

Отзыв на автореферат диссертации

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

Селивановым Константином Сергеевичем

на соискание ученой степени доктора технических наук

по специальности 2.6.17. Материаловедение (технические науки)

1 Актуальность темы

Благодаря высоким удельным и абсолютным значениям прочностных характеристик, титановые сплавы являются основными материалами, применяемыми для изготовления лопаток компрессоров газотурбинных двигателей, а также лопаток газотурбинных установок. Вместе с тем находящиеся в газовоздушном тракте лопатки работают в условиях интенсивных повреждающих воздействий внешней среды и контактирующих с ними соседних деталей. При этом титановые сплавы отличаются высокой чувствительностью к поверхностным повреждениям. Дефекты титановых лопаток являются одними из наиболее часто встречающихся дефектов авиационных двигателей. Поэтому повышение надежности лопаток является актуальной для обеспечения безопасной и эффективной эксплуатации турбомашин задачей. Это определяет безусловную актуальность и практическую ценность рецензируемой диссертации, направленной на повышение износостойкости и долговечности титановых лопаток турбомашин за счет разработки и внедрения многослойных ионно-плазменных покрытий.

2 Научная значимость и новизна полученных результатов

Научная значимость полученных результатов заключается в расширении фундаментальных знаний в области прикладного материаловедения, в частности, в понимании механизмов разрушения и повышения износостойкости многослойных ионно-плазменных покрытий на основе титана, ванадия и их нитридов, что способствует развитию методов упрочнения ответственных деталей газо- и паротурбинных установок – рабочих лопаток из титановых сплавов.

В частности, в рецензируемой диссертации показано, что при использовании многослойных (металл-нитрид) покрытий повышение износостойкости при газоабразивном изнашивании и каплеударной эрозии обеспечивается за счет сопротивления возникновению первичных (зародышевых) трещин и сдерживания их развития на границах металлических и нитридных слоев покрытия.

Для оценки стойкости многослойных покрытий к каплеударной эрозии теоретически обосновано применение критерия максимального рассеяния энергии упругой волны, учитывающего параметры конструкции покрытия (материал, толщина, количество слоев), физико-механические свойства материала покрытия (плотность, модуль упругости, скорость звука), а также конкретные условия эксплуатации рабочих лопаток паровых турбин (размер капель, угол падения, скорость удара, температура рабочей среды).

Экспериментально установлено и теоретически обосновано, что повышение стойкости к фреттингу и фреттинг-коррозии титановых сплавов обеспечивается за счет включения в состав многослойных нитридных покрытий слоев титана толщиной не менее 0,5 мкм. При изнашивании нитридных слоев титан попадает в зону трения, окисляется и выступает в качестве твердой смазки, обеспечивая повышение износостойкости материала в зоне трения.

Новизна предложенных диссертантом решений подтверждается многочисленными патентами на изобретения.

3. Практическая значимость работы

Практическая значимость работы заключается в следующем:

Разработаны защищенные патентами новые способы и устройства для нанесения многослойных ионно-плазменных покрытий на лопатки турбомашин из титановых сплавов, 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.

Предложенные в работы конструкции вакуумных установок и электродуговых испарителей позволяют путем совмещения в одном вакуумном объеме нескольких

ионных источников реализовать различные способы нанесения ионно-плазменных покрытий на лопатки турбомашин.

Полученные в рецензируемой диссертации результаты, судя по автореферату, широко внедрены на большом количестве предприятий (АО «ОДК-Климов», ООО «НПО «Уралавиаспецтехнологий», АО «Соловые машины»).

Проведенное с участием диссертанта внедрение технологических процессов на отечественных предприятиях ПАО «Газпром» позволило изготовить и отремонтировать импортные комплектующие для ГТУ SGT-600 (всего более 250 наименований). Упрочненные запасные части работают в составе агрегатов, эксплуатируемых в ПАО «Газпром» с 2018 года.

Работа Селиванова К.С. способствует созданию конкурентоспособных материалов и технологий и расширяет научные знания в области материаловедения функциональных покрытий. Результаты позволяют повысить надежность и безопасность эксплуатации лопаточных турбомашин и уменьшить экономические потери за счет увеличения срока службы лопаточного аппарата.

Результаты диссертационного исследования имеют высокий потенциал для практического применения и могут быть рекомендованы к широкому внедрению в серийное производство и эксплуатацию деталей турбомашин энергетического, нефтегазового и авиационного машиностроения.

4. Достоверность и апробация результатов исследований.

Сделанные выводы работы последовательны, внутренне непротиворечивы и подкреплены не только лабораторными данными, но и результатами промышленного внедрения – более тысячи упрочненных лопаток в настоящее время эксплуатируются на объектах энергетики и нефтегазового машиностроения в составе турбин электрических станций и газоперекачивающих агрегатов.

