

## СВЕДЕНИЯ О РЕЗУЛЬТАТАХ ПУБЛИЧНОЙ ЗАЩИТЫ

**Диссертационный совет:** Д 212.125.08

**Соискатель:** Громов Алексей Николаевич

**Тема диссертации:** Разработка и внедрение методов ускоренных испытаний лопаток ГТД с покрытиями на термостабильность и адгезию в условиях термоциклирования с применением сильноточных импульсных электронных пучков

**Специальность:** 05.07.05 – «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов»

**Решение диссертационного совета по результатам защиты диссертации:**

На заседании 23 декабря 2019 года диссертационный совет пришел к выводу о том, что диссертация представляет собой научно-квалификационную работу, соответствующую критериям, установленным Положением о присуждении ученых степеней, установленным Положением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года №842, и принял решение присудить Громову Алексею Николаевичу ученую степень кандидата технических наук.

**Присутствовали:** председатель диссертационного совета Ю.А. Равикович, ученый секретарь диссертационного совета Ю.В. Зуев, члены диссертационного совета: А.Б. Агульник; В.М. Абашев; А.С. Демидов; А.А. Козлов; Ю.М. Кочетков; В.М. Краев; Л.Н. Лесневский; Е.Ю. Марчуков; А.М. Молчанов; А.С. Мякочин; А.Б. Надирадзе; И.П. Назаренко; А.В. Ненарокомов; П.В. Никитин; Г.А. Поцов; М.В. Силуянова; С.Ф. Тимушев; Р.Г. Тазетдинов; С.А. Хартов; В.К. Чванов

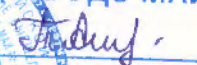
Ученый секретарь диссертационного совета  
Д 212.125.08, д.т.н., профессор



Ю.В. Зуев

И.о. начальника отдела УДС МАИ

Т.А. Аникина



ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 212.125.08,  
СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО  
БЮДЖЕТНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО  
ОБРАЗОВАНИЯ «МОСКОВСКИЙ АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ  
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»  
МИНИСТЕРСТВА НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ  
ФЕДЕРАЦИИ, ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ  
КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № \_\_\_\_\_

решение диссертационного совета от 23.12.2019 г. № 32

О присуждении Громову Алексею Николаевичу, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата технических наук.

Диссертация «Разработка и внедрение методов ускоренных испытаний лопаток ГТД с покрытиями на термостабильность и адгезию в условиях термоциклирования с применением сильноточных импульсных электронных пучков» по специальности 05.07.05 «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов» принята к защите 17.10.2019 г. (протокол заседания № 20) диссертационным советом Д 212.125.08, созданным на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, 125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д. 4; приказ о создании диссертационного совета № 105/нк от 11.04.2012 г.

Соискатель Громов Алексей Николаевич, 1975 года рождения, работает руководителем производственного комплекса "Салют" АО "ОДК".

В 1997 году соискатель окончил Рыбинскую государственную авиационную технологическую академию имени П.А. Соловьева. В 2018 году окончил аспирантуру федерального государственного бюджетного

образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)».

Диссертация выполнена на кафедре «Технология производства двигателей летательных аппаратов» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Научный руководитель – доктор физико-математических наук Шулов Вячеслав Александрович, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», кафедра «Технология производства двигателей летательных аппаратов», ведущий научный сотрудник.

Официальные оппоненты:

Смыслов Анатолий Михайлович, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», кафедра «Технология машиностроения», профессор;

Равилов Ринат Галимчанович, кандидат технических наук, Лыткаринский машиностроительный завод – филиал ПАО «ОДК-УМПО», главный металлург

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация – федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева», г. Самара, в своем положительном отзыве, подписанном Фалалеевым Сергеем Викторовичем, д.т.н., профессором, заведующим кафедрой конструкции и проектирования летательных аппаратов и

