

УТВЕРЖДАЮ  
Директор ИФПМ СО РАН  
Профессор РАН, д.т.н.

Е.А. Колубаев

29 ноября 2024 г.

## ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу Ерикова Кирилла Михайловича  
«Разработка технологии модификации поверхности деталей из жаропрочных порошковых материалов с применением сильноточных импульсных электронных пучков», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.15. – «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов».

**Актуальность темы диссертации.** Современный этап развития авиационного двигателестроения и курс на технологический суверенитет государства предъявляют высокие требования к надежности, экономической эффективности и безопасности производства современных авиационных двигателей гражданского и военного назначения. В этой связи диссертация Ерикова Кирилла Михайловича является актуальной в спектре вопросов разработки новаторских конструкторско-технологических решений производства методом аддитивных технологий, снижающих стоимость изготовления сложно-профильных деталей ГТД из востребованных сплавов Co-Cr-Mo. Высокие требования к высоконагруженным деталям ГТД сложно обеспечить в рамках одной СЛС-технологии и диссертант поднимает и раскрывает важный вопрос постобработки деталей и узлов с помощью сильноточных импульсных электронных пучков. Цель диссертации заключается в разработке основ модифицирования и повышения качества поверхностного слоя деталей и узлов ГТД из порошкового сплава системы Co-Cr-Mo с помощью обработки концентрированными импульсными потоками энергии для обеспечения нормативных параметров и заданных эксплуатационных свойств изделия. Возможность практического применения комплексной методики облучения ИЭП, отличной от традиционной технологии постобработки и имеющей более высокие показатели эффективности так же свидетельствует об актуальности темы диссертации на современном этапе.

**Научная новизна.** Автором разработана уникальная комплексная методика исследования влияния параметров облучения ИЭП различной интенсивности на качество и физико-химические параметры поверхностного слоя деталей ГТД из порошкового жаропрочного сплава на кобальтовой основе. Опытным путем подтверждено, что снижение шероховатости поверхности в диапазоне от 25 до 70 % не зависит от используемого оборудования для обработки ИЭП. Доказано, что в

Доказано, что в  
и контроля исполнения  
документов МАИ

«06», 12, 2024 г.



зависимости от используемого источника и режима облучения, образуется модифицированный слой с отличным от основного материала структурно-фазовым состоянием в диапазоне от 5 до 40 мкм. Впервые получены данные о снижении уровня остаточных растягивающих напряжений на образцах из порошкового сплава системы Co-Cr-Mo на глубину до 80 мкм при облучении с помощью СИЭП в режиме 35 Дж/см<sup>2</sup> - 3 импульса на установке «ГЕЗА-ММП». При этом же режиме выявлено повышение жаростойкости образцов-свидетелей деталей горячей части ГТД на 25%. Перечисленные и остальные результаты исследования свидетельствуют о новаторских решениях с доказательной базой в области постобработки поверхностного слоя деталей ГТД.

**Практическая значимость работы.** Выявленные автором в результате исследования закономерности изменения структуры и свойств образцов деталей ГТД из порошкового материала позволяют целенаправленно выбирать режимы обработки поверхностного слоя ИЭП для получения повышенных эксплуатационных характеристик деталей перспективных авиационных двигателей. Представленная методика может быть применена на ведущих предприятиях аэрокосмической отрасли для постобработки и повышения эксплуатационных свойств деталей, произведенных с помощью аддитивных технологий.

**Достоверность и степень обоснованности положений, выносимых на защиту.** Все исследования и эксперименты, проведенные в рамках работы, были произведены на современном аттестованном оборудовании с помощью апробированных методик испытаний. Достоверность подтверждена в процессе сравнения полученных данных с известными опубликованными экспериментальными данными. Представлены и доказаны положения об обосновании выбора технологического режима облучения с помощью ИЭП образцов-свидетелей деталей из порошкового жаропрочного сплава системы Co-Cr-Mo с целью повышения качества и модификации поверхностного слоя. Даны оценки влияния выбранного режима облучения на уровень остаточных поверхностных напряжений в зависимости от типа стратегии сканирования и результаты комплексного исследования влияния технологических режимов облучения ИЭП различной интенсивности. Даны обоснованные рекомендации по промышленному использованию технологии облучения для повышения эксплуатационных свойств деталей ГТД и по выбору соответствующего оборудования.

**Общие сведения о диссертации. Оценка содержания.** Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы из 98 наименований и двух приложений. Общий объем диссертации составляет 157 страниц, 85 рисунков и 19 таблиц. Существенные замечания по оформлению отсутствуют. Иллюстрации и таблицы четко читаемы и уместны в структуре работы.

