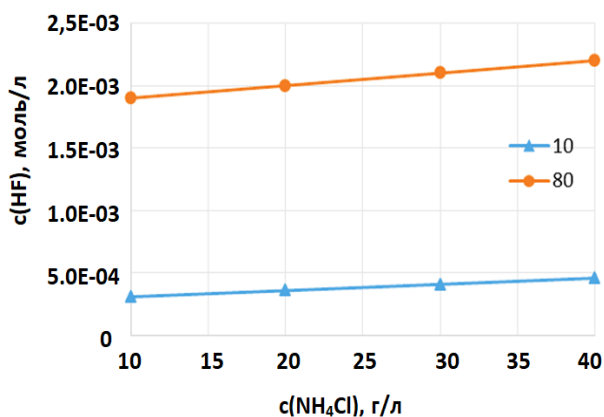


Рисунок 3 – Зависимость концентрации HF от концентрации NH_4Cl при концентрации NH_4F 10 и 80 г/л

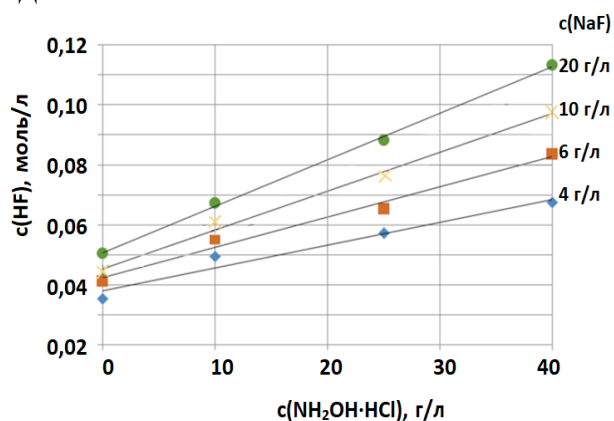


Рисунок 4 – Зависимость концентрации HF от соотношения NaF и $\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}$ в растворе полирования

Четвертая глава посвящена экспериментальному исследованию влияния соотношения концентраций NaF и $\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}$ в РЭ на процесс ЭПП титана и

двухфазных титановых сплавов. Достижение эффекта полирования в ходе эксперимента оценивали по уменьшению параметра шероховатости R_a , а также отсутствию на обработанной поверхности оптически непрозрачных оксидных пленок, для чего использовали качественную оценку состояния поверхности по 4-х балльной шкале, где 1 балл соответствует их наличию на всей поверхности, 2 балла – их отсутствию на отдельных участках плоских поверхностей, 3 балла – их отсутствию на всех поверхностях кроме кромок, 4 балла – их отсутствию на всей обработанной поверхности.

Графическое отображение качественной оценки состояния поверхности после ЭПП, соответствующее различным соотношениям концентраций фторида натрия и гидроксиламина солянокислого в РЭ представлено на Рисунке 5.

Аппроксимацией кривой, разделяющей области с качественной оценкой поверхности в 3 и 4 балла (Рисунок 5), было установлено соотношение концентраций NaF и $\text{NH}_2\text{OH} \cdot \text{HCl}$, обеспечивающее полирование поверхности без образования оптически непрозрачных оксидной пленок и участков растворивания структурных составляющих сплава:

$$c(\text{NH}_2\text{OH} \cdot \text{HCl}) > 542,83 \cdot c(\text{NaF})^{-1,52} \quad (4)$$

где: $c(\text{NH}_2\text{OH} \cdot \text{HCl})$ – концентрация гидроксиламина солянокислого, г/л; $c(\text{NaF})$ – концентрация фторида натрия, г/л.

Для подтверждения того, что полученное соотношение концентраций (4) обусловлено количеством HF в РЭ и определения ее минимальной концентрации, необходимой для полирования двухфазного титанового сплава ВТ6, были построены диаграммы распределения равновесных концентраций F^- , HF и HF_2^- для всего диапазона исследованных концентраций NaF (Рисунок 6). На каждой диаграмме

