

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 и новизна темы исследования. Одним из приоритетных направлений развития современного материаловедения является разработка новых материалов с заданными функциональными и эксплуатационными свойствами. В Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации, утвержденной Указом Президента РФ № 642 от 1 декабря 2016 г., создание материалов и технологий обработки поверхности с заранее заданными свойствами отнесено к приоритетам долгосрочного научно-технологического развития страны. Особо отмечена важность исследований, связанных с разработкой износостойких покрытий и методов упрочнения материалов, обеспечивающих надежность изделий в различных отраслях промышленности.

Тема диссертационной работы Селиванова К.С. посвящена созданию износостойких ионно-плазменных покрытий, применяемых для повышения долговечности лопаток турбомашин из титановых сплавов. Газовые и паровые турбины широко применяются в различных секторах экономики России. Они составляют основу работы тепловых и атомных электростанций, обеспечивая выработку значительной доли электроэнергии, широко используются в газотранспортной системе, металлургическом и нефтехимическом производстве, а также находят применение в авиационной и морской технике. Такое многообразие областей применения турбомашин предъявляет повышенные требования к долговечности их узлов, в частности лопаточного аппарата, от состояния которого в значительной степени зависит надежность и безопасность эксплуатации всего турбоагрегата. В связи с этим разработка и внедрение технологий нанесения многослойных ионно-плазменных покрытий, повышающих эксплуатационную долговечность лопаток турбомашин, имеет высокую практическую значимость для отечественного энергомашиностроения.

Таким образом, актуальность и новизна настоящего исследования обусловлена как фундаментальными задачами материаловедения, связанными с созданием новых материалов и покрытий с заданными свойствами, так и с практическими потребностями отраслей промышленности в повышении ресурса и надежности критически важных узлов турбомашин.

Структура работы. Диссертационная работа состоит из введения, семи глав, заключения, списка литературы, девяти приложений, списка сокращений и условных обозначений. Диссертация изложена на 439 страницах, содержит 218 рисунков и 50 таблиц, список литературы насчитывает 312 источников.

Краткая характеристика структуры и содержания работы. Во введении автор обосновал актуальность темы, дал подробную характеристику темы и уровень ее разработанности, сформулировал цель и задачи исследований. Представлены положения, выносимые на защиту, изложена научная новизна и практическая значимость, описана методология и апробация результатов, а также другие требуемые пункты.

Первая глава посвящена анализу условий эксплуатации и механизмов разрушения лопаток турбомашин. Установлено, что основными причинами их преждевременного разрушения являются охрупчивание материала поверхностного слоя, образование концентраторов напряжений и низкие трибологические свойства титановых сплавов. Автор провел анализ результатов, имеющих в литературе, обобщил современные подходы к повышению долговечности лопаток турбомашин из титановых сплавов и пришел к выводу, что наиболее перспективным методом упрочнения их поверхности является нанесение многослойных ионно-плазменных покрытий на основе тугоплавких металлов и их нитридов с заданными толщиной и составом материалов слоев.

Вторая глава посвящена математическому моделированию напряженно-деформированного состояния материала многослойных покрытий методом конечных элементов, реализованного в программных комплексах Ansys и Comsol. Установлены оптимальные соотношения толщины нитридных и металлических слоев по критерию минимизации размеров зоны пластической деформации в области вершины трещины. Сделано предположение о роли границ слоев в качестве барьеров, тормозящих развитие трещин. Предложен критерий стойкости многослойных покрытий к каплеударной эрозии, основанный на оценке способности покрытия рассеивать волны упругой деформации, возникающие при ударном воздействии эрозионных капель.

В третьей главе изложены теоретические основы разрабатываемого автором процесса комплексной вакуумной ионно-плазменной обработки (КВИПО) лопаток турбомашин, объединяющем в одном объеме несколько видов обработки. Разработана математическая модель упрочнения лопаток, позволяющая прогнозировать основные параметры процессов ионного травления, ионной имплантации и нанесения многослойного покрытия с заданным количеством, толщиной и составом материалов слоев. Получены теоретические зависимости скорости нанесения многослойных покрытий для различных схем обработки рабочих лопаток компрессора ГТД и паровых турбин. Предложенная математическая модель была использована при разработке новых способов упрочнения лопаток из титановых сплавов для изделий энергетического машиностроения, что подтверждается приведенными патентами на изобретения.

В четвертой главе приводится описание использованных методик исследований, обеспечивающих достоверность и воспроизводимость экспериментальных результатов. Автором предложена методика инструментального индентирования и определения прочности разрушения исследуемых покрытий.