Основные положения рецензируемой диссертационной работы докладывались на значительном количестве международных научно-технических конференций, опубликовано около 50 публикаций, включая статьи в журналах, рекомендованных ВАК, в индексируемых Scopus изданиях, 2 монографии, 1 учебное пособие и 20 патентов РФ.

5. Замечания и рекомендации.

По автореферату диссертационной работы Селиванова К.С. можно сделать ряд замечаний и пожеланий.

1. Как видно из автореферата, обзорная часть работы ограничена в основном работами, направленными на упрочнение лопаток.

При этом не упомянуты (по крайней мере в автореферате) многие основополагающие и современные работы по фреттингу и работы по предотвращению фреттинга в элементах лопаток турбомашин, известные отечественные и зарубежные работы по изнашиванию и разрушению лопаток в газоабразивном потоке и при каплеударном воздействии.

Жаль, что диссертант, по-видимому, не имел возможности ознакомиться с работами по газоабразивному изнашиванию материалов и лопаток компрессоров газотурбинных двигателей, выполненными в ЦИАМ в 1975-1995 гг. Это объяснимо, т.к. абсолютное большинство публикаций имело пометку «Для служебного пользования», которая была снята только в этом году.

Тем не менее, хочу отметить, что в ЦИАМ была разработана методика испытаний на изнашивание в газообразивной среде расположенных в ядре установившегося двухфазного потока образцов, позволяющая исследовать влияние на интенсивность изнашивания угла атаки при ударном воздействии абразивных частиц. Были проведены исследования изнашивания и механизмов разрушения при взаимодействии потока абразивных частиц различных металлических сплавов, композиционных материалов, широкой номенклатуры защитных покрытий.

В частности, применительно к вакуумным ионно-плазменным покрытиям исследовалось влияние на износостойкость покрытий условий ударного взаимодействия с потоком абразивных частиц, влияние состава, структуры и толщины покрытия, технологических параметров нанесения покрытия. Так, применительно к составляющим основной предмет исследования Селиванова К.С. покрытиям TiN было показано, что на износостойкость покрытия определяющее влияние оказывают такие технологические параметры, как ток дуги, потенциал на подложке и давление реактивного газа.

В рецензируемой диссертации влияние технологических параметров на износ и разрушение покрытий не обсуждается.

Не упомянуты (по крайней мере в автореферате) и многие работы по составляющим основной предмет исследования многослойным ионно-плазменным покрытиям из слоев титана и нитрида титана. В частности, выполненные в конце 90-ых начале 2000-ых годов работы P.Y. Yashar, Zhao Linpuo, V.P. Swamina-ther, V. Gorokhovsky (см., например, ASME GT 2009 – 59391, ASME GT 2008 – 50713); работы, выполненные в АРЗ №404 (в настоящее время АО «УЗГА», Екатеринбург) и другие.

2. Предложенные диссертантом рекомендации не сравниваются с другими применяемыми для тех же целей (конкурирующими) технологическими решениями, в частности, с поверхностным упрочнением (лазерным ударным, малопластическим выглаживанием, кавитационным), с широко применяемыми для защиты контактных поверхностей бандажных полок лопаток полученными наплавкой или детонационным напылением покрытиями из твердых сплавов.

Следует учитывать, что изготовление лопаток турбокомпрессоров относится к серийному производству, что также накладывает ограничения на выбор решения.

3. Не рассмотрено возможное влияние на работоспособность лопаток с покрытиями длительной эксплуатации, которая может влиять на диффузионные процессы, релаксацию остаточных напряжений и стабильность свойств материала.

6. Общая оценка диссертации и заключение.

Указанные выше замечания в значительной степени являются предложениями, которые следует учитывать при продолжении работы, и не могут препятствовать положительной оценке диссертации Селиванова К.С.

Рецензируемая диссертация Селиванова К.С. является законченной научно-квалификационной работой, в которой изложены обоснованные новые технические решения, внедрение которых позволит решить важную задачу повышения надежности титановых лопаток турбомашин различного назначения.

Диссертационная работа Селиванова Константина Сергеевича 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 отвечает требованиям утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842 «Положения о присуждении ученых степеней», предъявляемым ВАК РФ к диссертациям на соискание ученой степени доктора технических наук.

Считаю, что автор диссертационной работы Селиванов Константин Сергеевич заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 2.6.17. Материаловедение (технические науки).

Против использования моих персональных данных не возражаю.

Заместитель генерального директора-директор исследовательского центра

«Динамика, прочность, надежность»,

д.т.н. (специальность: 05.07.05 – «Тепловые двигатели летательных аппаратов»),

с.н.с.



Ножницкий Юрий Александрович

«12» декабря 2026 г.

Федеральное автономное учреждение «Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова» (ФАОУ «ЦИАМ им. П.И. Баранова»).

Авиамоторная ул., д.2, Москва, 111116

Телефон: +7-495-362-49-75

e-mail: nozhnitsky@ciam.ru