утвержденном исполняющим обязанности первого проректора – проректором по научно-исследовательской работе Прокофьевым А.Б., указала, что диссертация является законченной и самостоятельно выполненной научно-квалификационной работой, в которой решена задача по разработке методов ускоренных испытаний лопаток ГТД на термостабильность и адгезию в условиях термоциклирования. Все это предполагало проведение очень большого объема научно-исследовательских работ, направленных на определение влияния режимов облучения и финишной термообработки на химический состав, фазовый состав и структурные характеристики материала поверхностного слоя с привлечением самых современных методов анализа. Автору пришлось разрабатывать уникальные методики рентгеноструктурного анализа со снятием тонких поверхностных слоев и просвечивающей электронной микроскопии с приготовлением тонких фольг, а также выполнить уникальные и показательные измерения интенсивности экзоэлектронной эмиссии по поверхности лопаток. Все это, наряду с результатами исследований и испытаний, полученными расчетными данными термодинамического анализа и их сравнением с экспериментальными результатами, определило оригинальность и научную новизну использованных автором подходов при решении основных задач, направленных на разработку и внедрение технологических процессов изготовления лопаток турбины и компрессора.

Предложенные автором методики проведения испытаний на термостабильность в условиях термоциклирования и определения адгезии покрытий на поверхности лопаток ГТД, применялись при реализации программы работ по внедрению электронно-пучковой обработки деталей ГТД на АО «ММП имени В.В. Чернышева» и могут быть использованы на ведущих предприятия аэрокосмической отрасли для проведения ускоренных испытаний различных деталей и контроля адгезии покрытий.

Представленная диссертационная работа Громова А.Н. соответствует всем требованиям «Положения о присуждении ученых степеней»,

утвержденного постановлением правительства РФ от 24.09.2013 № 842, а сам автор – заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.07.05 - «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов».

Соискатель имеет 14 опубликованных работ, все по теме диссертации общим объемом 2.7 п.л., из них в рецензируемых научных изданиях опубликовано 13 работ. Из 14 научных работ: 13 – статьи в научных журналах (входящих в международные базы данных MathSciNet, Scopus, Web of Science, zbMATH, CA(pt), Springer), 1 – тезисы доклада на конференции. Все работы написаны в соавторстве. Эти работы посвящены:

- исследованию влияния сильноточных импульсных электронных пучков на топографию поверхности деталей газотурбинного двигателя;
- исследованию физико-химического состояния поверхностного слоя деталей до и после электронно-лучевой обработки;
- исследованию влияния электронно-лучевой обработки на формирование остаточных напряжений в поверхностных слоях деталей;
- разработке технологии восстановления свойств и ремонта лопаток газотурбинного двигателя с помощью сильноточных импульсных электронных пучков;
- разработке методики проведения ускоренных испытаний на термостабильность и контроля адгезии.

Авторский вклад заключается в следующем:

- в разработке теоретической модели применения сильноточных импульсных электронных пучков для реализации ускоренных испытаний, контроля адгезии, ремонта и восстановления эксплуатационных свойств деталей ГТД;
- в участии в экспериментальных работах;
- в проведении анализа полученных данных в результате выполненных экспериментов.

Наиболее значимые научные работы по теме диссертации:

1. Shulov V.A., Bytzenko O.A., Gromov A.N., Teryaev D.A., Engelko V.I., Tkachenko K.I. The influence of relaxation processes on effectiveness of surface treatment of titanium compressor blades with intense pulsed electron beams // Известия высших учебных заведений. Физика. 2012. Т. 55, № 12-3. С. 242-244.
2. Громов А.Н., Энгелько В.И., Шулов В.А., Теряев Д.А., Быценко О.А. Применение высокоэнергетических импульсных электронных пучков для модифицирования поверхности лопаток газотурбинного двигателя с перфорационными отверстиями // Упрочняющие технологии и покрытия. 2013. № 10. С. 23-25.
3. Шулов В.А., Громов А.Н., Быценко О.А., Теряев Д.А., Энгелько В.И., Ткаченко К.И., Ширваньянц Г.Г. Структурно-фазовые изменения в поверхностных слоях деталей из титанового сплава ВТ9 при облучении высокоэнергетическими импульсными электронными пучками // Физика и химия обработки материалов. 2014. № 1. С. 12-16
4. Gromov A.N., Shulov V.A., Bytzenko O.A., Teryaev D.A., Teryaev A.D., Engelko V.I. Application of intense pulsed electron beams for repair and property recovery of turbine blades with perforate holes // Известия высших учебных заведений. Физика. 2014. Т. 57, № 10-3. С. 27-30.
5. Шулов В.А., Энгелько В.И., Громов А.Н., Теряев Д.А., Быценко О.А., Ширваньянц Г.Г. Кратерообразование на поверхности деталей из титановых сплавов при облучении высокоэнергетическими импульсными электронными пучками // Физика и химия обработки материалов. 2015. № 5. С. 22-28.
6. Шулов В.А., Громов А.Н., Теряев Д.А., Перлович Ю.А., Исаенкова М.Г., Фесенко В.А. Текстурирование в поверхностных слоях мишеней из сплава ВТ6 при облучении высокоэнергетическими импульсными электронными пучками // Физика и химия обработки материалов. 2016. № 6. С. 19-24.
7. Шулов В.А., Громов А.Н., Теряев Д.А., Теряев А.Д. Влияние режимов облучения высокоэнергетическими импульсными электронными пучками на процесс кратерообразования на поверхности мишеней из титановых сплавов // Известия высших учебных заведений. Физика. 2016. Т. 59, №9/2. С. 279-282.

В диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем ученой степени работах.

На диссертацию и автореферат поступили следующие отзывы (все отзывы положительные).

**Отзыв на диссертацию ведущей организации** – федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» – содержит следующие замечания:

1. В диссертации остались без внимания вопросы сравнения методики ускоренных испытаний с помощью сильноточного электронного пучка и классической методики нагрев – выдержка на воздухе. Это особенно важно, так как эксплуатация изделий проходит в воздушной среде, а предлагаемый способ испытаний реализуется в вакууме;

2. Автором не предложены рекомендации о проведении испытаний на адгезию покрытий на поверхности деталей широкой номенклатуры, которые используются в других областях промышленности.

**Отзыв на диссертацию официального оппонента** доктора технических наук, профессора **Смыслова Анатолия Михайловича** содержит замечания:

1. В тексте диссертации методические вопросы, а также обзор литературных данных по исследуемой области в 1, 2 и 3 главах, что затрудняет восприятие материала. Было бы целесообразным критический анализ литературных данных, а также методические вопросы свести в одну главу, например, в главу 2.

2. Было бы желательно, разобранные автором диссертации методические подходы, а также полученные результаты по применению СИЭП на экспериментальных образцах и лопатках, распространить на другие авиационные двигатели, где имеют место в их конструкции аналогичные материалы и технологии изготовления лопаток. Отдельно обсудить результаты

испытаний материалов и лопаток и распространить методику этих испытаний на изделия из материалов другой номенклатуры.

3. Автором диссертации не проведена аттестация предложенных методик и способов испытаний материала лопаток, а также не приведено сравнение этих методик и их результатов с имеющимися в системе Объединенной двигателестроительной корпорации используемых методик и стандартов предприятий.

4. При выборе оптимальных режимов облучения поверхности лопаток КВД и ТВД сильноточными импульсными электронными потоками, автором использовалась термодинамическая методика. Однако, она не учитывает протекающих при этом в поверхностном слое процессов дефектообразования, носящих структурный характер.

**Отзыв на диссертацию официального оппонента кандидата технических наук Равилова Рината Галимчановича** содержит замечания:

1. Из диссертации не ясно, какой из методов анализа лучше применять для определения термостабильности деталей ГТД и почему?

2. К сожалению, автор недостаточно подробно раскрыл связи между изменениями структуры материалов при испытаниях на термостабильность и эксплуатационными свойствами, в частности усталостными характеристиками.