Предлагаемая методика отличается от известных (например, ASTM C1624-2022) тем, что за критерий разрушения материала покрытия принимается величина эквивалентного напряжения, определяемая по полученным экспериментальным данным. Далее приведено описание экспериментальной установки для испытаний на фреттинг и фреттинг-коррозию образцов с криволинейными поверхностями, позволяющей воспроизводить реальные условия эксплуатации лопаток с бандажными и антивибрационными полками.

В пятой главе приведены результаты металлографических исследований и рентгеноструктурного анализа. Автором сделан вывод, что при одновременном осаждении титана и ванадия в материале покрытия возникает образование твердого раствора β -Ti вследствие внедрения V в α -Ti и стабилизации его в β -области. Кроме того, при нанесении в среде реакционного газа (азота) в титан-ванадиевом покрытии образуются мелкодисперсные нитридные частицы: δ -TiN, ϵ -Ti₂N и V_xN_y, обуславливающие дисперсионное упрочнение покрытия.

Приведены результаты экспериментальных исследований многослойных покрытий различной толщиной и с различным числом слоев и их материалов на газоабразивное изнашивание, каплеударную эрозию, фреттинг-износ, многоцикловую усталость. Установлено, что нанесение многослойных ионно-плазменных покрытий позволяет увеличить стойкость титанового сплава ВТ6 к газоабразивной эрозии до 12,3 раза, к каплеударной эрозии – до 2,3 раза, к фреттинг-износу – до 8,1 раза.

Испытания на многоцикловую усталость выявили положительный эффект предварительной ионной имплантации азота дозой $2 \cdot 10^{17}$ ион/см², обеспечивающей повышение предела выносливости образцов и лопаток (σ_{-1}) из сплава ВТ6 на 18...26% за счет субструктурного упрочнения и формирования остаточных напряжений сжатия до -850 МПа. Последующее нанесение покрытий сопровождается некоторым снижением предела выносливости. Автором сделано предположение, что наблюдаемое снижение предела выносливости является следствием возникновения в материале подложки остаточных напряжений растяжения, величина которых зависит от толщины покрытия и от внутренних напряжений в нем. Экспериментально показано, что ионная имплантация азота с последующим осаждением многослойного покрытия заданной архитектуры позволяет целенаправленно обеспечивать требуемую износостойкость и предел выносливости лопаток, что является принципиально важным для повышения их долговечности.

Шестая глава посвящена разработке и внедрению технологических процессов нанесения многослойных ионно-плазменных покрытий с заданным количеством, толщиной и составом каждого слоя. Приведены данные опытно-промышленной эксплуатации упрочненных лопаток компрессора ГТД АЛ-31СТ, работающего в составе ГПА-16Р «Уфа», и лопаток цилиндра низкого давления

(ЦНД) паровой турбины К-255-162 ТЭС «Альхольма», подтверждающие высокую эффективность разработанных покрытий.

Седьмая глава посвящена прогнозированию долговечности лопаток с нанесенными износостойкими покрытиями. С помощью математического аппарата искусственных нейронных сетей автором установлены зависимости относительной износостойкости от толщины, числа и состава материалов слоев. Предложена методика оценки эксплуатационной долговечности многослойных ионно-плазменных покрытий, проводимой по результатам ускоренных испытаний на газоабразивный износ и капельно-ударную эрозию с помощью коэффициента ускорения испытаний в соответствии с ГОСТ Р 51372-99.

Приведены результаты расчетов прогнозируемой долговечности лопаток газовых и паровых турбин из титанового сплава ВТ6 с различными многослойными покрытиями, предложены варианты наиболее перспективных. Разработаны технические рекомендации и комплекты технологической документации на упрочнение рабочих лопаток компрессора АЛ-31СТ производства ПАО «ОДК-УМО» и лопаток последних ступеней ЦНД паровых турбин ТЭС и АЭС различной мощности производства АО «Силовые машины».

В заключении приведены выводы по диссертационной работе, сделано обобщение полученных результатов, предложены рекомендации и перспективы дальнейших исследований. **В приложениях А-К** представлены акты о внедрении, результаты различных экспериментальных испытаний, численного моделирования, описаны процессы комплексной ионно-плазменной обработки, представлена компьютерная программа.

Степень обоснованности и достоверность результатов работы. Достоверность и обоснованность полученных в диссертационной работе результатов, научных положений и выводов основана на большом количестве выполненных экспериментов, на использование методов математического планирования эксперимента и статистической обработки данных. Применялись современные общепринятые методики оптической и электронной микроскопии, рентгеноструктурного и рентгенофазового анализа, методы определения внутренних остаточных напряжений и численное моделирование методом конечных элементов в широко распространённых программных продуктах Ansys и Comsol. В экспериментальной части работы были использованы стандартные методики определения микротвердости, проведения испытаний на газоабразивное изнашивание, фреттинг и фреттинг-коррозию, многоцикловую усталость.