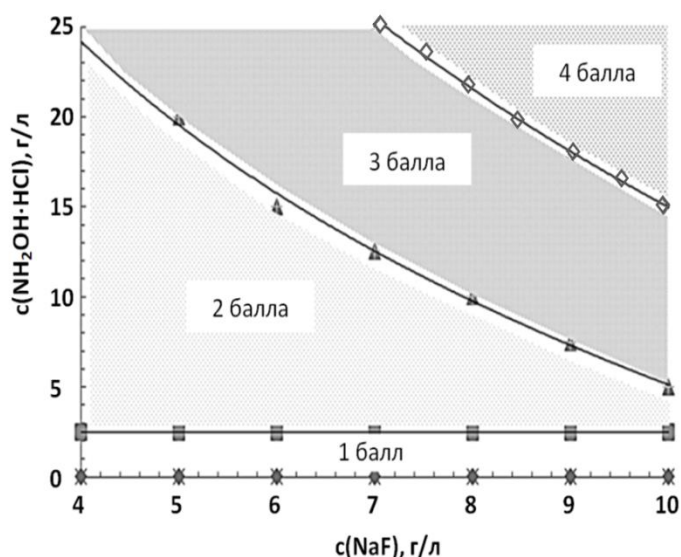


Рисунок 5 – Величина качественной оценки состояния поверхности в зависимости от соотношения NaF и $\text{NH}_2\text{OH} \cdot \text{HCl}$ в РЭ.

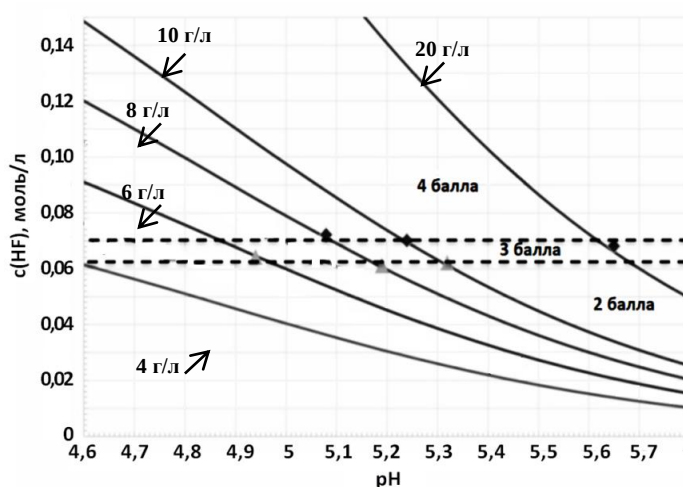


Рисунок 6 – Диаграмма зависимости концентрации HF от pH раствора для ряда заданных значений концентрации NaF (от 4,0 до 20,0 г/л)

было отмечено значение pH среды РЭ, при котором произошло изменение величины качественной оценки обработанной поверхности. Анализ полученных результатов показал, что изменение величины качественной оценки состояния поверхности при ЭПП, для всех исследованных концентраций фторида натрия, происходит при одних и тех же значениях концентрации плавиковой кислоты (горизонтальные линии на Рисунке 6). Снижение шероховатости поверхности, без образования на ней непрозрачных оксидных пленок на всей обработанной поверхности (переход величины качественной оценки состояния поверхности от 3-х к 4-м баллам на Рисунке 6) достигается при концентрации HF равной 73 ± 9 ммоль/л.

Анализ изменения внешнего вида экспериментальных образцов в ходе эксперимента, с варьированием концентраций $\text{NH}_2\text{OH} \cdot \text{HCl}$ и NaF, позволил определить, что их кромки и нижний торец подвергаются более интенсивному окислению по сравнению с остальной поверхностью, о чем свидетельствует большая концентрация HF, необходимая для достижения на них эффекта полирования.

Высокая интенсивность окисления кромок может быть обусловлена рядом явлений: локальным уменьшением толщины парогазовой оболочки, приводящим к росту напряженности электрического поля на соответствующих участках, что в свою очередь приводит к увеличению интенсивности перемещения катионов металла через образовавшийся слой оксида к его наружной поверхности на этих участках.

Наблюдаемое уменьшение массы образцов после ЭПП во всех исследованных РЭ может быть обусловлено, с одной стороны, химическим растворением оксидных пленок плавиковой кислотой, а с другой, их механическим разрушением в результате гидродинамического воздействия схлопывающихся пузырьков газа.

Влияние концентрации HF на скорость растворения оксидных пленок в процессе ЭПП подтверждено анализом РФЭ спектров, который показал, что поверхность всех экспериментальных образцов после обработки покрыта оксидом титана IV (Рисунок 7 а). Толщина оксидного слоя варьируется в зависимости от соотношения концентрации $\text{NH}_2\text{OH} \cdot \text{HCl}$ и NaF в РЭ, что видно из анализа интенсивностей пиков Ti (IV) и Ti (II) на глубине 10 нм от поверхности (Рисунок 7 б).