3. К недостаткам диссертации следует отнести ограниченность только жаропрочными материалами с жаростойкими покрытиями, что не позволило автору сделать более общих выводов, особенно при определении адгезии покрытий.

4. Имеется определенная небрежность оформления диссертации и автореферата, на что указано автору.

**Отзыв на автореферат диссертации Самойленко Василия Михайловича**, доктора технических наук, профессора, заведующего кафедрой «Авиатопливообеспечение и ремонт ЛА» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего



образования «Московский государственный технический университет гражданской авиации» содержит замечания:

1. Отсутствие пояснения к табличным данным (таблица 1) в части взаимосвязи уровня полученных напряжений и результатов контроля адгезии.

2. В автореферате недостаточно подробно описан процесс кратерообразования и его влияние на процессы, происходящие при испытаниях на термоциклирование по предложенной методике.

**Отзыв на автореферат диссертации Акционерного общества «ОДК-Климов»,** подписанный ведущим специалистом Живушкиным А.А., кандидатом технических наук, генеральным конструктором Григорьевым А.В., главным металлургом Кузьминым О.В. и техническим директором Кузнецовым С.М., содержит следующие замечания:

1. В автореферате очень кратко представлены результаты испытания титановых сплавов с анализом топографии поверхности, с анализом текстуры и анализом субструктуры при помощи рентгеноструктурного анализа.

2. В автореферате не отражены выводы по анализу данных, представленных в таблице №1.

**Отзыв на автореферат диссертации Дьяченко Дмитрия Александровича,** кандидата технических наук, главного конструктора АО «ММП имени В.В. Чернышева» содержит замечания:

1. В автореферате не указан класс чувствительности использованного люминесцентного капиллярного метода контроля.

2. В пятой главе не был отмечен уровень сходимости результатов при анализе остаточных напряжений методом рентгеноструктурного анализа и по методике Давиденкова при послойном удалении поверхностных слоев.

**Отзыв на автореферат диссертации Николаева Н.Н.,** главного инженера АО «Наро-Фоминский машиностроительный завод» содержит замечание:

1. Не приведены данные по анализу причин возникновения внутренних производственных дефектов при нанесении ионно-плазменных

покрытий и возможность их выявления предложенным методом по оценке адгезионных свойств.

**Отзыв на автореферат диссертации Абрамова Николая Васильевича**, доктора технических наук, профессора, начальника отдела конструкционных материалов и функциональных покрытий филиала АО «ОДК» «НИИД» содержит замечания:

1. Для сравнительной оценки эффективности метода определения адгезии конденсационных покрытий на лопатках турбокомпрессора следовало бы сопоставить полученные результаты с существующим методом оценки адгезии обдувкой электрокорундом, рекомендованным ВИАМ.

2. Утверждение автора о том, что покрытия «... систем NiCrAlY, NiCrAlSiY, NiCrAlTaSiBY и др. ... обязательно увеличивают предел выносливости» (стр. 11) не совсем корректно, покрытие скорее снижают предел выносливости при рекомендованных толщинах для лопаток турбин ГТД, а при температуре 900°C выравниваются с непокрытыми лопатками. Увеличение предела выносливости лопаток турбины с алюминидными покрытиями наблюдается только при малых толщинах, примерно до 20-30 мкм.

**Отзыв на автореферат диссертации ОАО «Опытно-конструкторское бюро имени А.И. Микояна»**, подписанный Кудриным Г.И., кандидатом технических наук, заместителем начальника центра по эксплуатации авиационной техники – главным конструктором и утвержденный Шальневым Сергеем Васильевичем, заместителем генерального директора – директором предприятия, содержит замечание:

1. В автореферате недостаточно подробно рассмотрены результаты рентгеноструктурного анализа и просвечивающей электронной микроскопии после облучения поверхности образцов при проведении испытаний на термоциклирование.

