

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.2.428.05,
СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
БЮДЖЕТНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО
ОБРАЗОВАНИЯ «УФИМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НЕФТЯНОЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ» МИНИСТЕРСТВА НАУКИ И ВЫСШЕГО
ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ ПО ДИССЕРТАЦИИ
НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ ДОКТОРА НАУК

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от **20 февраля 2026 года №2**

О присуждении **Селиванову Константину Сергеевичу**, гражданину Российской Федерации, ученой степени доктора технических наук.

Диссертация «Многослойные ионно-плазменные покрытия для повышения износостойкости и долговечности лопаток турбомашин из титановых сплавов» по специальности 2.6.17. Материаловедение (технические науки) принята к защите 17 ноября 2025 г. протокол № 8 диссертационным советом 24.2.428.05, созданным на базе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет» Минобрнауки РФ (450064, Россия, республика Башкортостан, г. Уфа, ул. Космонавтов, д. 1, действует в соответствии с приказом Минобрнауки РФ от 26 января 2023 г., № 65/нк).

Соискатель, Селиванов Константин Сергеевич, 1975 года рождения.

В 2000 году защитил кандидатскую диссертацию на тему «Технологические методы диффузионного упрочнения, повышающие фреттинг-стойкость деталей машин» по специальности 05.02.08 «Технология машиностроения» в диссертационном Совете Д-063.17.01 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Уфимский государственный авиационный технический университет». Присвоена степень кандидата технических наук (диплом КТ №043637 от 13.04.2001 г.).

В период подготовки докторской диссертации Селиванов Константин Сергеевич обучался в докторантуре Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет» по специальности 2.6.17. Материаловедение (технические науки).

В настоящее время Селиванов Константин Сергеевич работает в должности технического директора общества с ограниченной ответственностью «Научно-производственное предприятие «Уралавиаспецтехнология» и в должности доцента на кафедре «Технология машиностроения» Федерального государственного бюджетного

образовательного учреждения высшего образования «Уфимский университет науки и технологий» по совместительству.

Диссертация выполнена на кафедре «Технологические машины и оборудование» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет».

Научный консультант – доктор технических наук, профессор Кузеев Искандер Рустемович, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», кафедра «Технологические машины и оборудование», профессор.

Официальные оппоненты:

1 Абраимов Николай Васильевич – доктор технических наук (20.02.17, 05.02.01), профессор, филиал Акционерного общества «Объединенная двигателестроительная корпорация» «Научно-исследовательский институт технологии и организации производства двигателей», отдел конструкционных материалов и функциональных покрытий, начальник;

2 Шаркеев Юрий Петрович – доктор физико-математических наук (01.04.07), профессор, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт физики прочности и материаловедения» Сибирского отделения Российской академии наук, лаборатория физики наноструктурных биоккомпозитов, главный научный сотрудник;

3 Шехтман Семён Романович – доктор технических наук (05.16.06), доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН», кафедра высокоэффективных технологий обработки, профессор

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» (г. Москва), в своем положительном отзыве, утвержденном доктором технических наук, доцентом, проректором по научной работе Ивановым Андреем Владимировичем и подписанном доктором технических наук (2.6.1.), профессором, профессором образовательного центра Институт №11 «Новые материалы и производственные технологии» Бецофеным Сергеем Яковлевичем и кандидатом технических наук (05.09.03), доцентом, директором дирекции Института №11 «Новые материалы и производственные технологии», Беспаловым Александром Владимировичем, указала, что диссертационная работа Селиванова Константина Сергеевича выполнена на высоком научно-техническом уровне. Она является самостоятельной квалификационной работой, в которой изложены новые научно обоснованные технические и технологические решения научной проблемы увеличения долговечности лопаток и, как следствие, надежности эксплуатации газовых и паровых турбин, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие энергетического

машиностроения страны. Диссертация соответствует критериям, установленным в пунктах 9, 10, 11, 13, 14 Положения о присуждении ученых степеней (Постановление Правительства РФ №842 от 24.09.2013 г.), а ее автор заслуживает присуждения степени доктора технических наук по специальности 2.6.17. Материаловедение (технические науки).

Основные результаты опубликованы в 45 научных работах (общий объем 100,48 п.л., авторский вклад 52,04 п.л.), в том числе 11 статей (общий объем 7,5 п.л., авторский вклад 5,21 п.л.) в ведущих рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК, 8 статей (общий объем 6,93 п.л., авторский вклад 1,82 п.л.) – в рецензируемых журналах, включенных в базы данных Scopus и Web of Science, 3 статьи (общий объем 3,12 п.л., авторский вклад 2,41 п.л.) – в других изданиях; 2 монографии (общий объем 52,67 п.л., авторский вклад 37,5 п.л.); 1 учебное пособие (общий объем 30,26 п.л., авторский вклад 5,1 п.л.); получено 20 патентов РФ на изобретение.

Основные положения диссертационной работы изложены в публикациях:

– в изданиях, входящих в перечень рецензируемых научных изданий ВАК при Министерстве науки и высшего образования РФ:

1 Прогнозирование долговечности лопаток турбомашин с износостойкими ионно-плазменными покрытиями / К.С. Селиванов // Нефтегазовое дело. – 2025. – Т. 23, №2. – С. 140-149.