На спектрах с поверхности образцов 15 и 16, отполированных в растворе с высокой концентрацией $\text{NH}_2\text{OH} \cdot \text{HCl}$ присутствует пик Ti (II). На спектрах с поверхности образцов 6 и 1, отполированных в РЭ с низкой концентрацией $\text{NH}_2\text{OH} \cdot \text{HCl}$ и, соответственно, с низкой концентрацией HF, пик Ti (II) отсутствует, что свидетельствует о толщине оксидной пленки более 10 нм.

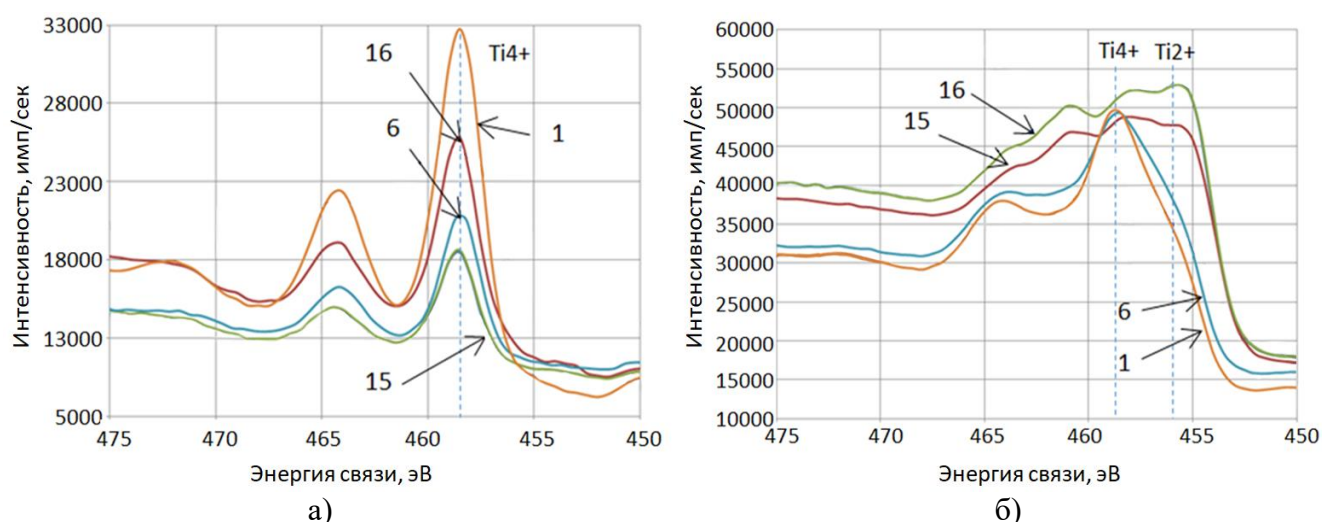


Рисунок 7 – РФЭ спектры дублета титана Ti 2p для образцов, обработанных при различном сочетании концентрации $\text{NH}_2\text{OH} \cdot \text{HCl}$ и NaF : а) до стравливания поверхностного слоя, б) после стравливания поверхностного слоя толщиной 10 нм

Пятая глава посвящена исследованию характеристик процесса ЭПП в разработанном РЭ применительно к деталям из двухфазного титанового сплава ВТ6: влияние на геометрические размеры, влияния на микроструктуру и микрогеометрию поверхностного слоя, усталостную прочность.

На основе экспериментальных данных, полученных на образцах, установлено, что при ЭПП в разработанном РЭ вдоль вертикальной оси обрабатываемой поверхности существует градиент скорости растворения материала, вызываемый воздействием гидростатического и Лапласова давления на толщину парогазовой оболочки, и аппроксимируемый выражением:

$$\Delta h = 3,9 \cdot Z^{-0,129} \pm 0,5; \quad (5)$$

где: Δh – скорость растворения металла на поверхности в мкм/мин;

Z – расстояние от нижнего торца в мм.