2. В тексте автореферата не содержится краткого анализа или сопоставления результатов замера уровня остаточных напряжений,

сформированные на поверхности мишеней из сплава ВТ6, ВТ8 и ВТ9 после облучения с разными плотностями энергии (рисунок 6).

**Отзыв на автореферат диссертации ПАО «ОДК-Сатурн»,** подписанный Сасариным Алексеем Михайловичем, кандидатом технических наук, исполняющим обязанности начальника ЛПК №790 и утвержденный Храминым Романом Владимировичем, генеральным конструктором, содержит замечания:

1. Определялась ли точная зависимость при проведении термоциклических испытаниях между воздействием сильноточных импульсных электронных пучков и воздействием температуры в условиях реальной эксплуатации испытываемых лопаток?

2. Проводилась ли сравнительная оценка результатов при проведении испытаний на качество адгезии между предлагаемым методом в представленной работе и другими методами определения адгезионных характеристик?

3. Каким образом устанавливалась зависимость режимов облучения при их переносе с пластинчатых образцов на лопатки компрессора и турбины, учитывая, что лопатки имеют достаточно сложный профиль поверхности и разные толщины по сечениям?

4. Из текста автореферата не ясно, по каким критериям выбирался режим облучения, а, следовательно, температура эксперимента при проведении ускоренных испытаний на термостабильность в условиях термоциклирования; возможно ли увеличение глубины нагрева материала в поверхностном слое при испытаниях на термостабильность свыше указанных в автореферате 20 мкм?

5. В тексте автореферата присутствуют опечатки.

**Отзыв на автореферат диссертации Гейкина Валерия Александровича,** доктора технических наук, профессора, заместителя генерального директора – руководителя приоритетных направлений «Технологии двигателестроения» АО «ОДК» содержит замечания:

1. Применение технологии СИЭП для залечивания дефектов типа капельной фазы в конденсированных покрытиях, получаемых методом ВПТВЭ, типа СДП-2, требует проведения усталостных испытаний лопаток турбины, подтверждающих заданные значения предела выносливости. К сожалению, в работе таких данных нет.

2. Из рисунка 3 следует, что на сплаве ВТ6 в результате импульсного облучения мишеней, например, при плотности потока примерно  $13 \text{ Дж/см}^2$ , формируются сжимающие напряжения, хотя известно, что в общем случае при облучении электронным лучом в импульсном режиме на сплавах всегда формируются растягивающие напряжения.

**Отзыв на автореферат диссертации** сотрудников кафедры физики Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования "Национальный исследовательский технологический университет "МИСиС" - **Шинкина Владимира Николаевича**, доктора физико-математических наук, профессора, действительного члена РАЕН, профессора кафедры и **Сафронова Ивана Сергеевича**, кандидата физико-математических наук, старшего преподавателя кафедры - содержит замечание:

1. Автор слишком кратко излагает вопросы, связанные с формированием остаточных растягивающих напряжений в результате облучения.

**Отзыв на автореферат диссертации** **Ножницкого Юрия Александровича**, доктора технических наук, заместителя генерального директора – директора исследовательского центра «Динамика, прочность, надежность» федерального государственного унитарного предприятия «Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова» содержит замечания:

1. В тексте автореферата отсутствует сопоставление условий и результатов термоциклирования лопаток при воздействии СИЭП и в процессе эксплуатации лопаток.

2. На стр. 11 автореферата дано утверждение, что «за усталостные свойства» отвечает не покрытие, а матрица (основной материал). Это утверждение справедливо далеко не всегда. Имеется много экспериментальных данных об отрицательном влиянии твердых покрытий на усталостную прочность лопаток (прежде всего лопаток компрессора). При этом отрицательное влияние покрытия на усталость может быть связано как с изменением свойств основного материала лопатки в процессе нанесения покрытия, так и с проращением в основной материал образовавшейся в покрытии трещины.