**Вводная часть** знакомит с обоснованием актуальности диссертации и формулирует целеполагание работы, описывает поставленные задачи. В емкой



форме описана научная новизна и практическая значимость темы. Представлены положения, выносимые на защиту с апробацией результатов и списком публикаций по данному вопросу.

**В первой главе** диссертант описывает преимущества аддитивного метода производства деталей и узлов ГТД на современном этапе. Проанализирован отечественный и зарубежный опыт по постобработке деталей из жаропрочных сплавов на основе кобальта и выяснено, что на сегодняшний день нет готового технологического решения этого вопроса. Однако, найдены работы, подтверждающие приоритет постобработки поверхностей методом ИЭП над традиционными технологиями. Повышение эксплуатационных свойств и соответствие деталей и узлов заданным качественным параметрам является обоснованной целью исследований методов и режимов облучения ИЭП для постобработки поверхностей производимых аддитивным методом деталей.

**Во второй главе** автор раскрывает методики облучения во взаимосвязи с физико-химическим состоянием поверхностных слоев и определением эксплуатационных свойств деталей из жаропрочного порошкового сплава КХ28М6. Исследуемые в работе образцы изготовлены методом селективного лазерного сплавления на установке Concept Laser M2 Cusing в соответствии с технологическим процессом изготовления реальной детали двигателя по технологии АО «Центр аддитивных технологий». Основные объекты исследования – образцы-свидетели, выращенные совместно с номенклатурной деталью типа кронштейн. Проведены исследования по вариативности выбора режима облучения с учетом термофизических свойств и значений порога плавления материала. Автор провел комплексное металлургическое исследование с применением современных методик оптической металлографии, рентгеноспектрального микроанализа и растровой электронной микроскопии. Данные таблиц подтверждают результаты проведенных исследований.

**В третьей главе** автор представил обоснование выбора режима облучения в зависимости от требования нормативной документации по параметру шероховатости. Облучение проводилось на установках «ГЕЗА-ММП» и «РИТМ-СП». Исследования подтвердили наиболее интенсивное снижение шероховатости при плотности энергии  $\approx 7,1 \pm 1,5$  Дж/см<sup>2</sup> на установке «РИТМ-СП» при числе импульсов, равном 60. Следующим параметром исследована микротвердость при нагрузке  $P=20$ г. Проведены сравнительные опыты по облучению в разных режимах и сделан доказательный вывод о преимуществе облучения при режиме  $W \approx 7,1 \pm 1,5$  Дж/см<sup>2</sup>,  $n=45$ . Последующий ряд исследований и замеров модифицированного слоя установил зависимость увеличения числа импульсов при равных значениях плотности энергии на глубину модифицированного слоя на установке «ГЕЗА-ММП». Хорошая корреляция расчетных и экспериментальных данных позволила автору сделать вывод о возможности и целесообразности применения методики



облучения ИЭП для оптимизации производственных процессов постобработки деталей и узлов ГТД.

**Четвертая глава** посвящена анализу влияния вариантов режима облучения с помощью ИЭП на качество поверхности деталей из порошкового сплава КХ28М6 для перспективных ГТД. Детально рассмотрены топография, микроструктура и уровень остаточных напряжений. Представленные автором таблицы показывают влияние режимов облучения на исследуемые параметры качества поверхности образцов.

**В пятой главе** автор обосновывает технологические рекомендации по повышению качества поверхностного слоя данными экспериментов. Основными выводами этого этапа работы можно считать сниженный диапазон шероховатости  $Ra=2,5 - 1,6$  мкм для облучения на установке «ГЕЗА-ММП». Технология применима для исследуемых деталей из сплава КХ28М6 с приведением их к заданным параметрам качества. Обработка до сорока сложнопрофильных деталей высотой до 25 см. на этой установке выявляет преимущества авторского метода, что подтверждается актом об использовании результатов исследования в АО «ММП имени В. В. Чернышева».

**В заключении работы** диссертант подытоживает достигнутые цели и задачи работы. В ходе экспериментов разработаны методики выбора режимов облучения для постобработки поверхности деталей ГТД, исследованы физико-химическое и структурно-фазовое состояние поверхностного слоя образцов и деталей горячей части ГТД. Впервые получены результаты исследования влияния параметров облучения на качество и структурно-фазовое состояние поверхностного слоя деталей из сплава системы Co-Cr-Mo. Доказано, что ИЭП микросекундной длительности значительно снижает трудоемкость постобработки деталей и является высокоэффективным инструментом для модифицирования поверхности сплавов, полученных из порошка кобальт-хрома методом аддитивных технологий.

**Рекомендации по использованию результатов диссертации.** Данные, полученные в результате исследовательской и экспериментальной работы Ерикова К.М., могут быть использованы в технологическом процессе постобработки поверхности деталей и узлов ГТД на всех предприятиях, занимающихся проектированием и изготовлением деталей ГТД с помощью аддитивных технологий, включая ПАО «ОДК-Сатурн», ПК «Салют» АО «ОДК», АО «ММП имени В.В. Чернышева», АО «ОДК-Пермские моторы», АО «ОДК-Климов».

