

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертационную работу Селиванова Константина Сергеевича, выполненную на тему «Многослойные ионно-плазменные покрытия для повышения износостойкости и долговечности лопаток турбомашин из титановых сплавов» и представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 2.6.17. «Материаловедение» (технические науки)

Актуальность темы исследования

Актуальность диссертационного исследования обусловлена современными постоянно растущими требованиями к ресурсу, надежности и эффективности эксплуатации энергетического и нефтегазового оборудования. Особенно это касается лопаточных турбомашин, работающих в условиях повышенных вибраций и износа, что обуславливает необходимость разработки новых подходов к повышению служебных характеристик одних из наиболее массовых и ответственных деталей газовых и паровых турбин – рабочих и направляющих лопаток. Основной проблемой эксплуатации лопаток паровых турбин электрических станций и компрессоров газотурбинных двигателей, изготовленных из титановых сплавов, является их повышенный износ, приводящий к снижению сопротивления усталости, риску преждевременного разрушения лопаток и, как следствие, авариям, вынужденному простою дорогостоящего оборудования, экономическим потерям.

Существующие промышленные технологии упрочнения (традиционная термообработка, финишная обработка, в т.ч. нанесение однокомпонентных покрытий) часто являются неприемлемыми для упрочнения лопаточного аппарата из-за снижения циклической долговечности, что подтверждается известным опытом эксплуатации газотурбинных установок и паровых турбин тепловых и атомных электростанций. В этой связи тема диссертационной работы посвящена исследованию и разработке новых способов нанесения многослойных ионно-плазменных покрытий для повышения долговечности лопаток турбомашин из титановых сплавов.

Разработка многослойных функциональных покрытий представляет собой перспективное направление в современном материаловедении, позволяющее за счет варьирования состава материалов, количества и толщины отдельных слоев управлять процессами их разрушения и, таким образом, обеспечивать заданные трибологические характеристики применительно к конкретным условиям эксплуатации.

В представленной работе сформулировано новое научное направление, связанное с изучением материала поверхности после «Комплексной вакуумной ионно-плазменной обработки», которое включает в себя ионную очистку, ионную имплантацию (модификацию) поверхности, нагрев и послойное нанесение многокомпонентных покрытий с заданным составом материалов, толщиной и количеством слоев. Такой подход позволяет перейти от традиционного эмпирического выбора покрытий к целенаправленному проектированию

многослойных конструкций на основе математического моделирования напряженно-деформированного состояния материала, анализа распространения упругих волн деформаций и результатов экспериментального изучения механизмов изнашивания.

Таким образом, тема диссертационной работы «Многослойные ионно-плазменные покрытия для повышения износостойкости и долговечности лопаток турбомашин из титановых сплавов» является актуальной, обладает значительной практической ценностью и высоким научным потенциалом для развития современного прикладного материаловедения и отечественного машиностроения.

Краткая характеристика структуры и содержания диссертации

Диссертация состоит из введения, 7 глав, заключения, списка литературы из 312 наименований источников, списка сокращений и условных обозначений, словаря терминов, 9 приложений. Работа изложена на 439 страницах машинописного текста, включающих 50 таблиц и 218 рисунков.

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы цель и задачи, показана степень разработанности темы в мировой и отечественной практике. Выделены положения, выносимые на защиту, и отражена как теоретическая, так и практическая значимость исследований.

Первая глава содержит подробный анализ условий эксплуатации и основных причин разрушения лопаток турбомашин из титановых сплавов. Показано, что долговечность этих деталей существенно ограничивается возникновением и развитием усталостных трещин, абразивным износом, фреттинг-коррозией и каплеударной эрозией. Рассмотрены механизмы воздействия этих процессов на структурные изменения в материале. Обоснована необходимость создания многослойных покрытий на основе тугоплавких металлов IV-V групп и их нитридов, способных целенаправленно повысить износостойкость и долговечность рабочих лопаток из титановых сплавов, за счет подбора состава материалов, количества и толщины слоев.

Вторая глава посвящена численному моделированию напряженно-деформированного состояния многослойных ионно-плазменных покрытий при воздействии внешних эксплуатационных факторов (газоабразивной и каплеударной эрозии). На основе метода конечных элементов проведено моделирование локальных напряжений, пластических деформаций и коэффициентов интенсивности напряжений вблизи вершины трещины, распространяющейся через многослойную структуру.