2 Влияние конструкционных параметров многослойных ионно-плазменных покрытий на их прочность и износостойкость / К.С. Селиванов // Materials. Technologies. Design. – 2025. – Т. 7, № 2(21). – С. 5–16.

3 Обеспечение сопротивления эрозии материалов лопаток компрессора газотурбинного двигателя и газоперекачивающего аппарата путем нанесения вакуумно-плазменных покрытий / Ю.М. Дыбленко, К.А. Прокопчук, К.С. Селиванов, А.М. Смыслов // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2023. – Т. 19, № 9 (225). – С. 410–415.

4 Оценка прочности материала поверхности при его испытании методом «Скретч-тест» / К.С. Селиванов // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. – 2015. – Т. 19, № 1 (67). – С. 100–106.

5 Новая вакуумная установка и технология комбинированной упрочняющей обработки, нанесения покрытий на детали ГТД и энергетических установок / А.М. Смыслов, Ю.М. Дыбленко, М.К. Смыслова, К.С. Селиванов, А.Д. Мингажев, А.А. Мингажева // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. – 2013. – Т. 17, № 1 (54). – С. 108–113.

6 Ионно-плазменная технология формирования покрытий на лопатках турбины ГТД / А.М. Смыслов, А.Д. Мингажев, К.С. Селиванов, М.К. Смыслова, А.А. Мингажева // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. – 2012. – Т. 16, № 1 (46). – С. 77–80.

7 Исследование газоабразивного износа образцов из титанового сплава BT-6 с наноструктурированными защитными покрытиями / Ю.М. Дыбленко,

К.С. Селиванов, Р.Р. Валиев [и др.] // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. – 2011. – Т. 15, № 1 (41). – С. 83–86.

– в изданиях, индексируемых в международных базах цитирования *Scopus* и *Web of Science*:

8 Microstructure and Properties of Protective Ion-Plasma Coating on UFG Ti Alloy / Ya.N. Savina, S.V. Ovchinnikov, R.R. Valiev, K.S. Selivanov // Journal of Surface Investigation: X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques. – 2024. – Vol. 18, No. S1. – P. S127-S135. – DOI: 10.1134/S1027451024701969.

9 Enhanced Erosion Resistance of an Ultrafine-Grained Ti Alloy with a PVD Coating. / Valiev R.R., Selivanov K.S., Smyslova M.K., Dyblenko Y.M., Savina Y.N., Valiev R.Z., Semenova I.P. Metals. – 2022. – Vol. 12, No. 5. – P.1-13.

10 Architecture and increased adhesive strength of vacuum-plasma coating on ultrafine-grained titanium alloy. / Valiev R.R., Selivanov K.S., Modina I.M., Dyblenko Y.M., Semenova I.P., Valiev R.Z. Advanced Engineering Materials. – 2020. – P. 2000121. – DOI: 10.1002/adem.202000121.

11 Erosive wear behavior of Ti/Ti(V,Zr)N multilayered PVD coatings for Ti-6AL-4V alloy. / Selivanov K.S., Smyslov A.M., Dyblenko Y.M., Semenova I.P. – Wear. – 2019. – Vol. 418-419. – P. 160-166. – DOI:10.1016/j.wear.2018.11.016.

– в монографиях и учебных пособиях:

12 Фреттинг и фреттинг-усталость высоконагруженных малоподвижных соединений газотурбинных установок / А.Н. Петухов, К.С. Селиванов, А.М. Смыслов. – Москва: Машиностроение, 2012. – 276 с.

13 Повышение долговечности деталей машин в условиях фреттинга / А.М. Смыслов, К.С. Селиванов. – Уфа: Гилем, 2005. – 126 с.

14 Технология защитно-упрочняющей обработки деталей ГТД: учебное пособие / А.М. Смыслов, М.К. Смыслова, А.Д. Мингажев, А.А. Быбин, К.С. Селиванов, В.Ю. Гордеев, Ю.М. Дыбленко. – Уфа, 2015. – 148 с.

Диссертационная работа Селиванова Константина Сергеевича:

– не содержит не достоверных сведений об опубликованных соискателем ученой степени работах, в которых изложены основные научные результаты диссертации;

– содержит ссылки на авторов и источники заимствования;

– оригинальный текст диссертационной работы составляет 81,33 %, самоцитирование – 10,28 %.

На диссертацию и автореферат поступило 13 положительных отзывов (все с замечаниями) из следующих организаций:

1 Отзыв из Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II» (г. Санкт-Петербург) подписан профессором кафедры «Транспорт и хранение нефти и газа», доктором технических наук (05.02.01), профессором Щипачёвым Андреем Михайловичем. Имеется 3 замечания:

1) Вопрос по термостабильности покрытий. Как ведут себя предлагаемые в работе многослойные покрытия при длительном воздействии повышенных

температур (до 600 °С), характерных для некоторых ступеней ГТД? Не происходит ли диффузионного разупрочнения на границах слоев?