Максимальная скорость растворения материала поверхности наблюдается у нижнего торца экспериментального образца и составляет порядка 4,0 мкм/мин. На расстоянии более 20 мм от нижнего торца скорость растворения падает до 2,8...2,2 мкм/мин. Значимого влияния глубины погружения обрабатываемых экспериментальных образцов в РЭ на скорость растворения металла поверхности не выявлено.

Установленная зависимость (5) позволила спрогнозировать возможность применения данного явления для формирования профиля входной и выходной кромок пера лопатки. В связи с этим, на образцах-имитаторах, имеющих толщину 0,6; 0,8 и 1,0 мм, была исследована динамика изменения радиусов верхней и нижней кромок, относительно пространственного расположения образцов в ванне ЭПП. Анализ результатов измерений (Рисунок 8) показал: 1) скорость увеличения радиуса нижней кромки превышает таковую для верхней кромки, 2) в первые минуты полирования наблюдается ускоренный рост радиуса кромок,

обусловленный изначально высокой напряжённостью электрического поля на острых краях, 3) толщина образцов-имитаторов не оказывает существенного влияния на скорость роста радиуса кромок.

Экспериментальные данные по росту величины радиуса нижней и верхней кромки в пределах от 2-х до 10 мин ЭПП и толщин образцов 0,6...1,0 мм могут быть представлены в виде регрессионных моделей:

$$R_{\text{низ}} = -0,0011t^2 + 0,0402t - 0,0003 \quad (6)$$

$$R_{\text{верх}} = -0,0012t^2 + 0,0341t + 0,0026 \quad (7)$$

Проверка адекватности модели проведена по F-критерию Фишера и признана адекватной экспериментальным данным с уровнем значимости $\alpha=0,05$.

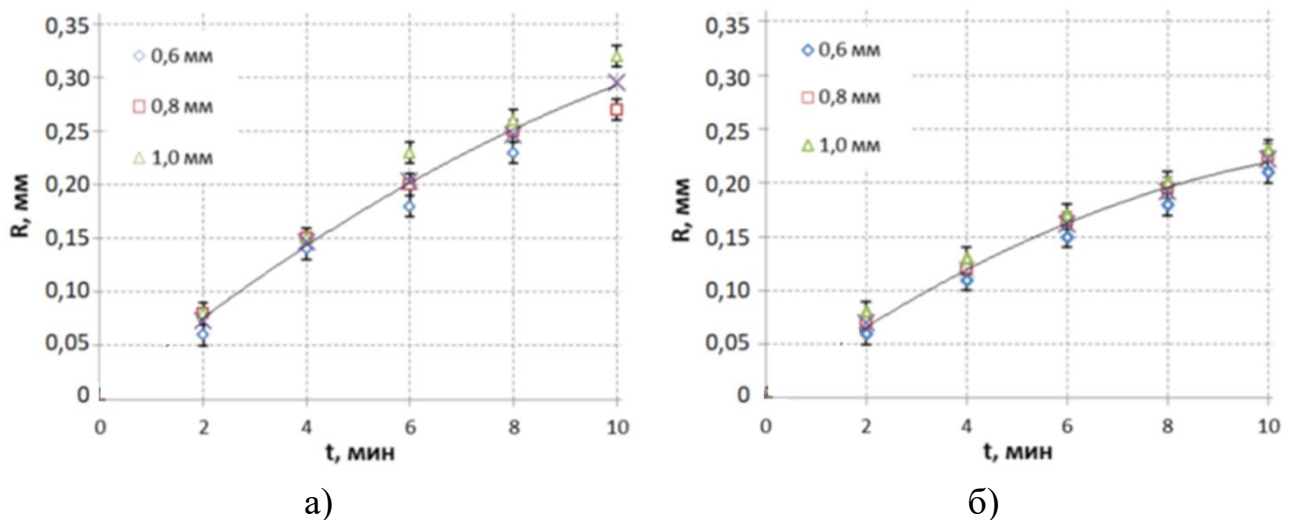


Рисунок 8 – Зависимость радиуса кромок от времени ЭПП для пластин из сплава ВТ6 толщиной 0,6; 0,8 и 1,0 мм: а) нижняя кромка, б) верхняя кромка

Измерение параметра шероховатости R_a , в процессе ЭПП образцов из титанового сплава ВТ6, позволило установить экспоненциальный характер его изменения от времени обработки, так же, как и для нержавеющей сталей и сплавов, описанный ранее в научных статьях под руководством Е.В. Парфенова и Ю. В. Синькевича. Установлено, что наиболее интенсивное снижение величины параметра R_a происходит в первые 2 минуты обработки (Рисунок 9) и обусловлено растворением местных выступов, от предшествующей обработки.