Показано, что при развитии трещины в нитридных слоях у ее вершины возникает резкое увеличение локальных напряжений, способное вызвать ее самопроизвольный рост и переход в нижележащий титановый слой. Этот переход сопровождается релаксацией напряженного состояния и формированием энергетического барьера, тормозящего дальнейшее развитие трещины. Изученный механизм был использован в качестве основы для разработки нового подхода к

проектированию слоистых покрытий, рассматриваемых как система управления ростом трещины.

Одним из основных результатов главы стало установление оптимального соотношения толщин металлических и нитридных слоев (1:4), которое при газоабразивном изнашивании обеспечивает минимум растягивающих напряжений на поверхности, что снижает вероятность зарождения первичных трещин.

Необходимо отметить разработку физически обоснованного критерия стойкости к каплеударной эрозии. На основе теории упругих волн и модели плоскопараллельных композиционных структур предложен коэффициент изоляции (ослабления) волны упругих деформаций D . Этот коэффициент количественно характеризует способность многослойной структуры уменьшать амплитуду ударных волн за счет отражения и интерференции на границах слоев. Экспериментально доказана линейная зависимость между величиной коэффициента D и относительной эрозионной стойкостью покрытий, что подтверждает прогностическую ценность предложенной модели.

В целом, вторая глава формирует теоретический фундамент работы для дальнейшего проектирования архитектуры исследуемых покрытий, переходя от эмпирического подбора к физически обоснованному расчету, учитывающему как механику абразивного разрушения, так и волновую природу ударного воздействия эрозионных частиц.

Третья глава посвящена концепции комплексной вакуумной ионно-плазменной обработки (КВИПО), в рамках которой рассматриваются процессы ионной очистки, ионной имплантации (модификации) поверхности, нагрева и осаждения покрытий в едином вакуумном объеме. Разработана математическая модель КВИПО, позволяющая прогнозировать толщину и состав покрытия при различных схемах обработки лопаток. Модель учитывает планетарный характер вращения деталей в вакуумной камере при одновременном или последовательном нанесении покрытий с нескольких протяженных ионных источников. Предложенный подход обеспечивает практическую реализацию теоретически разработанных конструкций многослойных покрытий с заданным составом, количеством и толщиной слоев. Применимость такого подхода подтверждена несколькими патентами РФ на новые способы упрочнения лопаток, практическим внедрением на промышленных предприятиях и имеет ценность для специалистов в области вакуумно-плазменных технологий.

В четвертой главе диссертации подробно описаны методики металлографических исследований, растрового микроскопического и элементного анализа, фазового рентгеноструктурного анализа, измерения внутренних остаточных напряжений и микротвердости. Представлено описание оборудования и методик проведения испытаний образцов с покрытиями на стойкость к газоабразивному изнашиванию, каплеударной эрозии и многоциклового усталости. Детально описана методика и конструкция стенда для ускоренных сравнительных испытаний на фреттинг и фреттинг-коррозию образцов, моделирующих

трибосопряжение бандажных и антивибрационных полок рабочих лопаток турбомашин. Предложена новая методика определения механических свойств многослойных покрытий при их деформировании сферическими алмазными наконечниками, в которой за критерий разрушения принимается максимальное контактное давление.

Пятая глава представляет собой экспериментальный блок диссертационной работы, в котором количественно установлены связи между архитектурой многослойных покрытий и их функциональными свойствами в условиях многофакторного воздействия, характерного для эксплуатации турбомашин. Автором приводятся результаты ускоренных испытаний лабораторных образцов из титанового сплава ВТ6 на газоабразивное изнашивание, каплеударную эрозию, фреттинг-коррозию и многоцикловую усталость. Эксперименты выполнены с соблюдением действующих стандартов (ГОСТ 23.201-78, ГОСТ 23.211-80, 25.502-79 и др.), подтверждены металлографическим и фрактографическим анализом.

Особую ценность главы составляет количественное обоснование износостойкости разработанных покрытий к газоабразивному изнашиванию, каплеударной эрозии и фреттинг-коррозии. Раскрыты физические механизмы повышения износостойкости, а именно:

- установлена и экспериментально подтверждена роль некогерентных межфазных границ в нитридных титан-ванадиевых покрытиях как барьеров для развития хрупких трещин;
- изучен механизм фреттинг-стойкости многослойных нитрид титановых покрытий. Показано, что включение в покрытие тонких слоев α -Ti толщиной не менее 0,5 мкм улучшает сопротивление фреттинг-коррозии за счет формирования оксидов титана в зоне трения;
- экспериментально установлена линейная зависимость между теоретическим критерием рассеяния упругих волн и эрозионной стойкостью многослойных нитрид титановых покрытий.