**Замечания по диссертации.** Достаточно высокий уровень исполнения работы не исключает некоторые обнаруженные недостатки.

1. Задача 1 в диссертации заявлена как «Разработка методики выбора режимов облучения ....». После прочтения диссертации складывается впечатление, что методика заключается в том, чтобы произвести несколько обработок образцов



при различных режимах облучения и выбрать режим, обеспечивающий наилучшие характеристики поверхности. Вряд ли такую процедуру, заключающуюся в простом переборе вариантов, следует называть методикой. В выводах к соответствующей главе 3 отсутствует вывод по задаче 1.

2. Вызывают сомнение данные таблицы 3.4. диссертации, содержащей результаты измерения элементного состава на различной глубине от поверхности. Во-первых, в таблице не указано, в каких единицах приведена концентрация. Если предположить, что в массовых процентах, то в атомных процентах содержание углерода на глубине  $\sim 10$  мкм будет сравнимо с суммарным содержанием остальных элементов. Таким образом, фазовый состав на глубине  $\sim 10$  мкм должен состоять, главным образом, из карбидов. Однако на металлографическом шлифе не наблюдается соответствующего изменения контраста.

3. На зависимостях 4.19 – 4.21 не указана размерность величины, откладываемой по вертикальной оси. Если величина безразмерная, то получается прирост массы 40%. Такое изменение массы в процессе испытаний на жаропрочность выглядит слишком большим.

4. В выводе 3 к главе 4 утверждается, что на границах изменённого поверхностного слоя обнаружены участки с гексагональной фазой (фазой, имеющей гексагональную кристаллическую решетку), что приводит к упрочнению, но снижает пластичность. В работе не проводили исследования по идентификации указанной фазы, не измеряли прочностные свойства и пластичность, поэтому данный вывод следовало бы изложить не в виде доказанного факта, а в виде предположения.

Указанные недостатки не снижают научно-практической ценности рецензируемой диссертации и позволяют объективно оценить высокий уровень проведенной диссертантом работы по достижению поставленной цели.

**Подтверждение опубликованных основных результатов диссертации в научной печати.** По теме диссертации опубликовано девять работ, из них в рецензируемых научных изданиях рекомендованных ВАК и изданиях, приравненных к ним, опубликовано две работы.

**Заключение по диссертации.** Диссертационная работа Ерикова Кирилла Михайловича выполнена на достойном научном уровне. Результатом работы является решение актуального в настоящий момент вопроса разработки технологии модификации поверхности деталей из жаропрочных порошковых материалов с применением сильноточных импульсных электронных пучков. Приведенные данные исследования и выбора режимов облучения можно считать обоснованными и перспективными в плане постобработки деталей и узлов перспективных ГТД.

Автореферат соответствует основному содержанию диссертации.



Работа Ерикова Кирилла Михайловича отвечает требованиям п.9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ от 24.09.2013г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук. Автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.15. – «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов».

Отзыв подготовлен Шаркеевым Юрием Петровичем, главный научный сотрудник лаборатории физики наноструктурных биоконпозитов ИФПМ СО РАН, доктор физико-математических наук, 01.04.07 – «Физика конденсированного состояния», и Ивановым Константином Вениаминовичем, ведущий научный сотрудник лаборатории физики консолидации порошковых материалов ИФПМ СО РАН, доктор физико-математических наук, 01.04.07 – «Физика конденсированного состояния».

Диссертация, автореферат диссертации и отзыв обсуждены 15.11.2024 г. на расширенном научном семинаре лаборатории физики наноструктурных биоконпозитов ИФПМ СО РАН, протокол № 23/24 от 28 ноября 2024 г.

Согласны на обработку персональных данных.

Председатель семинара, г.н.с. лаборатории физики наноструктурных биоконпозитов ИФПМ СО РАН, д. ф.-м. н., профессор

Шаркеев Юрий Петрович

Ведущий научный сотрудник лаборатории физики консолидации порошковых материалов ИФПМ СО РАН, д. ф.-м. н.

Иванов Константин Вениаминович

Секретарь семинара, научный сотрудник лаборатории физики наноструктурных биоконпозитов ИФПМ СО РАН, к.т.н.

Ерошенко Анна Юрьевна

29.11.2024

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук (ИФПМ СО РАН), 634055, г. Томск, пр. Академический, 2/4.

Телефон: +7 (3822) 286-941. Факс: +7 (3822) 49-25-76

E-mail: root@ispms.tomsk.ru, вебсайт: <http://www.ispms.ru>

С отзывом ознакомлен  
08.12.2024