3. При обсуждении выполненных на эрозионном стенде в МАИ результатов эрозионных испытаний лопаток компрессоров ничего не говорится как об условиях испытания (химическом составе и размерах абразивных частиц, скорости этих частиц, угле атаки), так и о технологических параметрах, характеризующих процесс облучения лопаток СИЭП, о толщине модифицированного слоя материала лопатки. В то же время влияние указанных факторов на результаты испытаний может быть очень существенным.

4. В заключении автореферата говорится о том, что «необходимо» использовать программу «Betain». Скорее надо говорить не о необходимости, а о возможности использования этой программы.

5. В тексте автореферата имеется ряд опечаток и погрешностей. В частности, неправильно употреблен термин скважность на стр.3, не ясно, о какой разнице температур  $\Delta T$  идет речь?

**Отзыв на автореферат диссертации Халфуна Л.М.**, кандидата технических наук, генерального директора Акционерного общества «МПО им. И. Румянцева» содержит замечания:

1. Не в полном объеме отражен вопрос о сходимости результатов по оценке уровня остаточных напряжений по методу Давиденкова и рентгеноструктурного анализа.

2. Не представлены выводы по рисунку 7 «Усредненные эпоры остаточных напряжений по Давиденкову в поверхностном слое образцов из стали ЭП866-Ш с покрытием СДП-1+NiAl после обработки СИЭП при различных плотностях энергии.

Выбор официальных оппонентов обосновывается их компетентностью в отрасли науки, к которой относится диссертационная работа Громова А.Н., что подтверждается их научными публикациями в данной области.

Выбор в качестве официального оппонента Смыслова А.М., доктора технических наук, профессора кафедры «Технология машиностроения» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский государственный авиационный технический университет» обосновывается его широкой компетентностью в вопросах повышения эксплуатационных свойств лопаток ГТД. Он обладает обширными знаниями о защитных покрытиях и методах их нанесения на детали ГТД. Смыслов А.М. имеет большой опыт по созданию новых технологий восстановительного ремонта лопаток с защитными покрытиями, в том числе и с применением концентрированных потоков энергии.

Выбор в качестве официального оппонента Равилова Р.Г., кандидата технических наук, главного металлурга Лыткаринского машиностроительного завода – филиала ПАО «ОДК-УМПО» обосновывается его компетентностью в вопросах применения и исследования защитных покрытий для лопаток ГТД. По роду деятельности он обладает уникальными знаниями по методам определения прочностных свойств теплозащитных покрытий. Также имеет большой опыт в изучении разрушений теплозащитных покрытий при электронно-лучевой обработке.

В качестве ведущей организации выбрано федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» в связи с ее широко известными достижениями в

двигателестроительных отраслях науки, способностью определить научную и практическую ценность диссертации. Обладает опытом изучения прогрессивных методов повышения ресурса деталей и узлов авиационных ГТД. Сотрудники ведущей организации обладают навыками теоретических и прикладных исследований электронно-лучевых процессов, что обеспечивает возможность проводить объективную оценку всех приведенных в диссертации экспериментальных и теоретических данных, а также рекомендаций. Сотрудники ведущей организации, подписавшие отзыв на диссертацию, имеют достаточное количество публикаций по теме этой диссертации (в том числе в рецензируемых изданиях).

**Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:**

**разработаны** методики проведения испытаний деталей из жаропрочных материалов на термостабильность в условиях термоциклирования и определения адгезионной прочности защитных покрытий на лопатках газотурбинного двигателя с применением высокоэнергетических импульсных электронных пучков;

**предложен** нетрадиционный подход при проведении испытаний лопаток газотурбинного двигателя, который основан на использовании высокоэнергетических импульсных электронных пучков, что обеспечивает существенное увеличение скорости испытаний и их реализацию в вакууме;

**доказана** перспективность применения высокоэнергетических импульсных электронных пучков для испытаний на термостабильность и для определения адгезионной прочности и наличие прямых связей режимов облучения, формирующихся в поверхностном слое напряжений и характеристик термостабильности и адгезионной прочности;

**введены** измененные трактовки понятий термостабильности на макро-микро и нано-уровнях за счет применения в качестве методов анализа сканирующей электронной микроскопии, рентгеноструктурного анализа и просвечивающей электронной микроскопии.