2) Вопрос по адгезии. Каким образом обеспечивается и контролируется адгезионная прочность многослойных покрытий к подложке из титанового сплава, особенно при циклических термических и механических нагрузках? В патенте на изобретение №2728732 автором предлагается способ оценки прочности сцепления многослойного покрытия с подложкой, который следовало бы кратко описать в автореферате.

3) Вопрос по экономической эффективности. В автореферате автором приводятся значимые результаты по повышению долговечности лопаток газотурбинных установок и паровых турбин. Была ли проведена оценка себестоимости нанесения таких многослойных покрытий по сравнению с известными способами упрочнения, используемыми предприятиями?

2 Отзыв из Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет гражданской авиации» (г. Москва) пописан заведующим кафедрой «Авиатопливообеспечение и ремонт летательных аппаратов», доктором технических наук (20.02.17), профессором Самойленко Василием Михайловичем и доцентом кафедры «Авиатопливообеспечение и ремонт летательных аппаратов», кандидатом технических наук (05.02.13), доцентом Зубовым Олегом Евгеньевичем. Имеется 3 замечания:

1) В автореферате недостаточно подробно изложены возможные ограничения использования разработанных покрытий, например, в условиях высокотемпературного воздействия или химически агрессивной среды, что требует пояснения универсальности покрытий и рекомендаций по их применению.

2) Желательно более четкое описание перехода от лабораторных условий к промышленным масштабам нанесения покрытий на лопатки турбомашин, включая возможные особенности производственного контроля состава материала, толщины и количества слоев, обеспечивающих их износостойкость.

3) Следует уточнить степень влияния вакуумно-плазменных технологий, включающих ионную имплантацию и нагрев, на микроструктуру основного материала, особенно в зоне перехода к покрытию, что важно для обеспечения его адгезионной прочности.

3 Отзыв из Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук (г. Томск) подписан главным научным сотрудником лаборатории плазменной эмиссионной электроники, профессором по кафедре физики плазмы, доктором технических наук (05.27.02) Ковалем Николем Николаевичем. Имеется 4 замечания:

1) Из текста автореферата не ясно, проводились ли испытания покрытий на износостойкость при различных эксплуатационных условиях или они были ограничены только лабораторными испытаниями.

2) Необходимо разъяснить, насколько универсальны предлагаемые защитные покрытия для различных видов лопаток турбомашин (например, пригодны ли они одинаково эффективно для лопаток компрессора и паровых турбин). Или же покрытия разрабатывались индивидуально под конкретные условия эксплуатации каждого типа турбоагрегатов?

3) На стр. 39 автореферата сказано: «Установлено повышение стойкости многослойных ионно-плазменных покрытий на основе нитридов титана к фреттинг-коррозии до 8,1 раза за счет присутствия в них слоев α -Ti толщиной не менее 0,5 мм, который в процессе фреттинга попадает в зону трения, окисляется и выступает в качестве твердой смазки, уменьшая скорость фреттинг износа». Из рассуждений и приведенных в автореферате данных не понятно, почему окисленный титан, имеющий высокую твердость и хрупкость, выступает в качестве твердой смазки?

4) В автореферате (стр. 41) указано, что разработанные покрытия были реализованы на специальном технологическом оборудовании, объединяющем в одном вакуумном объеме несколько технологических процессов. Несмотря на очевидные преимущества данного подхода, возникает закономерный вопрос о рентабельности и доступности подобного сложного и, скорее всего, дорогостоящего оборудования. Какова потенциальная стоимость установки и ее обслуживания? Насколько легко масштабируется процесс упрочнения лопаток, могут ли разработанные автором технологии внедряться в серийное производство лопаток?

4 Отзыв из Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт физики твердого тела имени Ю.А. Осипяна Российской академии наук» (г. Черноголовка) подписан заведующим лабораторией поверхностей раздела в металлах, доктором физико-математических наук (01.04.07), старшим научным сотрудником Страумалом Борисом Борисовичем. Имеется 4 замечания:

1) Из текста автореферата не вполне ясно, был ли проведен сравнительный анализ с альтернативными материалами и покрытиями, применимыми для лопаток из титановых сплавов?

2) Насколько предложенная методика измерения прочности покрытий по критерию максимального контактного давления применима в промышленной практике? Есть ли ограничения по толщине и материалам покрытий? Проведены ли сравнительные испытания по аналогичным методикам испытания?

3) Теоретические положения подтверждаются большим числом экспериментов. Как была обеспечена статистическая надежность получаемых экспериментальных данных? Какие методы статистической обработки применялись?

4) Для нанесения разработанных износостойких покрытий предлагается использовать достаточно сложное и дорогостоящее вакуумное оборудование. Выполнялся ли анализ энергозатрат и себестоимости внедрения нового технологического процесса? С какими потенциальными технологическими

рисками может столкнуться предприятие при внедрении предлагаемых техпроцессов в производство?

