

ОТЗЫВ

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

1. Актуальность темы. Диссертация посвящена разработке многослойных ионно-плазменных покрытий, применяемых для повышения ресурса лопаток турбомашин из титановых сплавов. Актуальность работы обусловлена постоянно растущими требованиями к увеличению надежности и долговечности оборудования энергетического и авиационного машиностроения, что прямо отражено в программных документах развития топливно-энергетического комплекса РФ. Традиционные методы упрочнения, применяемые для упрочнения титановых сплавов (термическая, химико-термическая обработка, поверхностное пластическое деформирование и др.) зачастую приводят к снижению усталостной прочности, что делает их малопригодными для деталей, работающих в условиях циклических нагрузок, таких как рабочие лопатки компрессоров и паровых турбин. Разработка новых технологий упрочнения, способных одновременно обеспечить высокую износостойкость, сохранить (или даже повысить) сопротивление усталостному разрушению, является одной из наиболее актуальных проблем прикладного материаловедения в области турбиностроения.

Представленная работа предлагает решение этой проблемы путем разработки и нанесения многослойных ионно-плазменных покрытий с заданной конструкцией. На основе проведенных теоретических и экспериментальных исследований автором убедительно показано, что, целенаправленно изменяя материал, толщину и количество слоев покрытия, можно управлять механизмом и кинетикой процессов изнашивания лопаток турбомашин в условиях газоабразивной, каплеударной эрозии, фреттинга и фреттинг-коррозии.

2. Научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы не вызывают сомнения и заключаются в следующем:

Впервые научно обосновано и экспериментально подтверждено, что износостойкость титановых сплавов может быть повышена за счет целенаправленного нанесения многослойных ионно-плазменных покрытий с заданной структурой на основе тугоплавких металлов IV–V групп периодической системы и их нитридов. Автор показал, что управление механизмом и кинетикой изнашивания лопаток турбомашин в условиях газоабразивного и каплеударного воздействия, а также фреттинга и фреттинг-коррозии, достигается за счет целенаправленного выбора материала, толщины и количества слоев покрытия. При этом экспериментально доказано существенное увеличение износостойкости при газоабразивном изнашивании – до 12,3 раза; при каплеударной эрозии – до 2,8 раза; в условиях фреттинг-коррозии – до 8,1 раза.

В рамках фундаментального исследования физико-химических процессов автор установил, что при ионно-плазменном нанесении нитридных слоев системы (V, Ti)N формируются твердые растворы внедрения азота в кристаллические решетки Ti и V. Это приводит к образованию некогерентных межфазных границ и доминированию нитридных фаз: δ -TiN (55,4 об. %) и VN (20,2 об. %), которые эффективно блокируют развитие пластической деформации на микроуровне, что было подтверждено экспериментально.

Определенную научную ценность представляет выявление механизма сопротивления изнашиванию. Повышение износостойкости обусловлено сопротивлением зарождению первичных (зародышевых) трещин и торможением их роста на границах нитридных и металлических слоев. На этой основе сформулированы количественные критерии проектирования износостойких покрытий, работающих в условиях абразивной и каплеударной эрозии:

- оптимальным соотношением толщин нитридных и металлических слоев является 4:1, что обеспечивает (при прочих равных условиях) минимальную величину растягивающих напряжений, возникающих при ударе абразивными частицами;

- толщина нитридного слоя должна превышать глубину действия максимальных контактных (ударных) напряжений не менее чем в 2 раза;

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

В целом, можно утверждать, что автором сформулирована научно обоснованная теория устойчивости слоистых композиционных покрытий к комплексным видам изнашивания, что имеет фундаментальное значение для прикладного материаловедения и технологии функциональных покрытий.

Практическая значимость полученных результатов подтверждена внедрением разработанных технологических процессов, технических инструкций и методик контроля лопаток с покрытиями в промышленное производство, что подтверждается актами внедрения, а также двадцатью патентами РФ на изобретения.

3. Обоснованность и достоверность результатов и выводов. Достоверность и обоснованность научных положений, выводов и технологических рекомендаций, сформулированных в диссертационной работе, обеспечивается использованием общепризнанных теоретических и экспериментальных методов исследования, реализованных на аттестованном лабораторном и исследовательском оборудовании.