Неравномерность толщины ПГО вдоль обрабатываемой поверхности, обусловленная действием гидростатического и Лапласова давления,

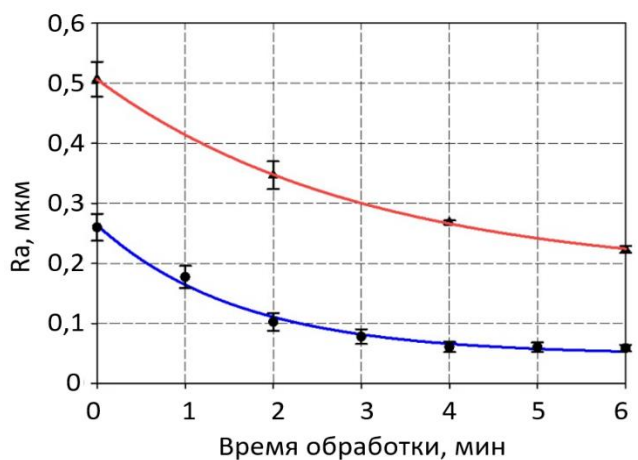


Рисунок 9 – График изменения параметра шероховатости R_a в процессе ЭПП для образцов из сплава ВТ6 с исходной R_a 0,27 и 0,50 мкм

приводит к увеличению скорости относительного сглаживания шероховатости вблизи нижней кромки на 15% (Рисунок 10).

Учитывая образование плавиковой кислоты в РЭ, был проведен оптико-эмиссионный контроль поверхностного слоя на наличие водорода, который показал, что после ЭПП его концентрация составляет 0,003...0,007% и не превышает концентрации в исходном состоянии. Отсутствие наводороживания поверхности при ЭПП можно объяснить высокой скоростью растворения поверхности, величина которой составляет от 2,2 до 4,0 мкм/мин, и формированием на ней сплошной однородной оксидной пленки толщиной не более 10 нм, препятствующей диффузии водорода вглубь обрабатываемого материала.

В ходе исследований установлено, что ЭПП образцов из сплава ВТ6 приводит к незначительному росту среднего значения микротвердости поверхностного слоя на 3...4% относительно исходного состояния, при этом размер области когерентного рассеяния и величина упругих деформаций кристаллической решётки не изменяются. Это свидетельствует об удалении при ЭПП разупрочненного поверхностного слоя толщиной 2...3 мкм, не обнаруживаемого фазовым рентгеноструктурным анализом ввиду большой эффективной глубины анализа. В совокупности с уменьшением величины концентраторов напряжений это приводит к росту предела выносливости конструктивно-подобных образцов с 500 ± 5 до 520 ± 5 МПа по сравнению с серийной технологией ручного полирования.

Шестая глава посвящена совершенствованию технологии производства лопаток компрессора ГТД из титановых сплавов посредством внедрения операции электролитно-плазменного полирования. Рассмотрены вопросы обеспечения равномерности толщины удаляемого при ЭПП поверхностного слоя по всей обрабатываемой площади пера лопатки и назначения величины припуска на операцию. Разработана методика контроля состояния РЭ в процессе эксплуатации. Приведены результаты усталостных испытаний натурных лопаток, обработанных по разработанному маршрутному технологическому процессу.

Разработан маршрутный технологический процесс финишной обработки поверхности пера лопаток компрессора ГТД из двухфазного титанового сплава ВТ6 с проведением операции ЭПП в две стадии с промежуточными операциями контроля обрабатываемой поверхности на отсутствие глубоких рисок от предыдущей операции и их удаления полировальными кругами.

