УТВЕРЖДАЮ
Проректор по научной работе
ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий»
д.ф-м.н., доцент
_____ И.Ф. Шарафуллин
«16» 02 2026 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский университет науки и технологий»

Диссертация «Совершенствование технологии производства лопаток компрессора ГТД из титановых сплавов на основе повышения качества их поверхности электролитно-плазменным полированием» выполнена на кафедре «Технология машиностроения» Института технологий и материалов Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский университет науки и технологий» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

В период подготовки диссертации соискатель Таминдаров Дамир Рамилевич являлся лицом, прикрепленным к кафедре технологии машиностроения Института технологий и материалов Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский университет науки и технологий» по научной специальности 2.5.6. Технология машиностроения, а также работал заместителем технического директора Общества с ограниченной ответственностью Научно-производственное предприятие «Уралавиаспецтехнология», занимающемся разработкой технологии и оборудования для финишной упрочняющей обработки поверхности деталей.

В 2005 году окончил ГОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет» по специальности «Реновация средств и объектов материального производства в машиностроении».

Справка о сданных кандидатских экзаменах по дисциплине Иностранный язык (английский) и дисциплине 2.5.6. Технология машиностроения по научной специальности 2.5.6. Технология машиностроения (технические науки) выдана в 2025 г. ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий».

Удостоверение о сданном кандидатском экзамене по дисциплине История и философия науки (технические) по специальности 2.5.6. Технология машиностроения выдано в 2024 г. ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий».

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор Смыслов Анатолий Михайлович, профессор кафедры «Технология машиностроения»

ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

По итогам обсуждения принято следующее заключение:

1. Диссертация Таминдарова Дамира Рамилевича «Совершенствование технологии производства лопаток компрессора ГТД из титановых сплавов на основе повышения качества их поверхности электролитно-плазменным полированием» **является законченной научно-квалификационной работой**, соответствующей п. 9 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842 (в действующей редакции). В работе изложены научно обоснованные научно-технические и технологические решения в части обеспечения точности, шероховатости и качества поверхностного слоя при электролитно-плазменном полировании лопаток компрессора ГТД из двухфазных титановых сплавов. Разработан усовершенствованный технологический процесс электролитно-плазменного полирования лопаток компрессора ГТД из двухфазных титановых сплавов, обеспечивающий повышение их предела выносливости, что имеет существенное значение для развития машиностроительной отрасли страны.

2. Соискателем лично получены все основные результаты, выносимые на защиту:

1. Феноменологическая модель процесса ЭПП титана и титановых сплавов, формализующая механизм финишной обработки поверхностного слоя;
2. Состав рабочего электролита для финишной операции ЭПП титановых сплавов;
3. Результаты экспериментального исследования влияния финишной операции ЭПП на качество поверхностного слоя и усталостную прочность лопаток ГТД;
4. Усовершенствованная технология производства лопаток компрессора ГТД из двухфазных титановых сплавов с применением финишной операции электролитно-плазменного полирования взамен ручного механического.

В работах, опубликованных соискателем, приведены следующие результаты, полученные самим соискателем:

В работе [1] исследовано влияние электролитно-плазменного полирования на точность обработки лопаток компрессора газотурбинных двигателей из двухфазных титановых сплавов в разработанном рабочем электролите.

В работе [2] исследовано влияние состава рабочего электролита на достижение эффекта полирования титановых сплавов при реализации процесса электролитно-плазменного полирования. Исследования проведены на примере полирования титанового сплава ВТ6 в трехкомпонентном водном электролите, содержащем NaF, $NH_2OH \cdot HCl$ и KCl.

В работе [3] приведены результаты исследования влияния электролитно-плазменного полирования на изменение физико-химического состояния поверхности деталей из титановых сплавов, а также влияние данного метода обработки на усталостную прочность.

В работе [4] приведены результаты анализа моделей процесса ЭПП, сформулирована химико-физическая модель процессов, происходящих в момент полирования металлической детали.

В работах [8, 11] приведены обобщенные результаты исследований, дающие представление о возможности применения метода электролитно-плазменного полирования в технологии изготовления лопаток ГТД, в том числе для формирования округлой формы входной и выходной кромок пера.

В работе [7] рассмотрены проблемы изготовления лопаток с высокой точностью геометрии профиля. Проанализированы существующие технологические процессы изготовления прецизионных лопаток. Представлена технология изготовления лопаток с применением операции ЭПП, в которой исключено применение механических методов обработки пера.

Опубликованные работы полностью отражают основное содержание диссертационной работы. Все основные положения и результаты, выносимые на защиту, отражены в публикациях автора по главе 3 – [2, 12, 13], по главе 4 – [2, 4, 5, 6, 7], по главе 5 – [3, 7, 8, 9, 10, 11], по главе 6 – [1, 9, 14]. Статьи опубликованы совместно с научным руководителем и другими членами научного коллектива.