Одним из основных результатов, полученных в пятой главе, является экспериментально установленная зависимость величины предела выносливости от общей толщины покрытия, которая согласуется с теоретической моделью, разработанной во второй главе, и позволяет целенаправленно разрабатывать защитные покрытия для лопаток турбомашин, обеспечивающие не только высокую износостойкость, но и повышенное сопротивление усталости. В частности, экспериментально установлено увеличение предела выносливости рабочих лопаток КНД 2 ступени ГТД АЛ-31СТ до 9,0% (база испытаний 20 млн. циклов) за счет комбинации ионной имплантации азота (доза $2 \cdot 10^{17}$ ион/см²) и последующего нанесения многослойного покрытия Ti + TiN общей толщиной 12,5 мкм.

Шестая глава диссертационной работы посвящена разработке и внедрению опытных технологических процессов нанесения многослойных ионно-плазменных покрытий на лопатки компрессора газотурбинных двигателей и паровых турбин, что

позволило осуществить промышленную реализацию полученных результатов исследований.

В главе подробно описаны особенности реализации процессов КВИПО на промышленной установке «Ватт-900-3Д», позволяющей в едином технологическом цикле совмещать ионную очистку, имплантацию (модификацию азота) поверхности, нагрев и осаждение многослойных покрытий с заданной архитектурой.

Основными результатами этой главы являются примеры практической реализации разработанных износостойких покрытий, подтвержденные актами и справками о внедрении на ПАО «ОДК», АО «Силовые машины», ПАО «Газпром»:

- разработан опытный технологический процесс упрочнения рабочих лопаток 1, 2 ступеней КНД ГТД АЛ-31СТ, применяемых в составе газоперекачивающих агрегатов, таких как ГПА-16Р «Уфа» и других;

- при участии СКБ «Турбина» (АО «Силовые машины») разработаны технологические инструкции, проведено упрочнение и опытная эксплуатация рабочих лопаток цилиндра низкого давления с износостойкими покрытиями в составе турбины К-255-162 на ТЭС «Альхольма» (Финляндия).

Седьмая глава диссертации представляет собой логическое завершение проведенных автором исследований взаимосвязи архитектуры и износостойкости многослойных покрытий и посвящена методологии прогнозирования эксплуатационной долговечности лопаток турбомашин с многослойными ионно-плазменными покрытиями.

На основе массива экспериментальных данных, полученных в пятой главе, с использованием метода искусственных нейронных сетей (ИНС) установлены регрессионные зависимости между составом, толщиной, архитектурой покрытия и его сопротивлением к газоабразивному износу, каплеударной эрозии. Адекватность полученных моделей была верифицирована с помощью экспериментальных данных и расчета относительной ошибки аппроксимации, что обеспечило необходимую степень достоверности.

Далее, с учетом критериев предельного износа рабочих лопаток и в соответствии с действующими стандартами определены коэффициенты ускорения испытаний, что позволило экстраполировать лабораторные результаты на реальные условия эксплуатации. На этой основе выполнен прогноз эксплуатационной долговечности рабочих лопаток компрессора газотурбинных установок и лопаток последних ступеней цилиндра низкого давления паровых турбин. Достоверность прогнозов подтверждена данными опытной эксплуатации и отражена в актах о внедрении ПАО «ОДК-УМПО» и АО «Силовые машины».

В заключении автором обобщаются основные полученные в ходе диссертационного исследования результаты и даются рекомендации по их использованию

Достоверность и обоснованность положений и выводов диссертации

Достоверность и обоснованность полученных результатов, научных положений и выводов обеспечена достаточным объемом проведенных исследований, использованием общедоступных и стандартных методов испытаний, а также применением современного исследовательского оборудования. Результаты, полученные различными независимыми методами, взаимно подтверждают друг друга, демонстрируют хорошую воспроизводимость и согласуются как с теоретическими расчетами, так и с данными опытной эксплуатации на реальных изделиях. Достоверность и высокая практическая значимость результатов работы также подтверждается промышленным внедрением на предприятиях ПАО «ОДК», АО «Силовые машины», ПАО «Газпром» и полученными двадцатью патентами на изобретение.

Основные результаты диссертации опубликованы в 45 научных публикациях, включающих 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.

Автореферат диссертации в полной мере отражает основное содержание, научную новизну и практические результаты проведенного исследования. Оформление диссертации и автореферата соответствует действующим требованиям, предъявляемым к докторским диссертациям. Работа характеризуется логичной структурой, внутренней взаимосвязью глав, последовательным изложением материала и технически грамотным языком. Текст хорошо иллюстрирован.