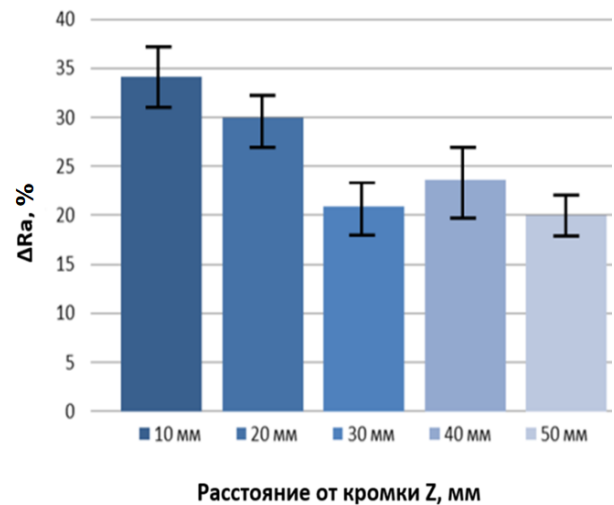


Рисунок 10 – Диаграмма относительного сглаживания ΔRa в зависимости от расстояния Z до нижнего торца при длительности обработки 2 мин

Для повышения равномерности толщины удаляемого при ЭПП поверхностного слоя по всей обрабатываемой площади пера лопатки, а также обеспечения одинаковых условий для формирования радиуса вдоль всей длины входной и выходной кромок пера разработана следующая схема размещения лопатки в ванне полирования: на первой стадии ЭПП ось Z лопатки располагают горизонтально (входной или выходной кромкой «вниз»), на второй стадии ЭПП лопатку переворачивают на 180 градусов относительно оси Z. Продолжительность первой и второй стадии ЭПП при этом составляет половину назначенного времени полирования. Расчеты по формуле (5) для ЭПП в течение 4-х минут гипотетической лопатки с постоянной по сечениям длиной хорды, равной 55 мм, показывают (Рисунок 11), что предлагаемая схема обработки обеспечивает уменьшение неравномерности (разности между величинами $\Delta H_{\max}$ и $\Delta H_{\min}$) с 5,0 до 1,6 мкм в сравнение с обработкой без переворота лопатки. Показано, что неравномерность обработки зависит от требуемой продолжительности ЭПП и длины хорды пера (Рисунок 12).

Разработаны технологические рекомендации по корректировке состава рабочего электролита, основанные на косвенном измерении количества плавиковой кислоты по показаниям датчика pH среды и фторидселективного электрода.

На положительном примере ЭПП лопаток компрессора из сплава ВТ8М-1, показана возможность применения разработанного электролита для обработки широко круга двухфазных титановых сплавов (ВТ6, ВТ8, ВТ18У).

Разработанный технологический процесс внедрен в основное производство ООО НПП «Уралавиаспецтехнология» и НПА «Технопарк АТ» для обработки деталей ГТД производства ПАО «ОДК-УМПО».

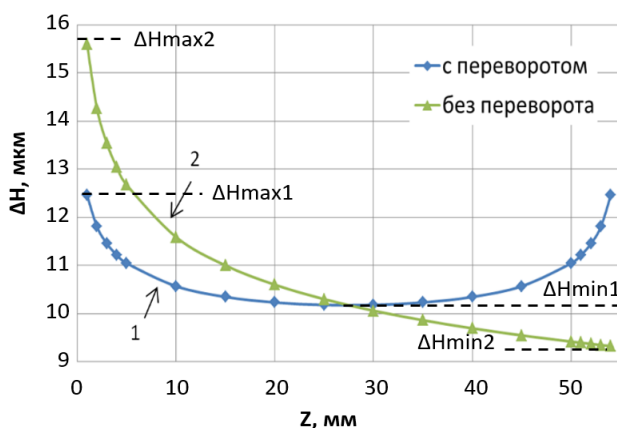


Рисунок 11 – Расчетная величина толщины удаляемого материала вдоль хорды лопатки после 4 минут ЭПП (для лопатки с длиной хорды 55 мм) при горизонтальном расположении оси Z и вертикальном расположении оси X в процессе обработки: 1 – с переворотом на 180° после 2-х минут полирования; 2 – без переворота

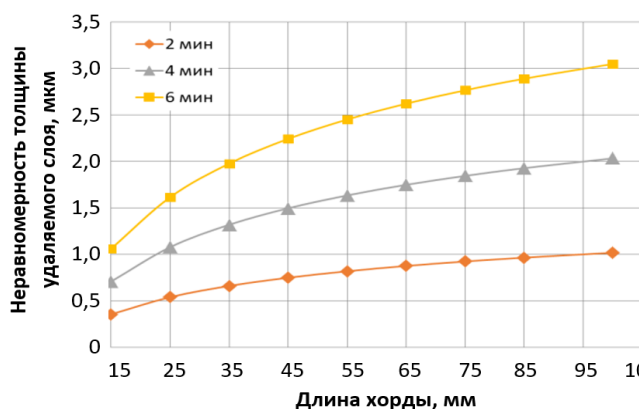


Рисунок 12 – Расчетный график изменения неравномерности толщины удаляемого слоя в зависимости от длины хорды пера лопатки и времени ЭПП при обработке по разработанным технологическим рекомендациям