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в девятнадцати статьях в ведущих рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАКа также в рецензируемых журналах, входящих в базы данных Scopus и Web of Science. Материалы исследований докладывались на восьми научных конференциях, четыре из которых являлись международными.

Новизна научных диссертационной работы, положений, выводов и рекомендаций заключается в теоретическом обосновании и экспериментальном

подтверждении существенного повышения долговечности рабочих и направляющих лопаток газовых и паровых турбин из титановых сплавов за счет нанесения многослойных композитных ионно-плазменных покрытий на основе. Установлены фундаментальные зависимости между элементным и фазовым составами, структурой, толщиной отдельных слоев покрытия и их физико-механическими свойствами. Теоретически и экспериментально показано, что целенаправленное формирование многослойной структуры позволяет повышать износостойкость и долговечность титановых сплавов в условиях газоабразивного изнашивания, каплеударной эрозии и фреттинга.

Автором исследованы физико-химические процессы плазмообразования и осаждения многослойных нитридных покрытий. Установлены закономерности формирования твердых растворов и фазовых превращений в системе Ti-V-N, обеспечивающих повышение прочности и твердости покрытий. Выявлены механизмы образования некогерентных межфазных границ, обеспечивающих высокое сопротивление пластической деформации. Определены закономерности торможения зародышевых трещин и рассеяния упругих волн на границах слоев покрытия.

В работе предложены критерии подбора состава материалов и параметров архитектуры многослойных покрытий с учетом конкретных эксплуатационных условий работы лопаток турбомашин. Обосновано оптимальное соотношение толщин нитридных и металлических слоев, позволяющее минимизировать возникающие в покрытии напряжения и, таким образом, уменьшать вероятность возникновения трещин.

Экспериментально установлена роль промежуточных титановых слоев, обеспечивающих снижение интенсивности фреттинг-коррозии. Установлены регрессионные зависимости относительной износостойкости при газоабразивном износе и каплеударной эрозии от толщины, количества слоев и состава материалов покрытия. Предложены научно обоснованные методы прогнозирования эксплуатационной долговечности лопаток турбомашин с ионно-плазменными покрытиями на основе экспериментальных результатов ускоренных испытаний и установленных регрессионных зависимостей. Повышение долговечности упрочненных лопаток подтверждено результатами опытной эксплуатации в составе полноразмерных изделий, что обеспечивает высокую достоверность прогноза и открывает возможность применения разработанной методики в энергетическом машиностроении.

Теоретическая значимость результатов диссертационной работы состоит в развитии научных представлений о закономерностях формирования и функционирования многослойных ионно-плазменных покрытий на основе тугоплавких металлов IV–V групп и их нитридов, применяемых для упрочнения и повышения износостойкости титановых сплавов. В работе обоснованы принципы управления физико-механическими свойствами покрытий за счет целенаправленного изменения их структуры, толщины и последовательности слоев.

Установлены механизмы торможения зарождения и развития трещин на межфазных границах, выявлена роль чередования металлических и нитридных прослоек в повышении стойкости к газоабразивному изнашиванию, каплеударной эрозии и фреттингу. Предложен новый критерий – максимальное рассеяние упругой волны $\max(D)$, позволяющий теоретически прогнозировать эрозионную стойкость покрытий.

В работе разработаны математические модели напряженно-деформированного состояния материала многослойных покрытий с различной архитектурой при газоабразивном и эрозионном воздействии, позволяющие прогнозировать их прочность, что подтверждается экспериментальными результатами инструментального индентирования. Разработана математическая модель комплексной ионно-плазменной обработки, позволяющая проводить численный расчет скорости осаждения и распределения толщины покрытия при планетарном вращении лопаток.

Практическая ценность результатов состоит в том, что полученные с помощью математической модели зависимости параметров покрытия от режимов обработки подтверждены экспериментально при разработке новых способов нанесения многослойных покрытий с заданной архитектурой и составом слоев. Для практической реализации предложенной модели упрочнения разработаны новые конструкции вакуумных установок и электрофизических устройств, защищенные патентами на изобретение. Разработаны технологические рекомендации и режимы комплексной вакуумной ионно-плазменной обработки, сочетающей в едином технологическом цикле ионную очистку (травление), нагрев, ионную модификацию поверхности (имплантацию азота) и нанесение многослойного покрытия с заданной архитектурой.

Высокая практическая значимость результатов работы подтверждается внедрением разработанных технологий упрочнения и методик оценки прочности покрытий в процесс серийной обработки лопаток газовых и паровых турбин «ОДК-УМПО», «ОДК-Климов», «Газпром», «Силовые машины», а также полученными патентами на изобретение РФ.