Научная новизна результатов диссертационной работы

Научная новизна полученных результатов заключается разработке нового научного направления в области инженерии поверхности, посвященного исследованию материала после «Комплексной вакуумной ионно-плазменной обработки», подробно изложенной в третьей главе, а также в выявлении фундаментальных закономерностей поведения многослойных ионно-плазменных покрытий на основе тугоплавких металлов IV, V групп и их нитридов в условиях эксплуатационного воздействия.

В качестве новых научных результатов автором выдвинуто положение о том, что износостойкость титановых сплавов при газоабразивном изнашивании, каплеударной эрозии, фреттинге и фреттинг-коррозии может достигаться путем целенаправленного изменения состава материалов, толщины и количества слоев многослойного покрытия на основе тугоплавких металлов IV–V групп и их нитридов. Экспериментально подтверждено, что такой подход обеспечивает повышение износостойкости при газоабразивном изнашивании до 12,3 раза; при каплеударной эрозии – до 2,8 раза; при фреттинг-коррозии – до 8,1 раза.

При исследовании микроструктуры покрытий были выявлены физико-химические механизмы, лежащие в основе их высокой износостойкости. Впервые показано, что при нанесении титан-ванадиевых нитридных покрытий в реакционной азотной среде формируются твердые растворы внедрения азота в кристаллические решетки титана и ванадия, а также мелкодисперсные (порядка 50 нм) фазы δ -TiN и VN с некогерентными границами.

На основе полученных автором экспериментальных и теоретических исследований получены новые закономерности изнашивания многослойных покрытия в условиях газоабразивной и каплеударной эрозии, что позволило сформулировать количественные требования к архитектуре покрытий:

- толщина нитридных слоев должна более чем в 2 раза превышать глубину возникновения максимальных эквивалентных (по Мизесу) напряжений при ударе абразивными частицами;

- соотношение толщин нитридных и металлических слоев должно стремиться к 4:1, что обуславливает минимальную величину растягивающих напряжений на поверхности и снижает вероятность возникновения хрупких трещин;

- твердость нитридных слоев должна превышать твердость абразивных частиц более чем в 1,5 раза.

Также впервые установлено, что включение в состав многослойных нитридных покрытий слоев α -Ti толщиной не менее 0,5 мкм обеспечивает защиту от фреттинг-коррозии за счет окисления титана и попадания его в зону трения, где он выступает в качестве «твердой смазки».

Необходимо отметить предложенный критерий оценки эрозионной стойкости многослойных покрытий $max(D)$. Впервые теоретически обосновано и экспериментально подтверждено, что относительная износостойкость исследованных покрытий при каплеударной эрозии линейно зависит от величины D , что позволяет прогнозировать их эффективность на этапе проектирования, без дорогостоящих испытаний.

Оценка теоретической и практической значимости результатов работы

Представленная диссертация обладает высокой теоретической и практической значимостью, что подтверждается как новизной полученных результатов, так и результатами их промышленного внедрения.

Теоретическая значимость работы заключается в предложенной автором концепции упрочнения титановых сплавов путем целенаправленного проектирования архитектуры многослойных ионно-плазменных покрытий на основе тугоплавких металлов IV–V групп и их нитридов. Впервые установлены фундаментальные закономерности процессов изнашивания при газоабразивном износе, каплеударной эрозии, фреттинге и фреттинг-коррозии от основных параметров конструкции покрытия (толщина, количество слоев, состав материалов). Теоретически обоснован критерий ослабления волн упругих деформаций от удара

твердой частицы по многослойному покрытию, впервые количественно связывающий физико-механические свойства слоистой композиционной структуры с ее эрозионной стойкостью.

Создана математическая модель нанесения многослойных ионно-плазменных по крытий на лопатки турбомашин при их планетарном вращении вокруг собственной оси и оси вакуумной камеры, позволяющая с высокой точностью (до 0,01 мкм) прогнозировать скорость роста покрытия и количественное соотношение материалов, наносимых с нескольких одновременно работающих ионных источников.

Высокая практическая значимость диссертации подтверждается внедрением полученных теоретических и экспериментальных результатов в отечественное машиностроение. Разработаны и запатентованы (получено 20 патентов РФ) новые способы нанесения многослойных покрытий и конструкции вакуумных установок с несколькими ионными источниками, обеспечивающие формирование покрытий с заданными параметрами на деталях сложной формы.

Совместно с ведущими отечественными промышленными предприятиями разработаны и внедрены в производство технологические процессы для упрочнения лопаток стационарных газотурбинных установок (в том числе импортных, работающих в системе ПАО «Газпром») и паровых турбин тепловых и атомных станций.

