

Отзыв

на автореферат диссертации Селиванова Константина Сергеевича

**«Многослойные ионно-плазменные покрытия
для повышения износостойкости и долговечности
лопаток турбомашин из титановых сплавов»,**

представленной на соискание ученой степени доктора технических наук
по специальности 2.6.17. Материаловедение

Проблема упрочнения лопаток турбомашин из титановых сплавов до настоящего времени является актуальной, требующей систематических исследований взаимосвязей состава и структуры защитных покрытий с их физико-механическими и эксплуатационными свойствами применительно к конкретным условиям работы деталей машин. Актуальность диссертационной работы подтверждается поддержкой в рамках выполнения федеральных целевых программ, проектов РНФ и РФФИ.

Диссертационная работа Селиванова К.С. посвящена научному обоснованию и разработке износостойких ионно-плазменных покрытий на основе тугоплавких металлов IV-V групп и их нитридов для повышения долговечности лопаток газовых и паровых турбин из титановых сплавов, эксплуатируемых в условиях газоабразивного износа, каплеударной эрозии и фреттинга. Проведен анализ причин преждевременного разрушения рабочих и направляющих лопаток турбомашин. Обобщен мировой опыт в области исследований влияния материала, структуры и состава износостойких покрытий, а также способов их нанесения на эксплуатационные свойства лопаток газовых и паровых турбин из титановых сплавов.

Разработаны математические модели многослойных покрытий, проведены теоретические исследования процессов их разрушения при газоабразивном изнашивании и каплеударной эрозии. Разработаны требования к материалу, толщине и количеству слоев покрытий, наносимых на лопатки паровых и газовых турбин с целью их защиты от внешнего эксплуатационного воздействия. Обоснован выбор известных экспериментальных и расчетных методов исследований. Разработка методики определения механических свойств многослойных ионно-плазменных покрытий инструментальным индентированием.

Разработаны износостойкие композиции ионно-плазменных покрытий на основе тугоплавких металлов IV-V групп и их нитридов с различным количеством и составом слоев. Проведен анализ результатов экспериментальных исследований влияния материала, количества и толщины слоев покрытий на износостойкость при газоабразивном изнашивании, каплеударной эрозии, фреттинге. Определено влияние исследуемых покрытий на сопротивление усталости лопаток из титановых сплавов и дано прогнозирование долговечности лопаток газовых и паровых турбин с износостойкими покрытиями по результатам ускоренных испытаний материала поверхности на газоабразивный износ и каплеударную эрозию. Разработаны научно обоснованные рекомендации новых способов нанесения многослойных ионно-плазменных покрытий на лопатки паровых и газовых турбин из титановых сплавов.

Научная новизна диссертации заключается, прежде всего, в разработке научного подхода в области системного анализа закономерностей, позволяющего целенаправленно изменяя материал, толщину и количество слоев покрытия, управлять механизмом и кинетикой процессов изнашивания лопаток турбомашин при газоабразивном, каплеударном воздействии, фреттинге и фреттингкоррозии. Это позволило повысить износостойкость титановых сплавов с нанесенными покрытиями при газоабразивном изнашивании до 12,3 раза; при каплеударной эрозии до 2,8 раза; при фреттинг-коррозии до 8,1 раза. Установлено, что при нанесении в среде реакционного газа (азота) нитридных слоев титанванадиевого покрытия (V, Ti) N в результате протекания плазмохимических реакций образуются твердые растворы внедрения азота в кристаллическую решетку титана и ванадия. Это обуславливает формирование кристаллических структур с некогерентными межфазными границами, преимущественно соответствующими нитридным фазам: δ -TiN (55,4 отн. %) и VN (20,2 отн. %), являющихся эффективными барьерами для протекания пластической деформации. Показано, что покрытие должно состоять из чередующихся нитридных и металлических слоев при соотношении их толщин 4:1. Это значительно (до 50 %) уменьшает размер зоны пластической деформации, возникающей в металлических слоях перед трещиной, и обуславливает ее развитие вдоль границ слоев без перехода в материал подложки. Твердость нитридных слоев должна превышать твердость абразивных частиц более чем в 1,5 раза.

Практическая значимость работы заключается в разработке способов нанесения многослойных ионно-плазменных покрытий на лопатки турбомашин из титановых сплавов (патенты РФ №2768945, №2478140, №2388685, №2373302, №2375493, №2403316, №2390578, №2677041, №2655563, №2479667), позволяющие формировать на упрочняемых деталях слоистые композиции с заданным количеством, толщиной и материалом слоев. Разработанные способы использованы в энергетическом турбостроении для повышения износостойкости и циклической долговечности лопаток газовых и паровых турбин; в разработке конструкции вакуумных установок (патенты РФ №2425173, №2710809, №2380456) и электродуговых испарителей (патенты РФ №2399692, №2376398, №2380457, №2404284, №2420608), позволяющие путем совмещения в одном вакуумном объеме нескольких ионных источников реализовать различные способы нанесения ионно-плазменных покрытий на лопатки турбомашин.

Разработанные ТУ с 2015 года по настоящее время используются в серийном производстве при нанесении защитных покрытий на рабочие лопатки и направляющие аппараты компрессора изделий РД-33МК и РД-93МА. Предложенные способы формирования многослойных ионно-плазменных покрытий внедрены в серийное производство ООО «Научно-производственное предприятие «Уралавиаспецтехнология» (г. Уфа) в виде технологических процессов упрочнения лопаток газовых и паровых турбин, в АО «Силовые машины» (г. Санкт-Петербург).

Обоснованность и достоверность полученных в диссертационной работе результатов обеспечивается глубокой теоретической проработкой поставленных в работе задач и использованием самых современных экспериментальных методов и оборудования исследования структуры и свойств металлических покрытий.

Результаты диссертационной работы широко опубликованы в печати. По теме диссертации опубликовано 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.

По тексту автореферата имеется следующее **замечание**. В автореферате не обсужден вопрос о том, насколько применение нейронных сетей реально повысило точность/достоверность прогнозирования эксплуатационной долговечности покрытий.

Указанное замечание носит частный характер, не меняет общего впечатления от грамотно выполненного исследования.

Диссертационная работа К.С. Селиванова выполнена на высоком уровне, проведенные исследования актуальны с теоретической и практической точек зрения. По актуальности, новизне, уровню выполнения, объему, научной и практической ценности полученных результатов диссертационная работа полностью соответствует требованиям п.п. 9-14 Постановления Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842 «О порядке присуждения ученых степеней» (в актуальной редакции), предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук, а ее автор, Селиванов Константин Сергеевич, заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по научной специальности 2.6.17. Материаловедение.

Я, Панин Сергей Викторович, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

Член-корр. РАН, доктор технических наук (специальность 01.02.04 – механика деформируемого твёрдого тела), заведующий лабораторией механики полимерных композиционных материалов Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт физики прочности и материаловедения им. В.Е. Панина Сибирского отделения Российской академии наук, 634055, г. Томск, просп. Академический, 2/4

Панин Сергей Викторович

06 февраля 2026 г.



Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики прочности и материаловедения им. В.Е. Панина Сибирского отделения Российской академии наук
г. Томск, проспект Академический, д. 2/4, 634055

Тел. +7 (3822) 286-904, E-mail: ipm@panin.sbras.ru

Подпись С.В. Панина заверяю
Ученый секретарь ИФПМ СО РАН
кандидат физико-математических наук



Н.Ю. Матолыгина