5 Отзыв из Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» (г. Пермь) подписан деканом механико-технологического факультета, профессором кафедры «Инновационные технологии машиностроения», доктором технических наук (05.02.08), член-корреспондентом РАЕН Песиным Михаилом Владимировичем. Имеется 4 замечания:

1) В главе 1 желательно было бы более подробно провести сравнительный анализ отечественных и зарубежных технологий нанесения многослойных покрытий на лопатки.

2) В главе 2 проводится моделирование и детальный анализ процессов рассеяния упругих волн деформаций в многослойных покрытиях. По аналогии с известным в теории звуковых волн индексом звукоизоляции в работе для сравнительной оценки износостойкости покрытий предложен коэффициент D . Из текста автореферата не ясно, каковы область и условия применимости этого коэффициента к лопаткам с покрытиями.

3) В главе 3 соискателем представлена классификация процессов комплексной вакуумной плазменной обработки (КВИПО), которая могла бы быть дополнена другими известными методами нанесения покрытий в вакууме, такими как магнетронное распыление, парофазное осаждение и др.

4) В главе 6, посвященной разработке процессов осаждения разработанных покрытий, хотелось бы видеть оценку экономического эффекта от их внедрения, например, срок окупаемости или коэффициент рентабельности.

6 Отзыв из Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Самарский государственный технический университет» (г. Самара) подписан заведующим кафедрой «Металловедение, порошковая металлургия, наноматериалы», доктором физико-математических наук (1.3.17.), профессором Амосовым Александром Петровичем и доцентом кафедры «Металловедение, порошковая металлургия, наноматериалы», кандидатом технических наук (05.03.05), доцентом Хаминым Олегом Николаевичем. Имеется 3 замечания:

1) Нет разъяснений, почему испытания на газоабразивное изнашивание, эрозионную стойкость, многоцикловую усталость проведены для различных составов многослойных покрытий.

2) Нет расшифровки ряда величин на рис. 6, 7, зависимости для определения коэффициента изоляции, не понятен смысл рисунка 9а. На рис. 17 следует уточнить размерность плотности дислокаций.

3) Нет обоснования использования аппарата искусственных нейронных сетей для прогнозирования долговечности лопаток с покрытиями.

7 Отзыв из ФИЦ проблем химической физики и медицинской химии Российской академии наук (г. Черноголовка) подписан главным научным сотрудником, исполняющим обязанности заведующего лабораторией физико-

химической инженерии композиционных материалов, доктором физико-математических наук (01.04.07), профессором Колобовым Юрием Романовичем и старшим научным сотрудником лаборатории физико-химической инженерии композиционных материалов, кандидатом физико-математических наук (01.04.07.) Неласовым Иваном Викторовичем. Имеется 4 замечания:

1) При проведении моделирования термомеханического воздействия и напряженно-деформированного состояния системы «покрытие–подложка» учитывалось ли влияние реальных структурных дефектов покрытий (пористость, границы зерен, остаточные технологические напряжения)? Если да, то каким образом эти факторы были параметризованы и введены в модель?

2) В тексте автореферата утверждается, что наличие поверхностных слоев α -Ti способствует снижению фреттинг-износа за счет формирования слоя твердой смазки. Проводился ли фазовый и химический анализ продуктов износа известными аналитическими методами для непосредственного экспериментального подтверждения реализации данного механизма?

3) Наблюдаемое в работе увеличение предела усталости исследуемого материала после имплантации азота может быть обусловлено как дислокационным упрочнением, так и формированием дисперсных нитридных фаз в приповерхностном слое. Исследовалось ли изменение плотности дислокаций (например, методами просвечивающей электронной микроскопии) и наличие тонкодисперсных (наноразмерных) частиц нитридов в материале до и после обработки для оценки вклада каждого из указанных механизмов упрочнения?

4) Использование искусственных нейронных сетей для прогнозирования свойств исследуемых металлических материалов представляет значительный интерес. Было бы целесообразно уточнить объем и структуру обучающей выборки, а также описать процедуру валидации и тестирования построенных моделей для оценки их адекватности и точности.

8 Отзыв из Федерального автономного учреждения «Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова» (г. Москва) подписан заместителем генерального директора – директором исследовательского центра «Динамика, прочность, надежность», доктором технических наук (05.07.05), старшим научным сотрудником Ножницким Юрием Александровичем. Имеется 3 замечания:

1) Не упомянуты (по крайней мере в автореферате) многие работы по многослойным ионно-плазменным покрытиям из слоев титана и нитрида титана. В частности, выполненные в конце 1990-х – начале 2000-х годов работы R.U. Yashar, Zhao Linpuo, V.P. Swaminathan, V. Gorokhovskiy (например, ASME GT 2009 – 59391, ASME GT 2008 – 50713); работы, выполненные в АРЗ №404 (ныне АО «УЗГА», Екатеринбург) и другие

2) Предложенные диссертантом рекомендации не сравниваются с другими применяемыми для тех же целей технологическими решениями, в частности с поверхностным упрочнением (лазерным ударным, малопластическим выглаживанием, кавитационным), с широко применяемыми для защиты контактных поверхностей бандажных полок лопаток покрытий,

полученными наплавкой или детонационным напылением 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.

