

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе ФГБОУ

ВО «Московский авиационный

институт (национальный

исследовательский университет)»

А.В. Иванов

«26» 04 2026 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу

Селиванова Константина Сергеевича

«Многослойные ионно-плазменные покрытия для повышения износостойкости и долговечности лопаток турбомашин из титановых сплавов», представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 2.6.17.

Материаловедение (технические науки)

Актуальность темы выполненной работы

Повышение долговечности и надежности лопаточного аппарата турбомашин является одной из важнейших задач энергетического и авиационного машиностроения, напрямую влияющая на энергетическую безопасность страны. Лопатки современных газотурбинных двигателей и паровых турбин являются наиболее массовыми и ответственными деталями, работающими в составе газоперекачивающих агрегатов, электроустановок, тепловых и атомных электростанций.

Проблема надежности эксплуатации лопаточного аппарата обусловлена сочетанием высоких механических нагрузок и агрессивных условий, обусловленных влиянием эрозии, коррозии и воздействия газовых потоков с абразивными частицами, способствующих ускоренному износу. Упрочнение материала поверхности и разработка новых износостойких покрытий является одним из приоритетных направлений повышения долговечности лопаточного аппарата. Современные технологии поверхностной обработки, такие как плазменное напыление, ионная имплантация и другие, позволяют существенно повысить стойкость к коррозии и эрозии, а также улучшить сопротивляемость усталостным трещинам.

Диссертационная работа Селиванова Константина Сергеевича посвящена разработке и исследованию износостойких покрытий для повышения долговечности

лопаток из титановых сплавов, наиболее подверженных изнашиванию в процессе эксплуатации. Тема диссертационной работы является актуальной и соответствует приоритетным направлениям развития науки и техники, определенным «Энергетической стратегией Российской Федерации на период до 2030 года» (утв. распоряжением Правительства РФ № 1715-р от 13 ноября 2009 г.).

Диссертационная работа состоит из введения, семи глав, заключения, списка литературы, списка сокращений и условных обозначений, словаря терминов и девяти приложений.

Во введении обоснована актуальность выбранной темы, степень ее разработанности, изложена общая характеристика работы. Сформулированы цель и задачи исследования, его научная новизна, теоретическая и практическая значимость, а также положения, выносимые на защиту. Приведены данные по степени достоверности и апробации полученных результатов.

В первой главе автор проводит аналитический обзор открытых российских и зарубежных источников по теме диссертации. На основе анализа условий эксплуатации и характера разрушения лопаток из титановых сплавов, автор обоснованно предлагает основные пути повышения их износостойкости. Сделано предположение, что повышение эксплуатационных свойств рабочих лопаток из титановых сплавов возможно созданием на их поверхности специального многослойного покрытия путем целенаправленного сочетания слоев из тугоплавких металлов IV-V групп и их нитридов определенной толщины.

Вторая глава диссертационной работы посвящена разработке математических моделей напряженно-деформированного состояния материала многослойных ионно-плазменных покрытий, нанесенных на лопатки турбомашин из титановых сплавов. Методом конечных элементов исследованы напряжения и деформации в материале покрытия, возникающие при газоабразивном изнашивании и каплеударной эрозии. Предложено оптимальное сочетание толщин нитридных и металлических слоев по критерию минимального размера зоны пластической деформации (для лопаток компрессора газотурбинного двигателя, работающих в условиях газоабразивном изнашивании) и по критерию максимального рассеяния волн упругой деформации (для лопаток паровой турбины, работающих в условиях каплеударной эрозии).

В третьей главе дается описание теоретической базы для проведения комплексной вакуумной ионно-плазменной обработки (КВИПО), позволяющей объединять процессы ионной очистки, нагрева, имплантации и нанесения многослойных ионно-плазменных покрытий в одном вакуумном объеме. Автором предлагается математическая модель обработки лопаток компрессора ГТД и паровых турбин и нанесения на них многослойных покрытий с заданным сочетанием материалов, количеством и толщиной слоев.

В четвертой главе приведено описание использованных материалов, оборудования и методик экспериментальных исследований. Автор приводит описание усовершенствованной методики инструментального индентирования для сравнительной оценки прочности твердых покрытий по критерию максимального контактного давления. Для оценки фреттинг-коррозии автором предложена конструкция специальной испытательной установки, моделирующей контакт бандажных и антивибрационных полок рабочих лопаток.

В пятой главе приведены результаты экспериментальных испытаний лабораторных образцов и реальных лопаток с многослойными покрытиями. Исследования показали, что нанесением исследуемых покрытий достигается значительный рост износостойкости при газоабразивном износе (до 12,3 раза), каплеударной эрозии (до 2,8 раза) и фреттинг-коррозии (до 8,1 раза). Проведен анализ влияния ионной имплантации азота и последующего нанесения износостойких покрытий, установлено повышение предела выносливости (σ_{-1}) лопаток компрессора ГТД из титанового сплава ВТ6 на 18,2%.