Теоретические исследования выполнены на основе фундаментальных положений физики твердого тела, механики разрушения, физики поверхностных явлений и теории плазменных процессов. Математическое моделирование проведено с использованием широко известного метода конечных элементов и сопровождалось верификацией на реальных объектах (образцах и деталях), что подтверждает достоверность полученных результатов.

Экспериментальная часть работы выполнена с использованием стандартизованных и общепризнанных методик оценки износостойкости, включая испытания на газоабразивное изнашивание, каплеударную эрозию и фреттинг-коррозию. Испытания проводились на необходимом количестве образцов с использованием статистических методов обработки данных, подтверждающих их достоверность.

Полученные автором результаты, например установленные механизмы сопротивления изнашиванию путем подавления трещин на межслойных границах, имеют подтверждение в научной литературе и не противоречат известным теориям. Кроме того, достоверность практических результатов и технологических рекомендаций подтверждена их успешным промышленным внедрением.

Основные результаты работы изложены в 45 научных публикациях (11 статей в научных журналах, рекомендованных ВАК, 8 статей – в журналах, включенных в базы Scopus и Web of Science).

4. Замечания

1. В работе подробно рассмотрены вопросы, связанные с оценкой механических свойств многослойных покрытий и испытанием на износостойкость, вместе с этим в автореферате не упоминается адгезионная прочность сцепления покрытия с подложкой. Проводились ли эти исследования?

2. Во второй главе автором утверждается, что «при приближении трещины к границе с нижележащим титановым слоем у ее вершины наблюдается увеличение напряжений до аномально высоких значений». Чем объясняется это увеличение напряжений и каков порядок этих «аномально высоких значений»?

3. Там же в качестве критерия износостойкости многослойных покрытий к каплеударной эрозии предложен коэффициент изоляции $D = 20 \lg(\prod_{i=1,n} \beta_i)^{-1}$ [дБ]. Чем обоснована эта формула?

4. В пятой главе утверждается, что образование твердого раствора внедрения V в α -Ti и стабилизация его в β -области дополнительно увеличивает прочность покрытия. На чем основано это утверждение и подтверждается ли экспериментально?

Сделанные замечания носят уточняющий характер и не ставят под сомнение научную новизну, теоретическую, практическую значимость работы и достоверность полученных результатов.

5. Заключение

В заключении можно отметить, что выполненное исследование носит междисциплинарный характер, объединяя физику твердого тела, механику разрушения, теорию плазменных процессов и инженерии поверхности. По глубине, новизне и практической значимости полученных результатов работа в полной мере соответствует уровню докторской диссертации в области материаловедения.

Автореферат оформлен согласно действующим требованиям и достаточно полно отражает содержание диссертационной работы, которую можно квали-

фицировать как завершенную научно-квалификационную работу, в которой на основании выполненных исследований изложены новые научно обоснованные технические и технологические решения, внедрение которых вносит значительный вклад в обеспечение технологического суверенитета страны.

На основании вышеизложенного считаю, что представленная диссертационная работа соответствует требованиям «Положения о присуждении ученых степеней» (Постановление Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842 «О порядке присуждения ученых степеней» с изменениями постановления Правительства Российской Федерации от 21 апреля 2016 г. №335 «О внесении изменений в Положение о присуждении ученых степеней»), предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук, а ее автор, Селиванов Константин Сергеевич, заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 2.6.17. Материаловедение (технические науки).

Заведующий кафедрой
Материаловедения, литья и сварки,
профессор, докт. техн. наук
по специальности 05.16.04.
«Литейное производство», профессор

 Шатульский
Александр
Анатольевич

«12» января 2026 г.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева».

152934, РФ, Ярославская область, г. Рыбинск,
ул. Пушкина, д. 53.
тел. 8(4855) 280470 , факс. 8(4855) 213964 E-mail:
shatulsky@rsatu.ru

Подпись подтверждаю: ВРИО ученого секретаря
Ученого Совета РГАТУ имени П.А. Соловьева



 Малышева И.С.