9 Отзыв из Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева» (г. Рыбинск) подписан заведующим кафедрой «Материаловедение, литье и сварка», доктором технических наук (05.16.04), профессором Шатульским Александром Анатольевичем. Имеется 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?

10 Отзыв из Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» (г. Самара) подписан профессором кафедры технологий производства двигателей, доктором технических наук (2.5.15), доцентом Болотовым Михаилом Александровичем. Имеется 3 замечания:

1) В первой главе было бы целесообразно расширить сравнительный анализ современных отечественных и зарубежных способов нанесения многослойных защитных покрытий на лопатки газотурбинных и паровых турбин, с акцентом на их эффективность и масштабы внедрения.

2) Была ли учтена взаимосвязь между параметрами ускоренных лабораторных испытаний (скорость, размер частиц, состав абразива,

температура и проч.) и реальными условиями эксплуатации лопаток в составе газотурбинных и паровых турбин?

3) Каким образом осуществлялась верификация разработанных нейросетевых моделей при прогнозировании износостойкости покрытий? Оценивалась ли обобщающая способность моделей, например, при экстраполяции за пределы обучающего набора данных?

11 Отзыв из Акционерного общества «ОДК-Климов» (г. Санкт-Петербург) подписан начальником испытательной лаборатории по исследованию деталей и узлов, кандидатом технических наук (05.16.09) Тихомировой Еленой Александровной. Имеется 4 замечания:

1) Из текста автореферата не вполне ясно, проводилась ли оценка долгосрочных эффектов эксплуатации лопаток с покрытиями, например, циклическое старение или влияние агрессивных сред, а также не вполне ясно, как разрешалась научная многолемма «угол атаки эрозионных частиц – монослойность / многослойность – толщина покрытий – поверхности / объемные остаточные напряжения – предел выносливости» с точки зрения выработки единых изначальных условий и подходов при проектировании ДСЕ с покрытиями, а также для оценки ремонтпригодности ДСЕ с покрытиями после эксплуатационной наработки.

2) В автореферате представлены интересные данные по результатам многоцикловых испытаний на рабочих лопатках 1 и 2 ступени компрессора низкого давления газотурбинного двигателя АЛ-31СТ из титанового сплава ВТ6 на усталость, однако не уточняется степень эрозионного воздействия на них в эксплуатации. Не ясно, насколько применимы полученные закономерности к лопаткам из других титановых сплавов для других типов двигателей и производителей?

3) В автореферате кратко упоминается о применении искусственных нейронных сетей для прогнозирования свойств разрабатываемых покрытий, и было бы крайне интересно увидеть более подробное описание архитектуры этих моделей, процедуры обучения и верификации.

4) Перспективным направлением дальнейших исследований можно рекомендовать изучение термической стабильности и термической усталости разработанных многослойных систем при длительном воздействии и длительном циклическом воздействии рабочих температур (более 500 °С), характерных для горячих секций паровых турбин, характеризующихся повышенным изнашиванием в условиях коррозионно-активной среды и кавитационного воздействия.

12 Отзыв из Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт физики прочности и материаловедения им. В. Е. Панина» Сибирского отделения Российской академии наук (г. Томск) подписан заведующим лабораторией механики полимерных композиционных материалов, доктором технических наук (01.02.04), профессором, член-корр. РАН Паниным Сергеем Викторовичем. Имеется 1 замечание:

1) В автореферате не обсужден вопрос о том, насколько применение нейронных сетей реально повысило точность/достоверность прогнозирования эксплуатационной долговечности покрытий.

13 Отзыв из Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Омский государственный технический университет» (г. Омск) подписан доктором технических наук (2.6.17.), профессором, заслуженным работником высшей школы РФ Ерёминым Евгением Николаевичем. Имеется 5 замечаний:

1) Из автореферата не понятны конкретные объекты исследований и используемые материалы;

2) Не обоснован выбор составов покрытий;

3) Не указаны режимы нанесения покрытий;

4) Не обосновано количество исследуемых наносных слоев. На рисунке 12, страница 26 автореферата указано 5 слоев; на рисунке 17, стр. 30 – 4 слоя; на рис. 19, стр. 31 – до 40 слоев, а на стр. 34 рекомендуется 10-и слойное покрытие;

5) Не обосновано количество вариантов покрытий, подвергаемых испытаниям на газоабразивное изнашивание (9) и на каплеударную эрозию (8).

Выбор официальных оппонентов обоснован их глубокими профессиональными знаниями по вопросам разработки и исследования новых материалов, в том числе функциональных ионно-плазменных покрытий, которым посвящена диссертация Селиванова К.С., что подтверждается имеющимися у них публикациями в этой области исследований.

Абраимов Николай Васильевич, доктор технических наук, профессор, является руководителем научной школы по высокотемпературным покрытиям для газотурбинных двигателей. Им разработаны теоретические основы и промышленные технологии ряда покрытий для защиты лопаток газотурбинных двигателей, а также низкотемпературное хромоалитирование внутренних полостей лопаток турбин, которые внедрены в серийное производство на двигателях АЛ-31Ф, изд. 117 и их семейств для самолета марки СУ и его модификаций. Под руководством Н.В. Абраимова в рамках правительственной программы модернизации авиадвигателей семейства АЛ-31Ф за 2001-2005 гг. разработан ряд новых сплавов для покрытий и технологий, на которые получены 10 патентов РФ. Автор более 200 научных работ, среди которых 9 монографий, более 150 научных статей, 45 патентов на изобретения и авторских свидетельств. Награжден орденом «За службу Родине в Вооруженных Силах СССР» третьей степени, 15 медалями и грамотами ГК ВВС.