Шестая глава посвящена практической реализации проведенных теоретических и экспериментальных исследований. Автором разработаны технологические рекомендации, использованные в технологических процессах нанесения износостойких покрытий на рабочие лопатки последних ступеней цилиндра низкого давления паровой турбины К-255-162 ТЭС «Альхольма» и рабочие лопатки компрессора низкого давления ГТД АЛ-31СТ. Приводятся результаты опытно-промышленной эксплуатации упрочненных лопаток, подтверждающие эффективность разработанных технологий.

В седьмой главе автором проводится регрессионный анализ экспериментальных данных с применением математического аппарата искусственных

нейронных сетей. Построены зависимости относительной износостойкости покрытий от их материала, толщины и количества слоев. Используя полученные модели, выполнен прогноз эксплуатационной долговечности лопаток с различными вариантами многослойных покрытий. Рассчитанные значения свидетельствуют о значительном увеличении межремонтного ресурса рабочих лопаток компрессора ГТД АЛ-31СТ из сплава ВТ6, от 2,3 до 2,8 раза по сравнению базовым вариантом обработки. Приведены результаты опытной эксплуатации упрочненных лопаток в составе газоперекачивающего агрегата ГПА-16Р «Уфа», а также результаты серийной обработки лопаток паровых турбин тепловых и атомных электрических станций производства АО «Силовые машины».

В заключении приведен перечень основных выводов и рекомендаций, сделанных по результатам проведенных исследований.

В приложениях описаны процессы комплексной ионно-плазменной обработки, использованные при моделировании процесса упрочняющей обработки, приведена компьютерная программа, реализующая представленную модель, приведены экспериментальные результаты испытания на газоабразивный износ и циклическую долговечность, результаты инструментального индентирования, титульные листы технологических процессов, методик и инструкций, разработанных по результатам работы, акты о внедрении в производство.

Значимость для науки результатов диссертационных исследований, полученных автором, заключается в научном обосновании и экспериментальном подтверждении возможности применения многослойных ионно-плазменных покрытий на основе тугоплавких металлов IV-V групп и их нитридов для повышения износостойкости и долговечности рабочих и направляющих лопаток турбомашин из титановых сплавов, эксплуатируемых в сложных условиях газоабразивного изнашивания, каплеударной эрозии и фреттинг-коррозии. Управление толщиной, количеством слоев и составом материалов покрытия позволяет целенаправленно влиять на механизмы и кинетику изнашивания лопаток турбомашин при эксплуатации, что обуславливает научно-обоснованную разработку износостойких защитных покрытий применительно к конкретным условиям эксплуатации.

Изучена роль границ металлических и нитридных слоев, влияющих на износостойкость и сопротивление усталости. Теоретически определено и

экспериментально доказано, что сопротивление развитию хрупких трещин на границах нитридных и металлических слоев является основным фактором повышения износостойкости покрытий.

Установлены закономерности влияния состава материалов, толщины и количества слоев многослойных покрытий на механизмы их разрушения и износа при газоабразивном износе, капельной эрозии и фреттинге.

Практическая значимость результатов диссертационных исследований, полученных автором

Результаты диссертационного исследования имеют высокую значимость для производства в области двигателестроения и энергетического машиностроения. Особое внимание заслуживают разработанные автором технологические рекомендации и технологические процессы нанесения износостойких многослойных ионно-плазменных покрытий на рабочие и направляющие лопатки турбомашин из титановых сплавов, что позволило существенно повысить их износостойкость и долговечность в реальных условиях эксплуатации. В ходе исследований предложены новые конструкции вакуумных установок и электрофизических устройств, обеспечивающих точное формирование многослойных покрытий с заданными параметрами конструкции, подтвержденные полученными патентами на изобретение РФ.

Практическая реализация разработок проведена на ведущих предприятиях России, включая ПАО «Газпром» и АО «Силовые машины», что подтверждается соответствующими актами и справками о внедрении. Разработанные технические условия (№0274-001-2015), технологии (№ВАТТ.900.006.000, №ВАТТ.900.007.000-2016, №УАСТ-1-001/1-16, №УАСТ-1-002/1-19, №203-01-04) и методика контроля качества покрытий (№УАСТ-024-001-00) внедрены в серийное производство АО «ОДК-Климов», ПАО «Силовые машины», ООО «Научно-производственное предприятие «Уралавиаспецтехнология». Более 10 тыс. рабочих лопаток паровых и газовых турбин с разработанными износостойкими покрытиями прошли эксплуатацию в составе полноразмерных изделий, обеспечив их эксплуатационную надежность и соответствие современным промышленным стандартам, что подтверждается имеющимися актами и справками о внедрении.