**Теоретическая значимость исследования обусловлена тем, что:**

**доказаны** положения теоретических методик определения остаточных напряжений в поверхностных слоях мишеней при их облучении сильноточными импульсными электронными пучками, что обеспечивает создание связей «режимы облучения – характеристики термостабильности и адгезии», для чего были результативно использованы основные базовые методы определения физико-химического состояния материала в поверхностных слоях при облучении;

**изложены** основные положения и элементы теории взаимодействия электронных пучков с твердым телом, а также условия ее применения;

**раскрыты** недостатки теории взаимодействия электронных пучков с твердым телом, заключающиеся в невозможности определения структурных изменений расчетным путем для сложных гетерогенных систем (жаропрочные сплавы);

**изучены** связи этих недостатков с конечными результатами, фиксируемыми при испытаниях на термостабильность и адгезию покрытий;

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

**разработаны и внедрены** методы испытаний на термостабильность в условиях термоциклирования и на адгезионную прочность лопаток компрессора высокого давления и турбины высокого давления газотурбинного двигателя из жаропрочных материалов на АО «ММП имени В.В. Чернышева»;

**создана** система практических рекомендаций для эффективного использования разработанных методик и очерчены пределы ее реализации на практике;

**представлены** предложения для усовершенствования разработанных методик и намечены пути для их реализации: развитие теории, использование дополнительных методов анализа и испытаний.

**Оценка достоверности результатов исследования выявила:**



**для экспериментальных работ** результаты получены при дублировании информации различными методами и при использовании сертифицированного оборудования;

**теория** построена на известных классических данных и фактах, которые хорошо согласуются с опубликованными экспериментальными результатами по теме диссертации;

**идея базируется** на анализе практических результатов по использованию сильноточных импульсных электронных пучков для модифицирования и ремонта лопаток газотурбинного двигателя;

**использованы** сравнения данных, полученных в диссертации, с результатами, полученными ранее по рассматриваемой тематике;

**установлено** качественное совпадение и хорошая корреляция данных, приведенных в диссертации, с результатами, представленными в независимых источниках по данной тематике.

**Личный вклад соискателя состоит в том, что** Громов Алексей Николаевич научно обосновал необходимость применения сильноточных импульсных электронных пучков микросекундной длительности для реализации ускоренных испытаний лопаток компрессора высокого давления и турбины высокого давления газотурбинного двигателя.

Автором была установлена взаимосвязь структурных изменений, которые происходят в поверхностном слое лопаток, при воздействии сильноточного импульсного электронного пучка с плотностью энергии в импульсе от 10 до 90 Дж/см<sup>2</sup>.

Разработана математическая модель и получены экспериментальные результаты о влиянии режимов обработки облучения сильноточными импульсными электронными пучками на физико-химическое состояние материала поверхностных слоев при термоциклировании и определены значения адгезионной прочности защитных покрытий на лопатках двигателя, изготовленных из титановых и никелевых сплавов, а также жаростойких сталей.

Впервые получены данные о характере распределения напряжений, сформированных в поверхностных слоях материала в результате обработки высокоточными импульсными электронными пучками.

Автор непосредственно организовывал и выполнял все работы по подготовке и реализации испытаний, а также по проведению сравнительных тестовых испытаний лопаток на термостабильность и адгезионную прочность.

На заседании 23 декабря 2019 года диссертационный совет принял решение присудить Громову А.Н. ученую степень кандидата технических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 22 человек, из них 10 докторов наук по профилю рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, из 26 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за – 22, против – нет, недействительных бюллетеней – нет.

Председатель совета  
д. техн.наук, профессор



Равикович Юрий Александрович

Ученый секретарь совета  
д. техн.наук, профессор

Зуев Юрий Владимирович

23 декабря 2019 г  
М.П.