Шаркеев Юрий Петрович, доктор физико-математических наук, профессор, специалист в области физики прочности и пластичности металлов, сплавов и сталей, а также физики взаимодействия потоков заряженных частиц и плазмы с металлами и сплавами. Занимается исследованием структуры и свойств композитов на основе ультрамелкозернистых и наноструктурированных сплавов титана, циркония, ниобия. Автор более 600 научных работ, среди которых 24 монографии, более 220 научных статей,

27 патентов на изобретения. Лауреат премии Томской области в сфере науки и образовании (2007, 2012), лауреат премии им. акад. РАН В.А. Коптюга (2002).

Шехтман Семён Романович, доктор технических наук, доцент, специалист в области физических методов нанесения нанопокровов на основе вакуумных ионно-плазменных методов обработки. Им разработаны и внедрены в производство предприятий ПАО «ОДК» новые технологии нанесения ионно-плазменных покровов системы Ti-C-Si для лопаток компрессора газотурбинных двигателей, работающих в диапазоне температур от 500 до 700 °C. Автор более 150 научных работ, среди которых 6 монографий, более 68 научных статей, 3 учебных пособия, 17 патентов на изобретения.

Выбор ведущей организации обоснован ее признанными достижениями в разработке научно-технических решений, направленных на повышение ресурса и надежности газотурбинных двигателей и силовых установок, включая фундаментальные и прикладные исследования по созданию новых сплавов, композиционных материалов и покровов, обеспечивающих работоспособность лопаток, дисков, камер сгорания и других ответственных деталей.

Основные направления научных исследований доктора технических наук, профессора Бецофена Сергея Яковлевича связаны с материаловедением, физикой металлов и разработкой авиационных сплавов. Сергей Яковлевич специализируется в области разработки рентгеновских методов анализа материалов (на основе титана, никеля и др.) для оценки прочности и долговечности деталей авиакосмической отрасли, является автором более 300 научных работ и лауреатом премии Российской академии наук за работу по металлургии, посвященную открытию принципиально нового метода измерения напряженности в композиционных материалах.

Доцент, кандидат технических наук Беспалов Александр Владимирович специализируется в области технологий обработки давлением титановых и биметаллических сплавов в условиях сверхпластичности применительно к производству заготовок лопаток газотурбинных двигателей. Важную часть его исследований составляют работы, посвященные разработке функциональных защитных покровов (на основе TiPb, Ta, Mo и др.), получаемых методом магнетронного напыления, а также анализу влияния технологических параметров на структуру, текстуру и уровень остаточных напряжений в покровов. Александр Владимирович является автором более 35 научных работ и патентов на изобретения РФ.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

– **разработаны теоретические положения** о целенаправленном формировании многослойных композиционных покровов на основе тугоплавких металлов IV-V групп периодической системы и их нитридов, повышающих износостойкость титановых сплавов. На этой основе **решена научная проблема** формирования износостойких покровов для лопаток газовых и паровых турбин из титановых сплавов с заданным составом материалов, их толщин и количеством слоев применительно к конкретным

условиям эксплуатации (динамическая нагрузка, газоабразивное изнашивание, каплеударная эрозия, фреттинг и фреттинг-коррозия);

– **предложены оригинальные суждения** о механизмах разрушения многослойных ионно-плазменных покрытий при газоабразивном изнашивании, каплеударной эрозии и фреттинге, позволившие сформулировать требования к толщине и физико-механическим свойствам материала слоев, необходимых для повышения износостойкости титановых сплавов;

– **доказана перспективность** использования многослойных ионно-плазменных покрытий для повышения износостойкости и долговечности лопаток турбомашин из титановых сплавов, выявлены новые закономерности увеличения их стойкости к износу от параметров конструкции покрытия (материал, толщина, количество слоев);

– **введен новый критерий стойкости** многослойных покрытий к каплеударной эрозии (коэффициент рассеяния упругой волны), величина которого характеризует способность многослойного покрытия рассеивать механическую энергию ударных волн, возникающих при ударе о поверхность эрозионных капель, подтвержденный экспериментально;

– **предложен новый критерий разрушения** исследуемых покрытий при их упругопластическом деформировании алмазными полусферическими наконечниками (максимальная величина контактного давления), расширяющий исследовательские возможности известного способа инструментального индентирования ASTM C1624-2022 «Standard Test Method for Adhesion Strength and Mechanical Failure Modes of Ceramic Coatings by Quantitative Single Point Scratch Testing», повышающий его универсальность и достоверность получаемых результатов;

– **разработаны научно обоснованные инструкции и технологические процессы** упрочнения рабочих и направляющих лопаток из титановых сплавов, применяемые в серийном производстве паровых и газовых турбин на отечественных машиностроительных предприятиях.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

– **доказаны положения** о принципах формирования многослойных ионно-плазменных покрытий с заданным составом материалов, их толщин и количеством слоев, обеспечивающих износостойкость титановых сплавов; **доказано**, что нанесением многослойных ионно-плазменных покрытий одновременно реализуется два механизма повышения износостойкости: сопротивление к появлению первичных микротрещин и сдерживание их развития на границах металлических и нитридных слоев; **доказано**, что применением многослойных ионно-плазменных покрытий на основе тугоплавких металлов IV-V групп и их нитридов достигается повышение долговечности лопаток газовых и паровых турбин из титановых сплавов.