Конкретные рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации

Результаты и выводы диссертационной работы в виде разработанных инструкций, методик и технологических процессов можно рекомендовать к использованию в промышленных организациях, занимающихся изготовлением, ремонтом и сервисным обслуживанием газотурбинных двигателей наземного применения и паровых турбин ТЭС, ГРЭС и АЭС, таких как ПАО «ОДК-Газовые турбины» (г. Рыбинск), ПАО «ОДК-Сатурн» (г. Рыбинск), ПАО «Калужский турбинный завод» (г. Калуга), АО «Уральский турбинный завод» (г. Екатеринбург), ОАО «Калужский двигатель» (г. Калуга), ГК «Дизельзипсервис» (г. Санкт-Петербург), ООО «Русские газовые турбины» (г. Рыбинск), ООО «Ленинградский завод точного машиностроения» (г. Санкт-Петербург) и др.

Достоверность результатов диссертации, научных положений и выводов обеспечена достаточным объемом экспериментов, использованием государственных стандартов и общепризнанных современных методик испытаний и исследований, проводимых на поверенном оборудовании. Экспериментальные данные подтверждены статистической обработкой и успешной промышленной эксплуатацией.

По диссертации имеются замечания:

1. В разделе, посвященном методам исследования, следовало бы более четко разделить описания экспериментальных методик и теоретического моделирования, чтобы повысить ясность изложения.
2. В работе отмечается некоторое снижение предела выносливости после нанесения многослойных покрытий. При этом не указаны каковы практические ограничения по толщине покрытия для лопаток, работающих в условиях многоциклового усталости, а также существует ли оптимальное отношение «прочность/толщина» для разных типов покрытий.
3. В экспериментах по испытаниям на износ и устойчивость к фреттингу недостаточно полно представлена информация о количестве образцов и воспроизводимости результатов, что затрудняет оценку статистической достоверности полученных результатов.
4. В главе 5 диссертации подробно обсуждаются результаты рентгеноструктурного анализа образцов из сплава ВТ6 с нанесенным

многослойным покрытием, однако при этом не указано на наличие характерной для δ -TiN нитрида текстуры (111), о чем свидетельствуют относительные интенсивности рефлексов на рис. 5.85 (стр.242).

5. Не ясно насколько универсальны полученные зависимости и критерии износостойкости при капельно-ударной эрозии, например, для лопаток, отличающихся по геометрии и размерам от исследованных в работе, требуют ли они корректировки?
6. Экономический эффект от внедрения разработок упомянут косвенно, при этом не приведены более конкретные данные по снижению эксплуатационных затрат, увеличению межремонтного ресурса или стоимости обработки одной лопатки?

Сделанные замечания не снижают научной и практической значимости основных результатов, полученных автором, носят дискуссионный характер и не влияют на положительную оценку работы в целом.

Заключение

Диссертационная работа Селиванова Константина Сергеевича выполнена на высоком научно-техническом уровне. Она является самостоятельной квалификационной работой, в которой изложены новые научно обоснованные технические и технологические решения научной проблемы увеличения долговечности лопаток и, как следствие, надежности эксплуатации газовых и паровых турбин, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие энергетического машиностроения страны.

Результаты диссертационной работы, выносимые на защиту, прошли апробацию на 8 научно-технических конференциях, опубликованы в 45 научных публикаций, в т.ч. 11 статей в ведущих рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК, 8 статей - в рецензируемых журналах, включенных в базы данных Scopus и Web of Science, 3 – в других изданиях; 2 монографии; 1 учебное пособие; получено 20 патентов РФ на изобретение.

Автореферат и опубликованные работы полностью отражают содержание диссертации.

Диссертация соответствует критериям, установленным в пунктах 9, 10, 11, 13, 14 Положения о присуждении ученых степеней (Постановление Правительства РФ

№842 от 24.09.2013 г.), а ее автор заслуживает присуждения степени доктора технических наук по специальности 2.6.17. Материаловедение (технические науки).

Диссертационная работа, автореферат и отзыв ведущей организации рассмотрены и были обсуждены на заседании Учёного Совета Института №11, протокол № 04 от 24 декабря 2025 г.

Директор дирекции Института №11 «Новые материалы и производственные технологии» ФГБОУ ВО «МАИ», доцент, кандидат технических наук по специальности 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы, включая их регулирование и управление



Беспалов Александр Владимирович

Я, Беспалов Александр Владимирович, даю согласие на включение моих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку

Профессор Образовательного центра Института №11 «Новые материалы и производственные технологии» ФГБОУ ВО «МАИ», профессор, доктор технических наук по специальности 2.6.1 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов



Бецофен Сергей Яковлевич

Я, Бецофен Сергей Яковлевич, даю согласие на включение моих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» (ФГБОУ ВО «МАИ»),

Россия, 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4.

www.mai.ru

mai@mai.ru