По работе имеются следующие замечания и вопросы.

1. Несмотря на ссылки на зарубежные компании (Sandvik, Oerlikon и др.), сравнительный анализ с мировыми исследованиями износостойких покрытий выглядит несколько поверхностным. Не хватает сопоставления с известными покрытиями на основе CrN/AlTiN или с многослойными на основе MAX-фазы.
2. Методика инструментального индентирования алмазными наконечниками, приведенная в главе 4 (стр. 66), требует дополнительного обоснования ее применимости в условиях заводского контроля качества лопаток с покрытием.
3. В главе 5 подробно рассмотрены результаты исследований механических и трибологических свойств исследуемых многослойных покрытий, однако недостаточно уделено внимание их термической стабильности. Для лопаток ГТД критически важна устойчивость к окислению и к диффузионным процессам на

границах слоев при рабочих температурах компрессора от 200 до 600 °С. В работе не приведены данные о возможном изменении свойств покрытия после длительного отжига, не обсуждается возможная взаимная диффузия элементов между слоями и с подложкой, которая со временем может привести к разупрочнению или потере адгезии.

4. В главе 5 (п. 5.4, стр. 212) автором установлена закономерность снижения предела выносливости образцов и лопаток из сплава ВТ6 при нанесении «толстых» ионно-плазменных покрытий (толщиной более 30 мкм) из-за возникновения в материале подложки растягивающих напряжений. Были ли исследованы механические свойства основного материала после комплексной обработки (ионная имплантация, нанесение покрытия и т.д.), например, предел прочности, ударная вязкость?
5. При проведении расчетного прогнозирования эксплуатационной долговечности лопаток с покрытиями (гл. 7, стр. 307-317) достоверность полученных значений подтверждается экспериментальными данными, актами о внедрении и не вызывает сомнений. Вместе с этим методология проверки адекватности моделей требует комплексного подхода, включающего статистический анализ, валидацию на независимых выборках и учет влияния эксплуатационных и других случайных факторов.

Сделанные замечания носят дискуссионный характер и не снижают научную и практическую ценность полученных результатов.

Заключение о соответствии диссертации требованиям, установленным в Положении о присуждении ученых степеней ВАК Минобрнауки РФ. Представленная диссертация является законченной научно-квалификационной работой, выполненной на высоком научно-техническом уровне, в которой изложены новые научно обоснованные технические и технологические решения, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие энергетического машиностроения страны.

Все полученные автором научные, теоретические и практические результаты являются значимыми и направлены на решение научной проблема повышения долговечности деталей энергетического оборудования, имеющей важное хозяйственное значение для экономики России.

Аннотация диссертации Селиванова К.С. соответствует основному тексту диссертации, имеет логичное построение, отражает ее содержание, последовательность и обоснованность изложенных результатов.

По теме диссертационной работы опубликовано 45 научных работ, в т.ч. 19 статей в ведущих научных журналах, рекомендованных ВАК, и рецензируемых журналах, включенных в базы данных Scopus и Web of Science, получено 20 патентов РФ на изобретения.

На основании изложенного считаю, что диссертационная работа Селиванова К.С. «Многослойные ионно-плазменные покрытия для повышения

износостойкости и долговечности лопаток турбомашин из титановых сплавов» соответствует 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 степени доктора технических наук по специальности 2.6.17 «Материаловедение» (технические науки).

Официальный оппонент, главный научный
сотрудник лаборатории физики
наноструктурных биокompозитов ИФПМ СО
РАН, доктор физико-математических наук по
специальности 01.04.07 – Физика
конденсированного состояния, профессор

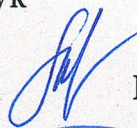


Шаркеев Юрий Петрович

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт физики прочности и материаловедения им. В.Е. Панина
Сибирского отделения Российской академии наук (ИФПМ СО РАН)
634055 Россия, г. Томск, пр. Академический, 2/4,
телефон: +7 (3822) 286-941, e-mail: root@ispms.tomsk.ru
Шаркеев Ю.П.: телефон: +7 3822 492850 / +7 9138062814,
e-mail: sharkeev@ispms.ru

Я, Шаркеев Юрий Петрович, даю согласие на обработку моих персональных данных
и на включение их в документы, связанные с работой диссертационного совета при
ФГБОУ ВО «УГНТУ»

Собственноручную подпись Шаркеева Ю.П. удостоверяю:
Ученый секретарь ИФПМ СО РАН,
кандидат физико-математических наук



Матолыгина Наталья Юрьевна

Дата: 22 января 2026 г.