– **применительно к проблематике диссертации использован** материаловедческий принцип совершенствования и разработки новых материалов, рассматривающий систему: «эксплуатация – служебные свойства – технологический процесс – заготовка – материал», совмещающий в себе комплекс базовых методов исследования в области материаловедения, в том

числе методы растровой электронной микроскопии, рентгенофазового анализа, механических испытаний, численных методов исследования; **разработаны** математические модели многослойных ионно-плазменных покрытий, позволившие провести численные расчеты их напряженно-деформированного состояния и сформулировать требования к составу материалов, толщине и количеству слоев, обеспечивающих износостойкость титановых сплавов при газоабразивном изнашивании, каплеударной эрозии и фреттинге;

- **изложены условия** упрочнения материала поверхности титановых сплавов концентрированными потоками энергии, содержащими ионы тугоплавких металлов IV-V групп, и формирования на их основе многослойных ионно-плазменных покрытий с заданной конструкцией (состав материалов, толщина, количество слоев) при одновременной работе нескольких ионных источников в одном вакуумном объеме;

- **раскрыты особенности** твердорастворного и дисперсионного упрочнения многослойных титан-ванадиевых нитридных покрытий (V, Ti)+(V, Ti)N, заключающиеся в стабилизации ванадием титановых слоев покрытия в β -области и формировании нитридных фаз (преимущественно δ -TiN и VN) с некогерентными границами, являющимися барьерами для протекания пластической деформации;

- **изучены механизмы** разрушения многослойных ионно-плазменных покрытий при газоабразивном изнашивании, каплеударной эрозии и фреттинге, позволившие установить новые закономерности влияния параметров их конструкции (материал, толщина, количество слоев) на износостойкость;

- **изучены процессы** на границах между нитридными и металлическими слоями покрытий, установлена их роль в качестве барьеров, сдерживающих рост трещин путем изменения направления их развития вдоль покрытия, без перехода в основной материал детали;

- **проведена модернизация** существующей методики определения прочности ионно-плазменных покрытий ASTM C1624-2022 при их упругопластическом деформировании полусферическими алмазными наконечниками, повышающая универсальность этого метода испытаний и достоверность получаемых результатов.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

- **разработаны новые способы** 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;

- **разработаны и согласованы** с АО «Силовые машины» (г. Санкт-Петербург), технологические инструкции (№1419654 И01 и №2419654 И01) по упрочнению входных, выходных кромок и контактных поверхностей бандажных полок титановых лопаток пятых ступеней низкого давления, изготовленных из сплавов BT6 и TC5;

– **разработаны технологические процессы** (№БАТТ.900.006.000, №БАТТ.900.007.000-2016, №УАСТ-1-001/1-16, №УАСТ-1-002/1-19, №203-01-04), внедренные в серийное производство ООО «Научно-производственное предприятие «Уралавиаспецтехнология» (г. Уфа), позволяющие проводить упрочнение лопаток компрессора газотурбинных двигателей и паровых турбин тепловых и атомных электростанций. В настоящее время по разработанным технологиям обработано более десяти тысяч рабочих лопаток из титановых сплавов паровых турбин, а также рабочих лопаток реактивного типа и лопаток, работающих в зоне фазового перехода паровых турбин производства АО «Силовые машины» (г. Санкт-Петербург);

– **разработаны рекомендации и технологические процессы нанесения износостойких ионно-плазменных покрытий** на рабочие и направляющие лопатки стационарных газотурбинных установок (ГТУ) импортного производства. Проведенное внедрение разработанных технологических процессов на отечественных предприятиях ПАО «Газпром» позволило изготовить и отремонтировать импортные комплектующие для ГТУ SGT-600 (всего более 250 наименований);

– **разработаны новые 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;

– **разработана методика** инструментального индентирования (№УАСТ-024-001-00 «Контроль механических свойств и адгезионной прочности твердых покрытий при их индентировании алмазными наконечниками»), используемая ООО «Научно-производственное предприятие «Уралавиаспецтехнология» (г. Уфа) при проведении научно-исследовательских и опытно-технологических работ;

– **определены перспективы** практического применения результатов теоретических и экспериментальных исследований при разработке новых многослойных покрытий по условиям эксплуатации ответственных деталей паровых и газовых турбин из титановых сплавов с целью повышения долговечности их эксплуатации;