Личный вклад Таминдарова Д.Р. состоит в постановке задач, организации исследований, обработке и анализе полученных результатов. Совместно с соавторами подготовил и опубликовал научные статьи по теме диссертации.

3. 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.

4. Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

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.

5. Теоретическая значимость работы:

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.

6. Практическая значимость работы заключается в следующем:

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, гидроксиламина 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 ВТ6 и ВТ8М-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.

Результаты работы нашли реальное применение в основном производстве НПА «Технопарк АТ» и ООО НПП «Уралавиаспецтехнология» для обработки деталей ГТД производства ПАО «ОДК-УМПО».

7. Ценность научной работы заключается в следующем:

Ценность научной работы соискателя ученой степени кандидата технических наук заключается в создании научно обоснованной технологии электролитно-плазменного полирования лопаток компрессора ГТД из двухфазных титановых сплавов, обеспечивающей повышение качества поверхности и усталостной прочности, что достигается благодаря развитию представлений о механизме процесса и созданию методологической базы в виде разработанных феноменологической и математической моделей.

8. Соответствие содержания и названия диссертации заявленной специальности и отрасли науки

Анализ цели и задач диссертации, методов и методик их решения, полученных экспериментальных результатов, научных закономерностей и предложенных теоретических обоснований, а также сформулированных выводов и практических рекомендаций, позволяет заключить, что диссертация соответствует паспорту научной специальности 2.5.6. Технология машиностроения в частях:

– п. 2 – «Технологические процессы, операции, установы, позиции, технологические переходы и рабочие хода, обеспечивающие повышение качества изделий и снижение их себестоимости», так как разработана усовершенствованная технология производства лопаток компрессора ГТД из двухфазных титановых сплавов с применением финишной операции электролитно-плазменного полирования взамен ручного механического.

– п. 3 – «Математическое моделирование технологических процессов и методов изготовления деталей и сборки изделий машиностроения», так как

разработана феноменологическая модель процесса ЭПП титана и титановых сплавов, формализующая механизм финишной обработки поверхностного слоя.

– п. 4 – «Совершенствование существующих и разработка новых методов обработки и сборки с целью повышения качества изделий машиностроения и снижения себестоимости их выпуска», так как разработан состав рабочего электролита, позволяющий применить известный метод электролитно-плазменного полирования для финишной обработки лопаток ГТД из титановых сплавов.

– п. 7 – «Технологическое обеспечение и повышение качества поверхностного слоя, точности и долговечности деталей машин», так как содержит результаты экспериментального исследования влияния финишной операции ЭПП на качество поверхностного слоя и усталостную прочность лопаток ГТД из двухфазных титановых сплавов.

Отрасль науки – технические, поскольку приведенные в диссертации результаты исследований представляют собой новые научно обоснованные технические и технологические решения, а именно новые способы (патенты РФ № 2552203, № 2706263) и технологию финишной обработки лопаток компрессора ГТД из двухфазных титановых сплавов электролитно-плазменным полированием, обеспечивающую повышение качества их поверхности и усталостную прочность.

9. Полнота изложения материалов диссертации

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.

Общий объем публикаций – 7,9 п.л., авторский вклад – 6,9 п.л.

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. (К1=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.

Диссертация «Совершенствование технологии производства лопаток компрессора ГТД из титановых сплавов на основе повышения качества их поверхности электролитно-плазменным полированием» выполнена на кафедре «Технология машиностроения» соответствует п. 14 Положения о присуждении ученых степеней:

- отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем ученой степени работах, в которых изложены основные научные результаты диссертации;

- соискатель ссылается на авторов и источники заимствования.

Диссертация «Совершенствование технологии производства лопаток компрессора ГТД из титановых сплавов на основе повышения качества их поверхности электролитно-плазменным полированием» Таминдарова Дамира Рамилевича рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук по научной специальности 2.5.6. Технология машиностроения (отрасль науки технические).

Заключение принято на расширенном заседании кафедры «Технология машиностроения» ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Присутствовало на заседании 30 человек, в том числе 7 докторов наук (3 из которых по профилю диссертации), 15 кандидатов наук.

Результаты голосования: «за» – 30 человек, «против» – нет, «воздержалось» – нет.

Протокол № от «05» февраля 2026 г.

Заведующий кафедрой
«Технология машиностроения»,
д.т.н., проф. К. Н. Рамазанов

ДЛЯ ДОКУМЕНТОВ 2

Подпись Рамазанова К.Н.
Удостоверяю «06» 02 2026 г.
Начальник общего отдела УУНиТ
Ахметова Л.Ф.