Разработана методика инструментального индентирования и способ оценки адгезионной прочности покрытий (патент №2728732), внедренные в производство ООО «НПП УралавиаСПЕЦТЕХНОЛОГИЯ» в виде методических указаний №УАСТ-024-001-00 «Контроль механических свойств и адгезионной прочности твердых покрытий при их индентировании алмазными наконечниками».

Замечания, вопросы и рекомендации по диссертационной работе

1. Во второй главе (стр. 50-57) автором подробно описано численное моделирование внутренних остаточных напряжений, возникающих в многослойных покрытиях? Есть ли сравнение полученных результатов с экспериментальными данными об их величине и распределении в поверхности?

2. Чем обоснован выбор титанового сплава ВТ6 в качестве базового материала для исследования и насколько полученные результаты могут быть применимы к другим широко используемым титановым сплавам, используемых в производстве лопаток: ВТ3, ВТ18, ВТ20 и др.?

3. Является ли предложенный автором коэффициент изоляции D (формула (2.24), стр. 82) авторской разработкой или он известен, например, из теории акустики?

4. При выборе режимов ускоренных испытаний на газоабразивное изнашивание (глава 5, стр. 171) автор ссылается на ГОСТ 23.201-78. Чем обоснован выбор режимов испытаний на каплеударную эрозию (глава 5, стр. 181), например,

почему при испытаниях выбрана скорость удара капель 250 м/с? Соответствует ли это реальным условиям работы паровых турбин?

5. Чем принципиально отличается используемая «Комплексная вакуумная ионно-плазменная обработка» (глава 6, стр. 265) от известных комбинированных методов упрочнения, например, обработка в тлеющем разряде + магнетронное распыление?

6. Как может быть обеспечена воспроизводимость параметров разработанных покрытий (толщина, состав) при масштабировании опытной технологии до уровня серийного производства? Какие методы контроля качества при этом могут быть использованы, например, как обеспечить контроль заданной толщины и состава слоев покрытия в серийном процессе?

7. При разработке технологии нанесения покрытий на лопатки, одних из самых массовых деталей, следовало бы уделить внимание вопросу их ремонтпригодности.

8. На стр. 319 написано «При этом наблюдается двукратное уменьшение размеров зоны пластической деформации, возникающей перед трещиной в металлических слоях...». Что означает «двукратное уменьшение зоны пластической деформации» – по сравнению с чем?

9. В ряде глав имеется избыточная детализация методик, что, на мой взгляд, утяжеляет восприятие материала. По тексту также имеются незначительные неточности и опечатки.

Высказанные замечания не снижают значение полученных автором результатов диссертационной работы и не ставят под сомнение их научную и практическую значимость.

Заключение о соответствии диссертации требованиям ВАК Минобрнауки РФ, установленным в Положении о присуждении ученых степеней

Диссертационная работа Селиванова Константина Сергеевича, выполненная на тему «Многослойные ионно-плазменные покрытия для повышения износостойкости и долговечности лопаток турбомашин из титановых сплавов» является завершенной логичной и хорошо структурированной научно-квалификационной работой в области многослойных ионно-плазменных покрытий и вакуумно-плазменных технологий. На основании выполненных автором исследований разработаны теоретические положения, позволяющие решить научную проблему обеспечения надежности эксплуатации энергетического оборудования (газовых и паровых турбин) путем упрочнения и повышения долговечности их наиболее ответственных деталей, что в совокупности имеет важное хозяйственное значение.

В целом по актуальности решаемой проблемы, научной новизне, практической значимости, достоверности полученных результатов и обоснованности выводов, диссертационная работа Селиванова К.С., выполненная на

тему «Многослойные ионно-плазменные покрытия для повышения износостойкости и долговечности лопаток турбомашин из титановых сплавов» соответствует паспорту специальности 2.6.17. «Материаловедение» (технические науки) и критериям, установленным в пунктах 9-11, 13, 14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденных постановлением Правительства РФ №842 от 24.09.2013 г., а ее автор Селиванов Константин Сергеевич заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 2.6.17. «Материаловедение» (технические науки).

Профессор кафедры высокоэффективных технологий обработки ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»,
доктор технических наук (05.16.06 Порошковая металлургия и композиционные материалы), доцент

М.П.

Шехтман Семён Романович

Дата: 24.12.2025

ФГБОУ ВО «Московский государственный
технологический университет «СТАНКИН»,
127994, ГСП-4, г. Москва, Вадковский пер., д.1
Тел. +7 (499) 973-38-85
Email. rector@stankin.ru

Отметка «Подпись удостоверяю»



Подпись руки Шехтман С.Р. удостоверяю

УдМК ФГАОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»

Главной печатью

Варнаева М.Р.