– **создана система практических рекомендаций** по нанесению многослойных ионно-плазменных покрытий применительно к конкретным условиям эксплуатации деталей, учитывающая их массогабаритные характеристики и различные схемы обработки, что позволило разработать новые технологии упрочнения рабочих лопаток газовых и паровых турбин, а также конструкции установок для их реализации;

– **представлены предложения** по совершенствованию способов упрочнения лопаток турбомашин, используемых в составе газотранспортного, энергогенерирующего оборудования, тепловых и атомных электрических станций, с целью повышения их долговечности.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

– для **экспериментальных работ** результаты получены с применением сертифицированного оборудования и измерительных приборов в аккредитованных лабораториях; аналитические исследования выполнены с использованием современных методов исследования; воспроизводимость результатов исследования показана в различных условиях;

– **теоретические положения** разработаны на основе известных теорий прочности, механики контактного взаимодействия, теории колебаний и волн, численного моделирования методом конечных элементов (FEM) с использованием общедоступных, проверяемых данных, полученные результаты согласуются с опубликованными экспериментальными данными по теме диссертации;

– **идея работы** базируется на анализе научных исследований, производственной практики и обобщении передового отечественного и мирового опыта применения износостойких материалов и покрытий;

– **использованы литературные данные** о свойствах и способах нанесения высокотвердых металлокерамических, карбидных, нитридных, оксидных, оксикарбидных и других покрытий, применяемых для упрочнения деталей машин, режущего инструмента и штамповой оснастки;

– **установлено** качественное совпадение авторских результатов, полученных при экспериментальных исследованиях микроструктуры, механических и функциональных свойств материала поверхности титановых сплавов с ионно-плазменными покрытиями, с результатами, представленными в независимых источниках по тематике диссертации;

– **использованы** программные комплексы: ANSYS Workbench, Comsol Multiphysics при проведении численного моделирования многослойных покрытий для исследования напряженного состояния материала у вершины трещины переменной длины и в области удара твердыми абразивными частицами; программно-аппаратный комплекс анализа микроструктур и количественной металлографии Thixomet (№48386-11 в Государственном реестре средств измерений); а также, современные методики сбора и обработки исходной информации, в том числе статистической, обеспечивающие воспроизводимость и достоверность результатов исследований.

Личный вклад соискателя состоит в выборе направлений исследования, формулировании цели, научных задач и их решении, анализе литературных данных, разработке методических подходов при проведении математических и аналитических расчетов, планировании и проведении экспериментов, руководстве и организации работы научных коллективов при проведении испытаний, сборе и обработке экспериментальных данных, получении и апробации результатов, формулировании выводов и положений, выносимых на защиту. Соискатель сформулировал и возглавил на предприятии ООО «Научно-производственное предприятие «Уралавиаспецтехнология» (г. Уфа) научное направление по разработке и исследованию ионно-плазменных покрытий с заданными функциональными свойствами, лично участвовал в разработке и внедрении технологических рекомендаций, инструкций и технологических процессов в производство лопаток газовых и паровых турбин.

Диссертация охватывает основные вопросы поставленной научной проблемы и соответствует критерию внутреннего единства, что подтверждается наличием последовательного и системного плана исследования, непротиворечивыми методологическими подходами при решении металлургических задач, их логической взаимосвязи со сделанными выводами и заключением.

Диссертационная работа Селиванова Константина Сергеевича на тему «Многослойные ионно-плазменные покрытия для повышения износостойкости и долговечности лопаток турбомашин из титановых сплавов», является законченной научно-квалификационной работой, по форме и содержанию соответствующей критериям, установленным Постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 года №842 (п. 9-14), Постановлением Правительства РФ от 21 апреля 2016 года №335 (п. 9-14, п. 32) «Положения о порядке присуждения ученых степеней» ВАК Минобрнауки РФ и требованиям, предъявляемым к докторским диссертациям.

В ходе на заседании диссертационного совета соискатель ответил на все заданные вопросы, критических замечаний к рассмотренной работе высказано не было.

На заседании 20 февраля 2026 года диссертационный совет 24.2.428.05 принял решение: **за новые научно обоснованные технические и технологические решения по разработке износостойких ионно-плазменных покрытий лопаток турбомашин из титановых сплавов и технологий их нанесения, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие отечественного энергетического и нефтегазового машиностроения, присудить Селиванову Константину Сергеевичу ученую степень доктора технических наук по специальности 2.6.17. Материаловедение (технические науки).**

При проведении **тайного голосования** диссертационный совет в количестве **12** человек (из них **8** – принимали участие в месте проведения заседания лично, **4** – принимали участие в месте проведения заседания дистанционно с обеспечением аудиовизуального контакта), из них **7** докторов наук по специальности 2.6.17. Материаловедение (технические науки) рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, из **13** человек, входящих в состав совета, проголосовали «за» – 12, «против» – 0.

Заместитель председателя
диссертационного совета 24.2.428.05

 С.В. Китаев

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.428.05

 О.Р. Латыпов

20 февраля 2026 г.

д.т.н., профессор Китаев Сергей Владимирович
д.т.н., профессор Латыпов Олег Ренаатович