Эффективность применения разработанного технологического процесса подтверждена результатами усталостных испытаний реальных лопаток из титанового сплава ВТ6, прошедших предварительную виброабразивную обработку. Результаты усталостных испытаний, проведенных в лаборатории прочности ПАО «ОДК-УМПО», показали, что после проведения ЭПП по разработанной технологии средняя шероховатость поверхности уменьшается с Ra 0,4 до Ra 0,2 мкм, а средний предел выносливости лопаток на базе 20 млн. циклов увеличивается на 21 МПа (с 363 ± 4 до 384 ± 4 МПа). Предел выносливости подтверждён по шести не разрушившимся лопаткам на каждый вид обработки. Таким образом, поставленные задачи выполнены, а цель исследования достигнута.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На основе теоретического и экспериментального исследования механизма финишной обработки поверхностного слоя титана и титановых сплавов методом электролитно-плазменного полирования установлена взаимосвязь pH среды фторидсодержащего РЭ, наличия оксидных пленок и следов избирательного травления межфазных границ на обработанной поверхности. Указанная взаимосвязь формализована в виде феноменологической модели, которая позволяет установить требования к компонентному составу рабочего электролита для финишной операции электролитно-плазменного полирования титана и титановых сплавов.

2. Разработан состав рабочего электролита для финишной операции ЭПП титановых сплавов и определены границы его применимости в виде экспериментально полученной математической модели, устанавливающей связь между концентрациями его компонентов и позволяющей осуществлять его технологическую корректировку в процессе эксплуатации по уровню минимальной равновесной концентрации HF.

3. Результаты экспериментальных исследований позволили установить взаимосвязь неравномерности толщины парогазовой оболочки вдоль обрабатываемой поверхности по глубине погружения и длительности финишной операции ЭПП в разработанном рабочем электролите с качеством поверхностного слоя. На основе этого разработаны технологические рекомендации по расположению обрабатываемых лопаток в рабочей ванне, обеспечивающие: повышение равномерности съема материала и величины шероховатости по поверхности пера, формирование радиуса на входных и выходных кромках пера без снижения усталостной прочности конструктивно подобных образцов.

4. Разработана усовершенствованная технология производства лопаток компрессора ГТД из двухфазного титановых сплавов ВТ6 с применением финишной операции электролитно-плазменного полирования в предложенном 3-х компонентном рабочем электролите, с возможностью его корректировки, и горизонтальным расположением лопатки при обработке в две стадии с поворотом на 180° после завершения половины расчётного времени операции ЭПП, что обеспечивает снижение неравномерности съема материала с 5,0 до 1,6 мкм,

снижение средней шероховатости поверхности с Ra 0,4 до Ra 0,2 мкм и повышение их предела выносливости с 363 ± 4 до 384 ± 4 МПа по сравнению с серийной технологией ручного полирования.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Научные публикации в изданиях, входящих в перечень ВАК РФ и международные реферативные базы данных и систем цитирования Web of Science, Scopus:

1. Смыслов, А. М. Обеспечение точности лопаток компрессора ГТД из двухфазных титановых сплавов при их электролитно-плазменном полировании / А. М. Смыслов, **Д. Р. Таминдаров** // Технология машиностроения. – 2025. – №1. – С. 16-20. (К2, ВАК, 2.5.6.).

2. **Tamindarov, D. R.** Effect of Electrolyte Composition on Plasma Electrolytic Polishing of Titanium Alloys / D. R. Tamindarov, A. M. Smyslov, A. V. Sidelnikov // Inorganic Materials: Applied Research. – 2023. – Vol.14. – P.732–737. (K1=Scopus Q3, 2023)

3. **Таминдаров, Д. Р.** Электролитно-плазменное полирование лопаток компрессора из титановых сплавов / Д. Р. Таминдаров, Н. В. Плотников, А. М. Смыслов // Вестник РГАТА имени П. А. Соловьева. – 2017. – № 1(40). – С. 141-145. (К3, ВАК, 2.5.6.)

4. Плотников, Н. В. К вопросу о модели электролитно-плазменного полирования поверхности / Н. В. Плотников, А. М. Смыслов, **Д. Р. Таминдаров** // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. – 2013. – Т. 17, № 4(57). – С. 90-95. (К2, ВАК)

Патенты на изобретения:

5. Патент 2552203 Российская Федерация, МПК C25F 3/16. Способ полирования деталей из титановых сплавов : № 2013138965/02 : заявл. 20.08.2013 : опубл. 10.06.2015 / Смыслов А. М., **Таминдаров Д. Р.**, Мингажев А. Д. [и др.] ; заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью "Научно-производственное предприятие "Уралавиаспецтехнология"

6. Патент 2706263 Российская Федерация, МПК C25F 3/16. Способ электролитно-плазменного полирования изделий из титановых и железохромоникелевых сплавов : № 2019101785 : заявл. 23.01.2019 : опубл. 15.11.2019 / Смыслов А. М., **Таминдаров Д. Р.**, Мингажев А. Д. [и др.] ; заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью "Научно-производственное предприятие "Уралавиаспецтехнология"

Прочие публикации:

7. Smyslova, M. K. Surface electrolytic-plasma polishing of ti-6al-4v alloy with ultrafine-grained structure produced by severe plastic deformation / M. K. Smyslova, **D. R. Tamindarov**, N. V. Plotnikov, I. M. Modina, I.P. Semenova // 5th international conference recent trends in structural materials, COMAT. – Pilsen. – 2018. – P. 012079.

8. Смыслов, А. М. Электролитно-плазменное полирование в технологии формировании поверхности лопаток ГТД / А. М. Смыслов, **Д. Р. Таминдаров** // Климовские чтения-2022: перспективные направления развития авиадвигателестроения : сборник статей научно-технической конференции. — Санкт-Петербург : Скифия-принт, 2022. — С. 177–180.

9. Галиев, В. Э. О проблемах и перспективах изготовления прецизионных компрессорных лопаток / В. Э. Галиев, Д. З. Фаткуллина, **Д. Р. Таминдаров** // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. — 2014. — № 4. — С. 10–25.

10. Smislov, A. M., Research into plasma polishing effect on processed paddle geometry dimension changes / A. M. Smislov, A. B. Samarkina, **D. R. Tamindarov** // Электрохимические и электролитно-плазменные методы модификации металлических поверхностей : материалы V Международной конференции. — Кострома : Костромской государственный университет им. Н.А. Некрасова, 2016. — С. 72.

11. Smislov, A. M., Research into plasma polishing effect on geometry change of processed paddle edges / A. M. Smislov, A. B. Samarkina, **D. R. Tamindarov**, N. V. Plotnikov // Электрохимические и электролитно-плазменные методы модификации металлических поверхностей : материалы V Международной конференции. — Кострома : Костромской государственный университет им. Н.А. Некрасова, 2016. — С. 79.

12. Smislov, A. M., Research into processes going in the anode-attached region during electrolyte plasma polishing / A. M. Smislov, A. B. Samarkina, **D. R. Tamindarov** // Электрохимические и электролитно-плазменные методы модификации металлических поверхностей : материалы V Международной конференции. — Кострома : Костромской государственный университет им. Н.А. Некрасова, 2016. — С. 80.

13. Самаркина, А.Б., Выбор электролита плазменной обработки титановых сплавов / А. Б. Самаркина, **Д. Р. Таминдаров**, А. М. Смыслов // Интеграция науки, образования и высокотехнологичного производства как основной фактор инновационного развития : материалы научно-практической конференции. — Уфа : УГАТУ, 2012. — С. 35–37.

14. Самаркина, А. Б., Электролитно-плазменное полирование титановых сплавов / А. Б. Самаркина, **Д. Р. Таминдаров**, А. М. Смыслов // Интеграция науки, образования и высокотехнологичного производства как основной фактор инновационного развития материалы научно-практической конференции. — Уфа : УГАТУ, 2012. — С. 38–40.

Соискатель

Таминдаров Д.Р.

ТАМИНДАРОВ Дамир Рамилевич

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА
ЛОПАТОК КОМПРЕССОРА ГТД ИЗ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ
НА ОСНОВЕ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ИХ ПОВЕРХНОСТИ
ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННЫМ ПОЛИРОВАНИЕМ

Специальность:

2.5.6. Технология машиностроения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук