

На правах рукописи



Ериков Кирилл Михайлович

**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ МОДИФИКАЦИИ ПОВЕРХНОСТИ
ДЕТАЛЕЙ ИЗ ЖАРОПРОЧНЫХ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ С
ПРИМЕНЕНИЕМ СИЛЬНОТОЧНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ
ПУЧКОВ**

Научная специальность 2.5.15. - «Тепловые, электроракетные двигатели и
энергоустановки летательных аппаратов»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени

кандидата технических наук

Москва – 2024

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»

Научный руководитель: **Быценко Оксана Анатольевна**
кандидат технических наук

Официальные оппоненты: **Самойленко Василий Михайлович**
доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет гражданской авиации», заведующий кафедрой «Авиатопливообеспечения и ремонта летательных аппаратов»

Лигачев Александр Егорович

доктор физико-математических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук», ведущий научный сотрудник

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук.

Защита состоится «27» декабря 2024 г. в 10:00 на заседании диссертационного совета 24.2.327.06 на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» по адресу: 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»: <https://mai.ru/events/defence>.

Автореферат разослан «_____» _____ 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.327.06
доктор технических наук, доцент



Краев Вячеслав Михайлович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. Для авиационного двигателестроения всегда было и остаётся соответствие материалов и технологий высоким требованиям надёжности и экономической эффективности. В современных реалиях видно, как технология изготовления современных авиационных двигателей различного назначения (как гражданского, так и военного) претерпевает поистине революционные изменения, которые связаны с интенсивным развитием новых технологий. Это коренным образом меняет представление об организации производственного процесса. Ведущую роль в авиационном двигателестроении сегодня играют аддитивные технологии, а наиболее востребованным методом является селективное лазерное сплавление (СЛС). Основное преимущество данного метода заключается в возможности разработки принципиально новых конструкторско-технологических решений.

Использование таких малооперационных технологий, как СЛС–технология при проектировании опытных технологических процессов позволяет значительно сократить трудоемкость и стоимость изготовления сложно профильных деталей ГТД из труднообрабатываемых материалов, к которым относятся и сплавы системы Co-Cr-Mo, которые снова становятся востребованными в качестве конструкционного материала для ответственных деталей горячей части ГТД. Однако высокие требования, предъявляемые к высоконагруженным деталям ГТД, не всегда можно обеспечить с помощью СЛС–технологии. Поэтому остаётся открытым вопрос постобработки сложно профильных деталей и узлов ГТД, которые должны иметь высокое качество поверхности и обеспечивать высокий уровень эксплуатационных свойств. Следует заметить, что использование инновационных технологий изготовления деталей требует и нового подхода к вопросу получения деталей, имеющих высокий уровень эксплуатационных свойств поверхностного слоя. В данном случае выбор технологий модифицирования поверхностного слоя с помощью технологий близких по своему механизму к механизму выращивания деталей помощью технологии СЛС является обоснованным. Известно, что такими технологиями для модификации поверхностного слоя деталей и узлов, полученных методом СЛС, может стать обработка электронными и ионными пучками. При использовании этих двух направлений для улучшения состояния поверхностного слоя, а также придания ему и подповерхностным слоям определенных свойств в материале происходят процессы как в твердом состоянии, так и процессы, протекающие при расплавлении тонкого слоя в процессе обработки. В последнем случае открываются более широкие возможности, поскольку в расплавленный металл можно вводить растворимые или нерастворимые добавки, а также оперируя режимами получать заранее известное структурно-фазовое состояние поверхностного слоя.

Разработка и совершенствование методов поверхностной обработки заготовок и деталей ГТД с использованием интенсивных импульсных потоков энергии (ИПЭ) имеет ряд преимуществ перед классическими методами поверхностной механической, химической и термомеханической обработок: формирование уникального физико-химического состояния материала поверхностного слоя; достижение рекордных точности изготовления (на

нанометровом уровне) и шероховатости поверхности ($Ra \sim 0,05-0,06$ мкм); экологическая чистота; высокая производительность (площадь поперечного сечения энергетических потоков изменяется от 30 см^2 до 1 м^2 , а длительность импульса - от 10 наносекунд до нескольких десятков микросекунд).

Применение ИПЭ имеет только один недостаток: высокая наукоемкость разрабатываемых технологий, обусловленная необходимостью проведения длительных и дорогостоящих исследований влияния режимов облучения на физико-химическое состояние материала в поверхностных слоях деталей.

Данная работа сконцентрирована, прежде всего, на использовании импульсных электронных пучков (ИЭП) различной интенсивности для модификации свойств деталей перспективных ГТД.

Проблема повышения эксплуатационных свойств деталей и узлов современных и перспективных ГТД из конструкционных материалов, в частности, кобальт-хромовых сплавов, является одной из наиболее сложных в отрасли авиационного двигателестроения. Обладая высокими удельными механическими характеристиками, эти сплавы являются непластичным, хрупким материалом. Этот недостаток можно преодолеть, используя различные виды поверхностного упрочнения, связанные с использованием концентрированных потоков энергии, с помощью которых в поверхностном слое можно создавать наноструктурные состояния, обладающие высоким комплексом свойств. Одним из эффективных и достаточно распространенных способов такой модификации структуры являются сильноточные импульсные электронные пучки. Накопленный к настоящему времени опыт применения этого метода показывает, что широкому внедрению его в практику препятствуют имеющиеся пробелы в изучении закономерностей электронно-лучевого воздействия на структурно-фазовое состояние обрабатываемого слоя изделия, изготовленного с помощью аддитивных технологий и влияния его на механические свойства этих материалов.

Таким образом, **актуальность темы настоящей работы**, определяется в научном плане – необходимостью разработки комплексной методики исследования влияния облучения с помощью электронно-пучковой обработки на поверхность образцов, получения базовых фундаментальных знаний о влиянии режимов обработки интенсивными импульсными электронными пучками на физико-химическое состояние поверхностных слоев современного порошкового жаропрочного кобальтосодержащего сплава, а также экспериментальному выявлению физической природы изменения структурно-фазовых состояний поверхностных слоев кобальт-хромовых сплавов, полученных методом аддитивных технологий при облучении ИЭП, анализу и систематизации полученных данных при проведении жаростойких испытаний порошковых жаропрочных кобальтохромовых и никелевых сплавов; в практическом отношении – апробацией инновационной методики подбора пороговых режимов облучения при электронно-пучковой обработке на установках, с отличными параметрами импульсного электронного пучка, разработкой технологических режимов облучения поверхностного слоя деталей горячей части перспективных ГТД с последующей возможностью практического применения на опытно-промышленной установке для серийного производства.

Степень разработанности темы диссертации. Исследования большинства авторов в России, (работы проф. Проскуровского Д.И. и проф. Энгелько В.И.) выглядят особенно впечатляющими с позиций международной признательности. В работах Пайкина А.Г. и Белова А.Б. была показана высокая эффективность обработки высокопрочными импульсными электронными пучками (СИЭП) для модифицирования и ремонта лопаток ГТД из титановых сплавов и жаропрочных сталей. Стоит отметить, что данные исследования проводились для деталей авиационных двигателей, полученных традиционными методами производства. Изучение влияния СИЭП на изделия, произведенные с помощью аддитивных технологий из порошка кобальт-хрома в России и в мире ранее не проводилось.

Цель работы: разработка основ модифицирования и повышение качества поверхностного слоя деталей и узлов ГТД из порошкового сплава системы Co-Cr-Mo путем внедрения обработки с помощью концентрированных импульсных потоков энергии, обеспечивающей нормативные параметры и заданные эксплуатационные свойства.

Задачи работы:

1. Разработка методики выбора режимов облучения с помощью как низкоинтенсивных, так и высокоинтенсивных импульсных электронных пучков для постобработки поверхности деталей ГТД из современных порошковых жаропрочных сплавов;

2. Разработка методики исследования физико-химического и структурно-фазового состояний поверхностного слоя образцов и деталей горячей части современных ГТД из порошкового жаропрочного сплава на основе комплексного исследования с помощью металлофизических методов;

3. Проведение комплексного исследования влияния параметров облучения на качество и структурно-фазовое состояние поверхностного слоя образцов-свидетелей ответственных деталей двигателей современных летательных аппаратов из порошкового сплава системы Co-Cr-Mo;

4. Установление влияния выбранных технологических режимов облучения электронно-импульсной пучковой обработки на напряжённое состояние образцов из порошкового сплава системы Co-Cr-Mo;

5. Установление влияния выбранных технологических режимов облучения на жаростойкость образцов, из жаропрочных порошковых сплавов для деталей и узлов перспективных ГТД;

6. Разработка научно обоснованных рекомендаций по внедрению облучения с помощью ИЭП и выбору оборудования с целью повышения качества поверхностного слоя и получения необходимого уровня эксплуатационных свойств (жаростойкости).

Объект и предмет исследования.

Объект исследования – технологический процесс облучения с помощью интенсивных электронных импульсных пучков деталей горячей части перспективных ГТД, полученных методом СЛС из порошкового жаропрочного сплава системы кобальт-хром-молибден.

Предмет исследования – характеристики поверхностного слоя деталей перспективных ГТД из порошкового сплава системы кобальт-хром-молибден, полученных с помощью СЛС-технологии и обработанных интенсивными импульсными электронными пучками.

Научная новизна результатов исследований:

1. Разработана комплексная методика исследования влияния параметров облучения импульсными электронными пучками различной интенсивности на качество и физико-химические параметры поверхностного слоя образцов-свидетелей ответственных деталей ГТД из порошкового жаропрочного сплава на кобальтовой основе;

2. Установлено, что вне зависимости от используемого оборудования для электронно-пучковой обработки происходит снижение шероховатости поверхности в диапазоне от 25 до 70%;

3. Установлено, что в процессе облучения на поверхности мишеней из деталей горячей части ГТД образуется модифицированный слой с отличным от основного материала структурно-фазовым состоянием в диапазоне от 5 до 40 мкм в зависимости от используемого источника и режима облучения;

4. Установлено, что модифицированный слой имеет более высокие показатели микротвёрдости за счёт карбидного упрочнения вне зависимости от используемого источника и режима облучения;

5. Установлено, что тип стратегии сканирования при выбранном технологическом режиме облучения $35 \text{ Дж/см}^2 - 3$ импульса на опытно-промышленной установке «ГЕЗА-ММП» не влияет на уровень остаточных напряжений;

6. Установлено, что при облучении с помощью СИЭП в режиме облучения $35 \text{ Дж/см}^2 - 3$ импульса на опытно-промышленной установке «ГЕЗА-ММП» происходит снижение уровня остаточных растягивающих напряжений на образцах из порошкового сплава системы кобальт-хром-молибден на глубину до 80 мкм;

7. Установлено, что жаростойкость образцов-свидетелей деталей горячей части ГТД повышается на 25% по выбранному режиму облучения: $35 \text{ Дж/см}^2 - 3$ импульса;

8. Установлено, что процесс абляции приводит к снижению жаростойкости порошковых жаропрочных сплавов.

Теоретическая и практическая значимость результатов исследований:

Полученные экспериментальные данные по влиянию обработки ИЭП на формирование и эволюцию структуры, фазового состава и дефектной субструктуры образцов полученных методом СЛС из порошкового жаропрочного сплава на кобальтовой основе позволяют углубить знания о физических процессах формирования структурно-фазовых состояний при внешних энергетических воздействиях. Выявленные закономерности изменения структуры и свойств образцов позволяют целенаправленно выбирать режимы обработки импульсным электронным пучком, необходимые для получения повышенных эксплуатационных характеристик перспективных авиационных двигателей.

Методология и методы исследований. Экспериментальные исследования проводились на сертифицированном оборудовании с использованием аттестованных средств измерений. Проведены замеры шероховатости поверхности и микротвердости материала образцов, проведена оценка уровня остаточных поверхностных напряжений, а также проведены исследования с помощью металлофизических методов исследования, а именно оптической

металлографии, растровой электронной микроскопии, рентгеноспектрального микроанализа. Кроме того, проведены испытания на жаростойкость образцов.

Положения, выносимые на защиту:

1. Результаты комплексного исследования влияния технологических режимов облучения импульсными электронными пучками различной интенсивности на поверхностные слои порошкового жаропрочного сплава системы Co-Cr-Mo;

2. Обоснование выбора технологического режима облучения с помощью СИЭП образцов-свидетелей деталей из порошкового жаропрочного сплава системы Co-Cr-Mo с целью повышения качества и модификации поверхностного слоя;

3. Оценка результатов исследования влияния выбранного режима облучения на уровень остаточных поверхностных напряжений в зависимости от типа стратегии сканирования;

4. Результаты испытаний образцов на жаростойкость в зависимости от режима облучения сильноточными импульсными электронными пучками поверхности образцов из порошковых жаропрочных сплавов для авиационного двигателестроения;

5. Рекомендации по промышленному использованию технологии облучения интенсивными импульсными электронными пучками для получения необходимого качества поверхности и повышения эксплуатационных свойств;

6. Рекомендации по выбору оборудования для электронно-импульсной обработки в зависимости от размерности, требований к качеству и состоянию поверхностного слоя детали в соответствии с нормативной документацией.

Достоверность результатов исследования подтверждается использованием современного аттестованного оборудования, а также апробированных методик проведения испытаний. Результаты исследований не противоречат опубликованным работам других авторов. Достоверность полученных результатов подтверждается сравнением с известными экспериментальными данными.

Апробация результатов исследования. Основные результаты работы были представлены на Международном конгрессе 7th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (г. Томск, ИСЭ СО РАН, сентябрь 2020 г.); на Международной конференции The International Conference of Aerospace System Science and Engineering 2020 (г. Шанхай, SJTU, июль 2020 г.); на XI международной научно-технической конференции «Проблемы совершенствования робототехнических и интеллектуальных систем» (г. Москва, МАИ (НИУ), декабрь 2020 г.); на Научно-технической конференции «Климовские чтения - 2020. Перспективные направления развития авиадвигателестроения» (г. Санкт-Петербург, АО «ОДК-Климов», июнь 2020 г.); на Международной научно-технической конференции по авиационным двигателям «International Conference on Aviation Motors» (г. Москва, ФАУ «ЦИАМ им. П.И. Баранова», ноябрь 2020 г.); на Международной конференции по промышленной инженерии «International Conference on Industrial Engineering» (г. Сочи, Московский политехнический университет, май 2020 г.); на Конкурсе «Молодёжь и будущее авиации и космонавтики», (г. Москва, МАИ (НИУ), ноябрь 2023 г.); на Международном

конгрессе «6th International Conference on New Materials and High Technologies EFRE-2024» (г. Томск, Томский политехнический университет, сентябрь 2024 г.).

Личный вклад соискателя заключается в постановке задач и формулировании технических требований к экспериментальным работам по определению основных характеристик образцов, получаемых методом аддитивных технологий из порошка кобальт-хрома; в непосредственном участии в проведении экспериментов; в обработке экспериментальных данных; в разработке основных рекомендаций к технологическому процессу обработки изделий перспективных ГТД сильноточными импульсными электронными пучками.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 9 работ, из них в рецензируемых научных изданиях рекомендованных ВАК и изданиях, приравненных к ним опубликовано 2 работы.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы из 98 наименований и 2 приложений. Общий объем диссертации составляет 157 страниц, 85 рисунков и 19 таблиц.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дана общая характеристика и обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель работы и задачи для её достижения, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы. Представлены положения, выносимые на защиту, апробация результатов исследований и публикации по теме диссертационной работы.

В первой главе на основании проведенного анализа научно-информационных источников показаны преимущества аддитивного производства для изготовления деталей и узлов современного газотурбинного двигателя. Показано, что в связи с плохой обрабатываемостью изделия из порошкового сплава на основе кобальта применение СЛС-технологий становится основным методом изготовления заготовок для деталей и узлов из данного материала, особенно для деталей сложной формы различного размерного ряда.

При обзоре современного состояния по разработке технологических процессов, нацеленных на повышение качества поверхностного слоя, его упрочнение и модификацию, как в российских, так и в зарубежных информационных источниках не обнаружено готовых технологических решений по постобработке деталей и узлов из жаропрочных порошковых сплавов на основе кобальта. Существующим недостатком аддитивно произведённых деталей для перспективных ГТД из кобальтовых сплавов остаётся сложность получения качественного поверхностного слоя, которое должно соответствовать нормативной документации и уровню заявленных эксплуатационных свойств.

Критический анализ литературных данных показал, что имеющийся опыт использования интенсивных импульсных электронных пучков для модификации поверхности деталей проточной части ГТД из жаропрочных сплавов показал, что поверхностная обработка с помощью ИЭП позволяет не только обеспечить должное качество поверхностного слоя, но повысить такие эксплуатационные свойства как коррозионная стойкость, жаростойкость, эрозионная стойкость и усталостная прочность. Кроме того, в ряде работ имеются положительные результаты использования электронно-пучковой обработки для образцов и

деталей, полученных методами аддитивного производства, которые позволяют решить вышеуказанную проблему исходя из ранее полученных результатов для жаропрочных материалов, полученных традиционными методами. Следовательно, выбор обработки с помощью облучения интенсивными импульсными электронными пучками научно-технически обоснован и имеет реальные перспективы достижения цели и решения поставленных задач данной работы.

Вторая глава посвящена методикам облучения, изучения физико-химического состояния поверхностных слоев и определения эксплуатационных свойств деталей из жаропрочного порошкового сплава КХ28М6. Основными объектами исследований являются образцы-свидетели, выращенные совместно с одной из номенклатурных деталей типа кронштейн. Внешний вид облик деталей и образцов представлены на рисунках 1, 2 и 3.



Рисунок 1 – Внешний вид лепестков форсажной камеры, изготовленных из сплава КХ28М6



Рисунок 2 – Внешний вид рабочих лопаток, изготовленных из сплава КХ28М6

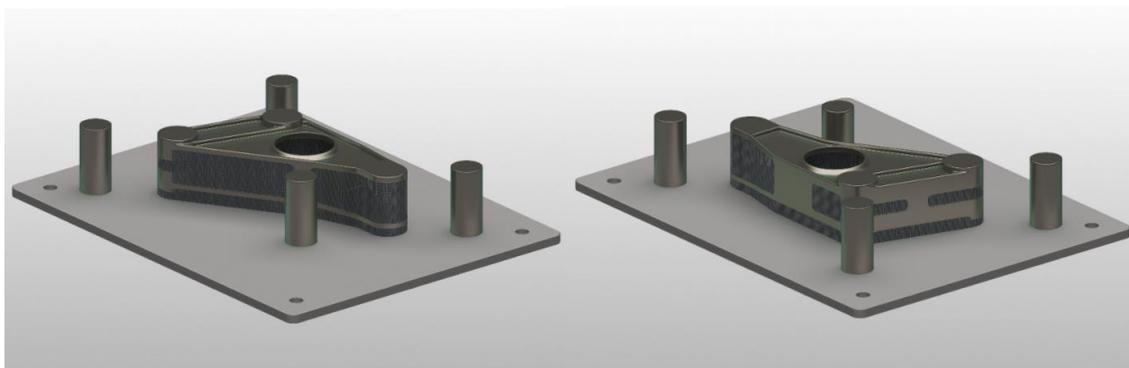


Рисунок 3 – Внешний вид платформы построения исследуемых образцов

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».

Облучения образцов проводилось на двух установках: на импульсной электронно-пучковой «РИТМ-СП» (производства ООО «Микросплав», г. Томск) и на опытно-промышленной установке «ГЕЗА-ММП» (разработана Институтом электрофизической аппаратуры им. Ефремова, г. Санкт-Петербург по техническому заданию АО «ММП имени В.В. Чернышева»).

При методическом подходе к выбору режима облучения на основании критического анализа имеющихся методик в качестве основного выбран критерий типа нагрева γ .

$$\gamma = r/r_{th} \quad (1)$$

При выборе первоначального режима облучения использованы данные компьютерного моделирования динамики температурных полей при облучении ИЭП с использованием программного комплекса "HEATRACK-1.0" (зарегистрированный коммерческий продукт правообладания Томского научного центра Сибирского отделения РАН).

В качестве основного источника СИЭП выбрана опытно-промышленная установка «ГЕЗА-ММП». Данные по значению энергии порога плавления материала для сплава КХ28М6 рассматриваются относительно свойств хрома. Проведена оценка, учитывая, что все свойства известных сталей близки к свойствам чистого хрома (за исключением теплопроводности, которая примерно на 30% ниже). Значение порога плавления материала (ППМ) для хрома составляет 2,95 Дж/см² при $\tau \sim 1,0$ мс. Необходимо умножить это значение на $\sqrt{2.5}$, в соответствии с формулой (2).

$$E_{tm} = j_m U = [\sqrt{\rho c \lambda (T_m - T_0)}] \sqrt{\tau} (2ierfc(0))^{-1} \quad (2)$$

Учитывая, что теплопроводность сплава КХ28М6 на 30% больше, в результате получаем, что ППМ $\approx 3,9$ Дж/см².

Выбор режимов облучения для установки «ГЕЗА-ММП» выбирались с учетом вклада термофизических свойств материала и значений порога плавления материала, а также на основании режимов облучения жаропрочных сплавов, полученных традиционным методом и ранее облученных на установках «ГЕЗА 1» и «ГЕЗА-ММП».

В данной работе с использованием современных методик проведено комплексное металлургическое исследование, состояния поверхностного слоя до и после электронно-импульсной обработки, который включал спектр металлофизических методов исследований, таких как оптическая металлография (ОМ), рентгеноспектральный микроанализ (РСМА) и растровая электронная микроскопия. Кроме того, проведены измерения микротвердости (Н_ц) и шероховатости (Ra), а также замерен уровень поверхностных остаточных напряжений ($\sigma_{ост}$) и проведены испытания эксплуатационных свойств (жаростойкость).

Третья глава содержит данные по оценке ряда основных параметров качества поверхностного слоя на основании нормативных требований к выбранной детали. Определяющими параметром для достижения необходимого состояния поверхностного слоя при обработке как высокоинтенсивными (при использовании установки «ГЕЗА-ММП»), так и низкоинтенсивными

импульсными электронными пучками (при использовании установки «РИТМ-СП»), является плотность энергии в импульсе (W).

Руководствуясь требованиями нормативной документации на деталь, основное внимание уделялось прежде всего получению требуемой шероховатости. Поэтому первоначально внимание и отбор режимов был сфокусирован именно на данном параметре. Это также определило выбор установки для облучения и режимы.

Результаты замера шероховатости приведены в таблице 1. Сравнения проводились в сравнении со значением исходной шероховатости равной $R_a = 5,8$ мкм.

Таблица 1 – Влияние режимов облучения на установке «РИТМ-СП» уровень на шероховатость поверхности

№ образца	Режимы облучения		Шероховатость R_a , мкм
	W , Дж/см ²	n , имп.	
1.1	$7,1 \pm 1,5$	60	3,3
1.2	$4,8 \pm 1$	60	3,9
1.3	$6,2 \pm 1,2$	30	5,7
1.4	$4,8 \pm 1$	30	3,9
1.5	$3,9 \pm 0,9$	30	4,5
1.6	$3,1 \pm 0,8$	30	4,9
2.1	$6,2 \pm 1,2$	20	5,8
2.2	$7,1 \pm 1,5$	20	4,6
2.4	$7,1 \pm 1,5$	30	4,4
2.5	$6,2 \pm 1,2$	45	4,1
2.6	$7,1 \pm 1,5$	45	3,7
Исходный			5,8

Из табличных данных видно, что наиболее интенсивно происходит снижение шероховатости при плотности энергии $\approx 7,1 \pm 1,5$ Дж/см², причем хорошо просматривается зависимость уровня снижения шероховатости от числа импульсов. Менее интенсивно идет процесс формирования необходимого рельефа поверхности при плотности энергии $\approx 6,2 \pm 1,2$ Дж/см². При равных значениях импульсов ($n=45$) качество поверхностного слоя у образца 2.6 выше, чем у образца 2.5. Следует также отметить, что при сравнении результатов замера шероховатости у образца 1.4 (режим облучения: $W=4,8 \pm 1$ Дж/см², $n=30$) наблюдается достаточно хорошая динамика снижения шероховатости, но при увеличении числа импульсов до $n=60$ дальнейшего снижения значений шероховатости не происходит. Скорее всего это связано с невозможностью при данном режиме облучения, а именно значениях плотности энергии, более интенсивно происходить процессам плавления и испарения, за счет которых, собственно, и происходит снижение шероховатости и модифицирование поверхностного слоя.

Подытоживая анализ табличных данных можно сделать следующий предварительный вывод, что наименьшая шероховатость достигается при облучении на установке «РИТМ-СП» по режиму $W=7,1 \pm 1,5$ Дж/см² при числе импульсов равном 60 ($R_a = 3,3$ мкм). Следующими предпочтительным режимом

может стать режим $W=7,1\pm 1$ Дж/см² при числе импульсов равном 45 ($R_a = 3,7$ мкм).

Однако при выборе режима облучения необходимо также руководствоваться и другими критериями. В качестве этих критериев были выбраны физико-химическое состояние поверхностного слоя, а именно микротвёрдость и структурно-фазовое состояние. Результаты замеров микротвёрдости показаны в таблице 2.

Таблица 2 – Влияние режимов облучения на микротвердость образцов, облученных на установках «РИТМ-СП» при нагрузке P=20 г.

№ образца	Облученный слой			Основной материал кгс/мм ²
	Середина кгс/мм ²	Край 1 кгс/мм ²	Край 2 кгс/мм ²	
1.1	376; 356; 356	376; 376; 356	356; 402; 402	356; 376; 356
1.2	376; 402; 402	402; 376; 376	426; 446; 426	402; 376; 376
1.3	446; 446; 426	446; 426; 402	402; 426; 402	376; 402; 402
1.4	376; 402; 402	446; 426; 426	402; 376; 402	356; 376; 376
1.5	446; 426; 426	446; 426; 426	446; 446; 426	356; 376; 356
1.6	446; 426; 446	446; 426; 426	402; 376; 402	356; 376; 356
2.1	376; 356; 356	376; 376; 356	336; 402; 402	356; 376; 356
2.2	376; 402; 402	402; 376; 376	426; 446; 426	402; 376; 376
2.3	446; 446; 426	446; 426; 402	402; 426; 402	376; 402; 402
2.4	376; 402; 402	446; 426; 426	402; 376; 402	356; 376; 376
2.5	446; 426; 426	446; 426; 426	446; 446; 426	356; 376; 356
2.6	446; 426; 446	446; 426; 426	402; 376; 402	356; 376; 356

Анализируя полученные результаты исследования микротвёрдости можно сделать следующий вывод: микротвердость поверхностного слоя в средней части образцов несколько выше, чем по краям (ближе к резу на полуцилиндры). Наиболее равномерные значения микротвердости по поверхности всего образца были получены на образце 2.5, облучённого по режиму: $W= 6,2 \pm 1,2$ Дж/см², n = 45. Микротвердость образца 1.1 имеет такие же значения, что и микротвердость основного материала, а микротвердость поверхностного слоя образца 2.6 на 21% выше, чем основного металла (сердцевины), что приводит к неоднозначному выводу по влиянию режима облучения на поверхностный слой данных образцов. Результаты топографии поверхности образцов 1.1. и 2.6 представлены на рисунке 4.

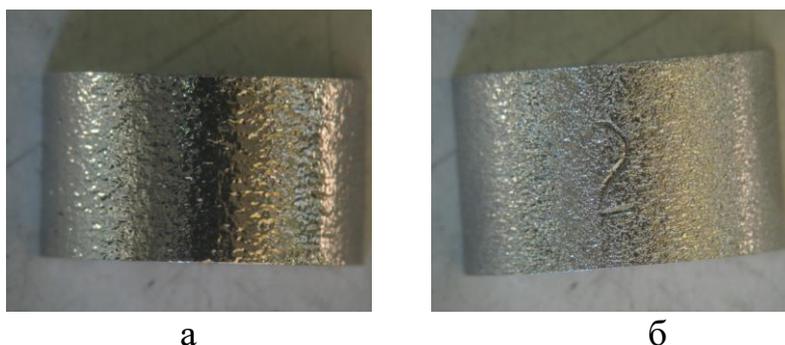


Рисунок 4 – топография образцов, х4: а) образец 1.1 (режим облучения $\approx 7,1\pm 1,5$ Дж/см², n=60); б) образец 2.6 (режим облучения $\approx 7,1\pm 1,5$ Дж/см², n=45)

Топографическое исследование показало, что на поверхности образца 1.1 имеется незначительное количество кратеров типа многокольцевые круглые с выпуклостью внутри, что является дефектом технологического процесса облучения с помощью низкоинтенсивных импульсных электронных пучков, но не критичным поскольку редко выступает в качестве очага эксплуатационного разрушения, однако при более детальном исследовании было установлено наличие трещин в центральной части кратера, что является недопустимым дефектом (рисунок 5).



а

б

в

Рисунок 5 – Топография поверхности образца 1.1 (режим облучения $\approx 7,1 \pm 1,5$ Дж/см², n=60): а), б) наличие кратеров типа многокольцевые круглые с выпуклостью внутри x50; в) наличие трещины в центральной части кратера, x100

Следовательно, от данного режима следует отказаться в пользу режима образца 2.6, так как при исследовании топографии у данного образца кратеров не обнаружено.

Вторым этапом при выборе режима облучения стало изучение структурно-фазового состояния поверхностного слоя. При исследовании поверхностного слоя образцов, выбранных на основании результатов замера шероховатости, методом оптической микроскопии было установлено, что на поверхности образцов наблюдается измененный слой, среднее значение представлено в таблице 3.

Таблица 3 – Глубина измененного слоя в зависимости от режима облучения на установке «РИТМ-СП»

№ образца	Режимы облучения		Размер измененного слоя, мкм
	W, Дж/см ²	n, имп	
1.3	$\approx 6,2 \pm 1,2$	30	5,5
2.1	$\approx 6.2 \pm 1.2$	20	4,6
2.2	$\approx 7.1 \pm 1.5$	20	5,1
2.4	$\approx 7.1 \pm 1.5$	30	5,7
2.5	$\approx 6.2 \pm 1.2$	45	6,5
2.6	$\approx 7.1 \pm 1.5$	45	6,7

Результаты рентгено-спектрального анализа (таблица 4) показали, что после облучения в зоне модифицирования происходит перераспределение таких элементов, как Si, C, Fe, Co и Mo в той или иной степени, причем перераспределение элементов начинается уже при плотности энергии $W=3,1 \pm 0,8$ Дж/см². Как известно, что Mo является сильным карбидообразующим элементом,

который уменьшает пористость, а его наличие обеспечивает повышение прочности за счет твердорастворного упрочнения, и повышение в поверхностном слое кремния позволяет повысить жаростойкость сплавов системы Co-Cr-Mo. Данные, полученные в результате исследования, подтверждаются данными замера микротвердости.

Таблица 4 – Результаты рентгеноспектрального анализа образца 1.6 ($W=3,1\pm 0,8$ Дж/см², $n=30$ импульсов)

Спектр	C	Si	Cr	Mn	Fe	Co	Mo	Итог
Спектр1	8,37	0,87	19,44	0,32	3,86	59,75	7,39	100
Спектр2	16,93	0,72	21,44	0,32	1,60	54,71	5,43	100
Спектр3	18,00	0,64	23,46	0,32	0,32	51,69	5,27	100
Спектр4	5.30	0.46	26.69	0.32	0,56	60,42	5,84	100

Наилучший результат по заявленным требованиям при облучении на установке «РИТС-СП» показал режим облучения образца 2.6 ($W\approx 7,1\pm 1,5$ Дж/см², $n=45$), который был выбран в качестве базового режима. С помощью методик, описанных в главе 2, были выбраны режимы для облучения на опытно-промышленной установке «ГЕЗА-ММП», которые представлены в таблице 5.

Таблица 5 – Режимы облучения образцов и шероховатость из порошкового сплава КХ28М6 на опытно-промышленной установке «ГЕЗА-ММП»

№ образца	Режимы облучения		Шероховатость Ra, мкм
	W, Дж/см ²	n, имп	
1.7	27	3	2,0
1.8	30	3	2,4
1.9	35	3	2,1
1.10	27	6	1.8
1.11	30	6	1,7
1.12	35	6	1,6
Исходный			5,8

Минимальное значение шероховатости после облучения на установке «ГЕЗА-ММП» получено при плотности энергии $W=35$ Дж/см². Использованное число импульсов $n=6$.

Таблица 6 – Влияние режимов облучения на микротвердость образцов и глубину модифицированного слоя образцов после обработки с помощью СИЭП на установке ГЕЗА-ММП при нагрузке $P=20$ г.

№ образца	Режимы облучения	Толщина измененного слоя, мкм	Микротвердость, кгс/мм ²	
	W, Дж/см ² – n		Облученный слой	Основной материал
1.7	27 – 3 имп	18,1	460	378
1.8	30 - 3 имп	20,2	489	362
1.9	35 - 3 имп	23,5	501	356
1.10	27 -6 имп	26,8	406	369
1.11	30 - 6 имп	28,9	435	362
1.12	35 - 6 имп	44,5	422	362

По результатам замера микротвёрдости можно сделать следующий вывод: микротвёрдость поверхностного слоя в границах модифицированного слоя выше, чем у основного материала. Аналогичная зависимость наблюдалась у образцов, облученных на установке «РИТМ-СП». Наиболее высокое значение микротвёрдости по поверхности образца были получены на образце 1.9, облучённого по режиму: $W = 35 \text{ Дж/см}^2$, $n = 3$.

Результаты замера модифицированного слоя, полученного при металлографическом анализе методом оптической микроскопии, показали, что наибольший размер был получен на образце 1.12, облученный по режиму 35 Дж/см^2 с числом импульсов $n=6$. Установлена зависимость увеличения глубины модифицированного с увеличением числа импульсов при равных значениях плотности энергии, причем чем выше плотность энергии, тем значительнее увеличение размера модифицированного слоя, а также с увеличением плотности энергии при равном числе импульсов наблюдается аналогичная зависимость для образцов, облученных на опытно промышленной установке «ГЕЗА-ММП».

Минимальная шероховатость и максимальный размер модифицированного слоя имеет образец 1.12 после облучения по режиму $W=35 \text{ Дж/см}^2$, с числом импульсов $n=6$. При облучении шестью импульсами строго прослеживается зависимость по снижению шероховатости у всех образцов, облученных данным количеством импульсов вне зависимости от плотности энергии. Показано, что при минимальном значении глубины модифицированного слоя наблюдаются структурные изменения в поверхностном и подповерхностных слоях облученных образцов, а именно происходит увеличение числа карбидов в модифицированном слое и переходной зоне наблюдаются участки структурной составляющей типа перлит. При этом также наблюдается, что число карбидов увеличивается с увеличением плотности энергии, а их распределение по границам зерен становится более равномерным, включая и переходную зону.

Как следует из полученных данных, обработка низкоинтенсивным импульсным электронным пучком при плотности энергии $W=6-7 \text{ Дж/см}^2$ на установке «РИТМ-СП» позволяет получить высокое качество поверхностного слоя, с шероховатостью со снижением по сравнению с исходной на 25-30 %.

При облучении при более низких плотностях энергии $4-5 \text{ Дж/см}^2$ происходит оплавление поверхности мишеней, но без испарения, о чем свидетельствует уровень шероховатости, наличие сглаженных следов треков или участков со следами треков.

Поскольку вопрос стоит в последующей разработке технологического процесса для серийного производства необходимо адаптировать полученные режимы для опытно-промышленной установки «ГЕЗА-ММП», причем выбирался диапазон плотности энергии, при котором проходят процессы плавления и испарения, а уровень шероховатости и качество поверхностного слоя должны отвечать требованиям конструкторской документации.

Кроме того, необходимо отметить хорошую корреляцию расчетных и экспериментальных данных по выбору режимов облучения, что свидетельствует о возможности использовать методику, описанную ранее для оптимизации процессов электронно-лучевой обработки деталей широкой номенклатуры из широкой линейки конструкционных металлических материалов.

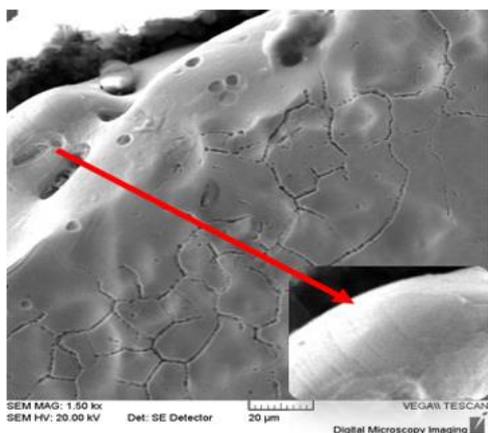


Рисунок 6 – Микроструктура образца 1.6 (угол края шлифа с захватом поверхности)

режиму $W=35$ Дж/см², с числом $n=3$.

При исследовании микроструктуры методом растровой электронной микроскопии образца 1.6 ($W=3,1 \pm 0,8$ Дж/см², $n=30$ импульсов) было установлено следующее: на снимке видно, что имеется зона влияния облучения на поверхность образца в виде оплавленного участка, расположенного по всей окружности образца. Однако, как видно из рисунка 6, следы треков построения еще просматриваются, что нельзя сказать об образцах, облученных при более высоких плотностях энергии, а именно $W=4,8 \pm 1$ Дж/см² и выше, т.е. результаты РЭМ показывают, что при данном режиме происходит только процесс плавления.

В четвертой главе установлено влияние выбранного режима облучения с помощью СИЭП на топографию и качество поверхности, микроструктуру и уровень остаточных напряжений при изготовлении деталей из порошкового сплава КХ28М6 для перспективных ГТД. Для этой цели были изготовлены цилиндрические образцы диаметром 20 мм на установке Concept Laser M2 Cusing по технологии АО «ЦАТ», используя два метода стратегии сканирования: островковую диагональную и зигзагообразную (рисунок 7).



Рисунок 7 – Внешний вид образцов а) с островковой диагональной штриховкой, б) с зигзагообразной штриховкой

Полученные образцы №1, №2 с островковой диагональной штриховкой (образцы серии 1) и образец № 3 с зигзагообразной штриховкой (образец серии 2) были облучены на установке «ГЕЗА-ММП» по выбранному режиму $W=35$ Дж/см², $n=3$ импульса.

После облучения был проведён замер шероховатости образцов, которая соответствовала заявленному уровню $R_a = 2,1$ мкм.

При исследовании поверхности образцов установлено, что у образцов серии 1 имеются круглые многокольцевые, круглые с выпуклостью в центре, а у образца серии 2 - круглые с вогнутостью в центре кратеры. Также следует заметить, что у образца серии 2 число кратеров – незначительное, по сравнению с образцом серии 1. Поскольку материал, шероховатость и режим облучения у образцов были одинаковые, то на число и тип кратеров влияет выбранная стратегия сканирования. Полученные в результате облучения кратеры на поверхности образцов относятся к так называемым неопасным видам кратеров и не влияют на усталостную прочность и коррозионную стойкость.

Микроструктура образцов в поверхностной зоне в границах модифицированного слоя имеют отличную от основного материала структуру (рисунок 8-а), а также хорошо просматриваются изменения: большое число карбидов (рисунок 8-б). Ранее наблюдавшаяся разнотернистость твёрдого раствора сохранилась в границах до 80 мкм. Однако в этой зоне также наблюдается рост числа карбидов.

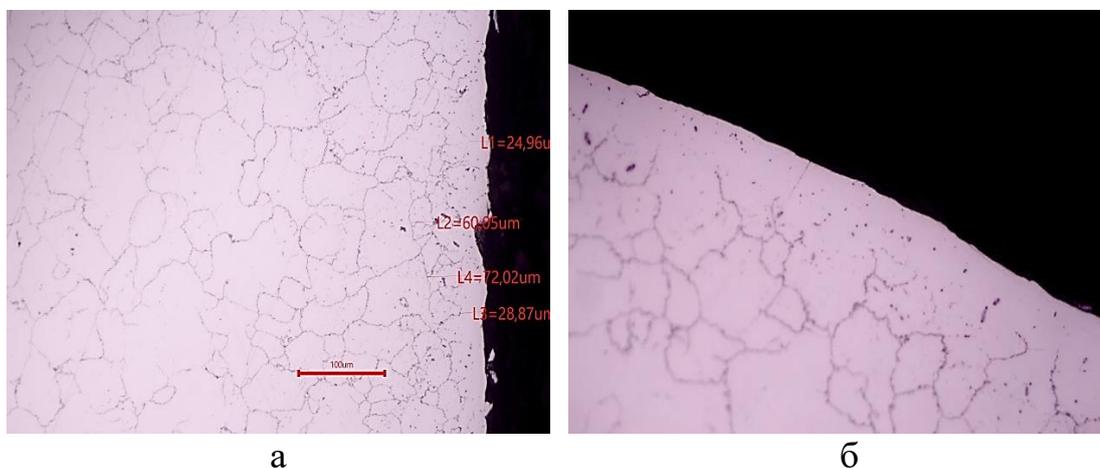


Рисунок 8 – Микроструктура при увеличении $\times 500$: а) образца 1 после облучения; б) образца 2 после облучения

После облучения, по режиму $W=35$ дж/см², $n=3$ импульса происходит формирование модифицированного слоя глубиной 28-30 мкм, в поверхностном слое происходит перераспределение таких легирующих элементов как кремний, железо и молибден, что приводит к образованию карбидов как непосредственно в модифицированном слое, так и в переходной зоне. Однако по мере удаления их число снижается. Эта зона имеет глубину до 50 мкм (без учета модифицированной зоны).

Кроме того, в границах изменённого поверхностного слоя обнаружены участки с гексагональной фазой, которая, как известно, приводит к упрочнению, но снижает пластичность. Различий в структурно-фазовом состоянии поверхностного слоя исследуемых образцов после облучения СИЭП в зависимости от стратегии сканирования не выявлено, за исключением процесса кратерообразования.

Исследование напряженного состояния поверхностного слоя после облучения с помощью СИЭП по режиму 35 дж/см² тремя импульсами по всей цилиндрической поверхности на опытно-промышленном ускорителе «ГЕЗА-ММП» дало возможность установить взаимосвязь между технологическими параметрами процесса электронно-пучковой обработки и характером

формирующихся остаточных поверхностных напряжений. Для сравнения также был установлен уровень остаточных поверхностных напряжений в исходном состоянии. Результаты испытания образцов серии 1 и 2 продемонстрированы на рисунках 9 и 10. Как видно из графиков образцы серии 1 и 2 в исходном состоянии имеют достаточно высокий уровень поверхностных растягивающих остаточных напряжений, что свойственно для образцов и деталей, полученных методом СЛС. При этом уровень остаточных напряжений с зигзагообразной стратегией сканирования (образец серии 2) до облучения выше, чем у образца с островковой диагональной стратегией сканирования (образец серии 1) на 26%.

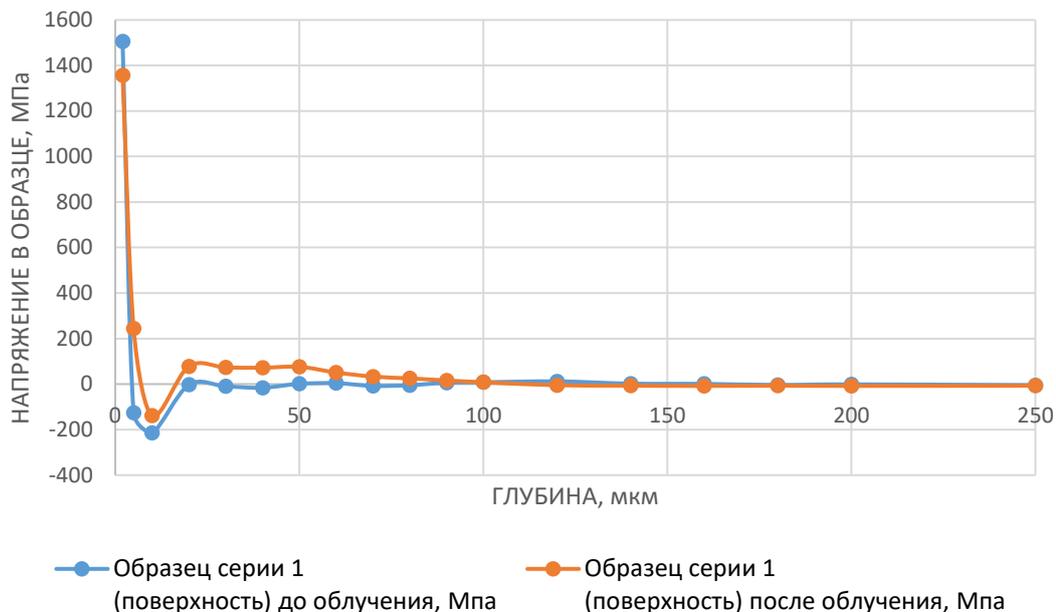


Рисунок 9 – Поверхностные напряжения в образце серии 1 до и после облучения

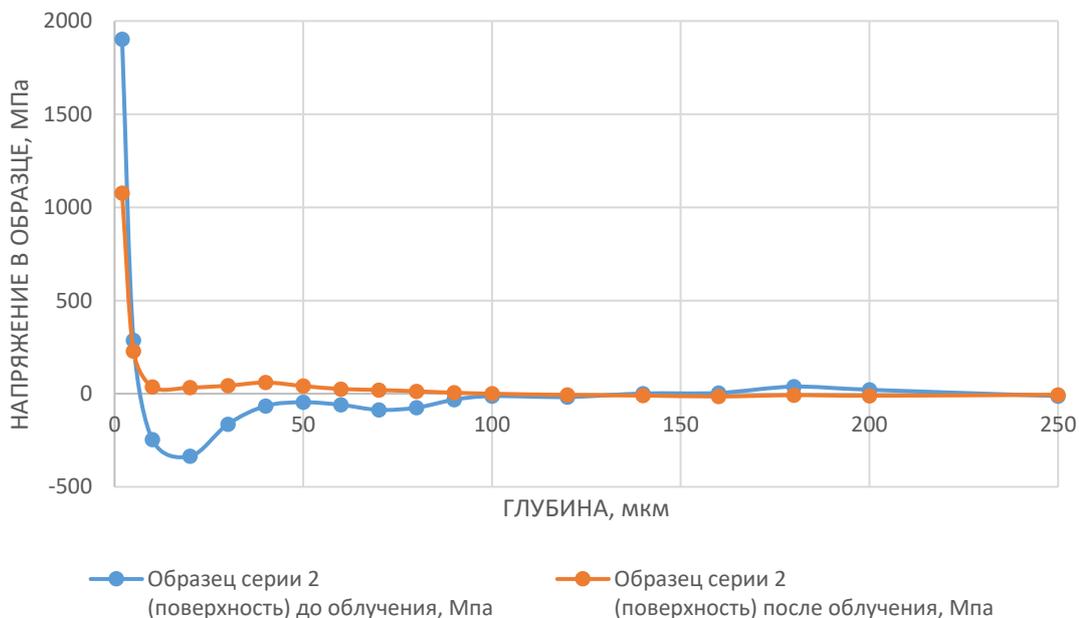


Рисунок 10 – Поверхностные напряжения в образце серии 2 до и после облучения

Анализ эпюр распределения остаточных поверхностных напряжений по глубине залегания остаточных напряжений образцов серии 1 и 2, подвергнутых облучению показал снижение уровня остаточных растягивающих напряжений,

причем для образца серии 1 снижение составило - 10%, для образца серии 2 - 46%. Это связано с процессами, как релаксации напряжений в начальной стадии облучения (период нагрева поверхности), так и с изменением структурно-фазового состава поверхностных и подповерхностных слоев мишеней. Следует также отметить, что глубина распространения остаточных напряжений одинакова для обеих серий образцов 1 и 2 и равна ~ 80 мкм.

В данной работе также были проведены два метода оценки жаростойкости по удельному приросту массы и глубине коррозионных повреждений.

Образцы из кобальтохромового сплава КХ28М6 испытывались до и после высокоинтенсивного облучения с помощью импульсных электронных пучков (таблица 7). Режимы облучения выбраны с учётом ранее полученных результатов исследований структурно-фазового и физико-химического состояния поверхностных и подповерхностных слоёв. Каждый из предлагаемых режимов представляет собой: для образцов серии 1.1 - быстрый нагрев; для образцов серии 1.2 - быстрый нагрев, плавление и активный процесс испарения; для образцов серии 1.3 - быстрый нагрев и плавление, а также испарение.

Последний режим выбран в качестве режима обработки поверхностного слоя деталей как технологический. В качестве исходного состояния материала выбраны образцы серии 1.

Таблица 7 – Режимы облучения для проведения жаростойких испытаний

№ серии образцов	Материал	Режим облучения	
		Число импульсов, n	Плотность энергии W, Дж/см ²
1.0	Сплав КХ28М6	Без обработки	
1.1	Сплав КХ28М6	4	25
1.2	Сплав КХ28М6	4	40
1.3	Сплав КХ28М6	3	35

Анализ графика зависимости удельного прироста массы от времени выдержки образцов из сплава КХ28М6 (рисунок 11) показал, что образцы серий 1.2 и 1.3 имеют показатели жаростойкости, выше, чем у исходного материала на 25%, причем у образцов серии 1.2 параметры жаростойкости выше. Следовательно, при облучении в диапазоне плотностей энергии, при которых происходят такие процессы, как нагрев, испарение и происходит повышение жаростойкости. При меньшей плотности энергии удельный привес массы образцов также ниже, чем у образца в исходном состоянии, несмотря на то что при режиме облучения образцов серии 1.2 процессы, инициирующие модификацию поверхностного слоя, проходят не столь интенсивно.

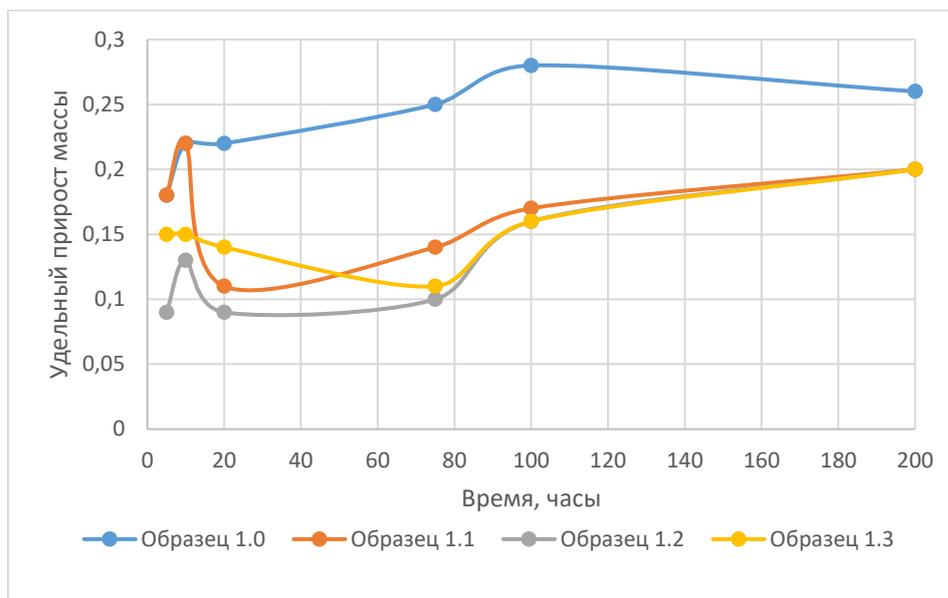


Рисунок 11 – График зависимости удельного прироста массы от времени выдержки для сплава КХ28М6

Испытание на жаростойкость методом непосредственного измерения глубины коррозии показали значительный рост жаростойкости после облучения (рисунок 12), что подтверждается результатами металлографического анализа (рисунок 13).

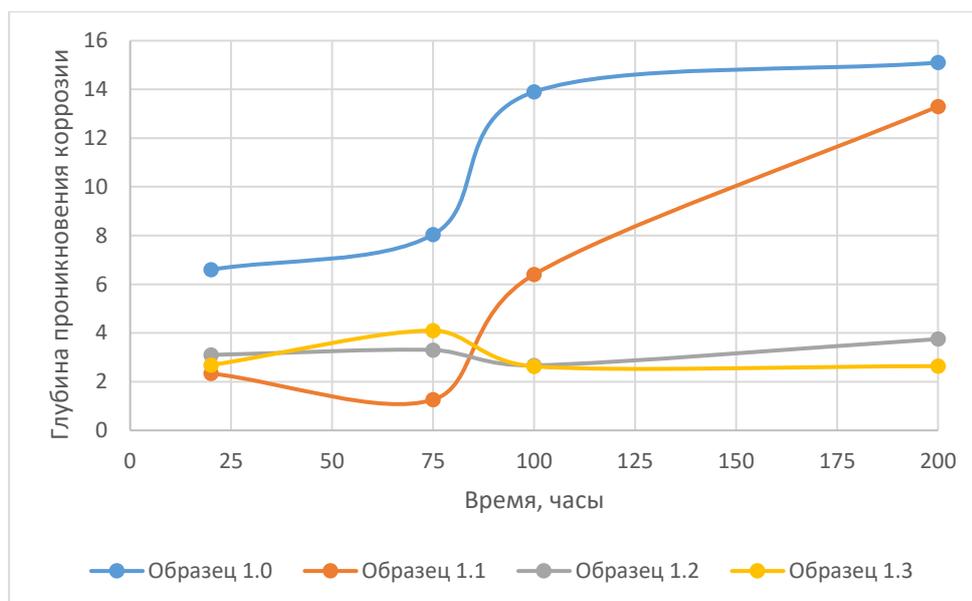


Рисунок 12 – График зависимости глубины проникновения коррозии от времени выдержки для КХ28М6

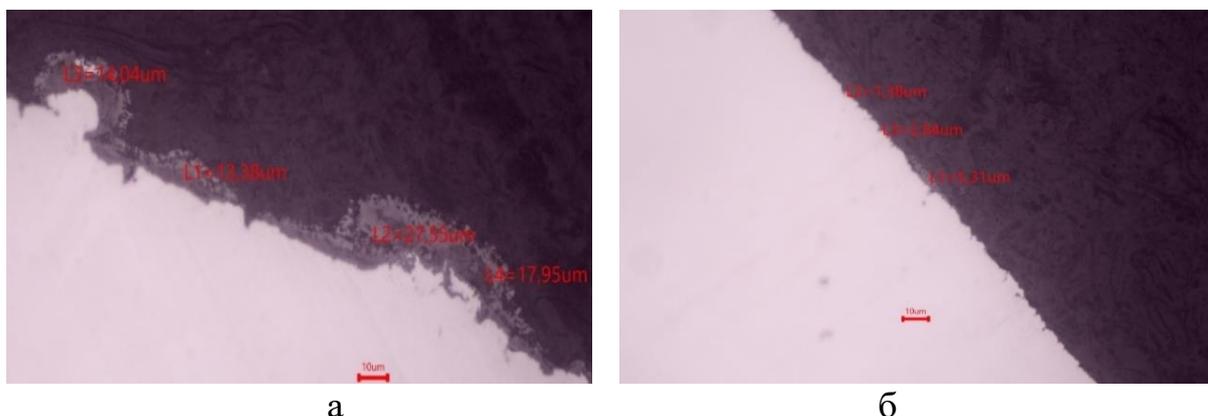


Рисунок 13 – Микроструктура поверхностного слоя (увеличение x200):
 а) образец серии 1.1 после выдержки 100 часов; б) образец серии 1.3 после выдержки 200 часов

В пятой главе показано, что данные, полученные экспериментальным путем, дали возможность сформулировать технологическую рекомендацию по повышению качества поверхностного слоя с помощью интенсивных импульсных электронных пучков в текущем производстве и для инновационных проектов. В работе были впервые использованы две установки для повышения качества поверхностного слоя и модификации поверхности образцов из порошкового сплава КХ28М6 с целью повышения эксплуатационных свойств: интегрированная установка «РИТМ-СП» и опытно-промышленная установка «ГЕЗА-ММП». Полученная глубина модифицированного слоя при облучении на установке «РИТМ-СП», а также параметры рабочей зоны установки и диаметра пучка ограничивают ее использование по геометрическим параметрам детали. Следовательно, наиболее подходящими деталями для последующей обработки на установке «РИТМ-СП» с помощью ИЭП являются малоразмерные детали, с невысокими требованиями по шероховатости. Кроме того, существует возможность оснастить рабочую камеру роботизированной рукой для модификации внутренних поверхностей деталей (как пример, посадочные места под подшипник).

Рассмотренные режимы облучения на опытно-промышленной установке «ГЕЗА-ММП» позволяют получить возможность варьировать значениями шероховатости в зависимости от требований нормативной документации. На основании проведенных исследований разработаны режимы облучения с помощью СИЭП, позволяющих достичь шероховатости в диапазоне Ra2,5...1,6 для технологического процесса облучения в качестве постобработки деталей из сплава КХ28М6, который характеризует шероховатость большинства деталей перспективных ГТД.

Установка «ГЕЗА-ММП» позволяет за один раз обрабатывать до 40 сложно профильных деталей, высота которых не превышает 25 сантиметров, что однозначно является большим преимуществом по сравнению с другими видами обработки, гарантируя заданные характеристики поверхностного слоя детали, и позволяет повысить жаростойкость. Предлагаемое технологическое решение позволит не только решить вопрос с постобработкой деталей, полученных методом СЛС из трудно деформируемого сплава КХ28М6, но одновременно получить на поверхности детали модифицированный слой, обладающий более

высокими эксплуатационными свойствами. Следовательно, результаты представляют практический интерес и могут быть использованы в качестве технологической рекомендации для постобработки деталей современных и перспективных ГТД, а также для повышения эксплуатационных свойств узлов и деталей ответственного назначения, изготавливаемых из Co-Cr-Mo сплавов. Это дало возможность сформулировать технологическую рекомендацию по повышению качества поверхностного слоя с помощью интенсивных импульсных электронных пучков в текущем производстве и для инновационных проектов, что подтверждается актом об использовании результатов исследования в АО «ММП имени В.В. Чернышева»

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения данной диссертационной работы удалось достичь цели и решить ряд поставленных задачи, а именно:

1. Разработана методика выбора режимов облучения с помощью как низкоинтенсивных, так и высокоинтенсивных импульсных электронных пучков для постобработки поверхности деталей ГТД из современных порошковых жаропрочных сплавов;

2. Разработана методика исследования физико-химического и структурно-фазового состояний поверхностного слоя образцов и деталей горячей части современных ГТД из порошкового жаропрочного сплава на основе комплексного исследования с помощью металлофизических методов;

3. Проведено комплексное исследование влияния параметров облучения на качество и структурно-фазовое состояние поверхностного слоя образцов-свидетелей ответственных деталей двигателей современных летательных аппаратов из порошкового сплава системы Co-Cr-Mo, что позволило получить следующие новые результаты:

3.1. Установлено, что с помощью облучения ИЭП удается модифицировать поверхность толщиной до 5 мкм при облучении на «РИТМ-СП» и до 40 мкм при облучении на «ГЕЗА-ММП»;

3.2. Установлено, что, используя обработку с помощью ИЭП, удается снизить шероховатость поверхности облучения на «ГЕЗА-ММП» примерно в 3 раза, и на «РИТМ-СП» в 1,5 раза;

3.3. Установлено, что в поверхностном слое происходит перераспределение таких легирующих элементов как кремний, железо и молибден, что приводит к образованию карбидов как непосредственно в модифицированном слое, так и в переходной зоне, глубиной до 50 мкм, и по мере удаления их число снижается, а также определено, что в границах изменённого поверхностного слоя обнаружены участки с гексагональной фазой, что приводит к упрочнению, но снижает пластичность;

3.4. Установлено, что уровень остаточных поверхностных растягивающих напряжений после облучения образцов снижается, причем для образца с островковой стратегией сканирования снижение составило - 10%, для образца с зигзагообразной стратегией сканирования - 46%, а также установлено, что зона изменения уровня остаточных напряжений равна ~ 80 мкм вне зависимости от стратегии сканирования;

3.5. Установлено, что при облучении образцов из порошкового сплава КХ28М6 при плотностях энергии 35 и 40 Дж/см² жаростойкость увеличивается на 25%, а при облучении жаропрочных порошковых сплавов в режиме абляции происходит снижение жаростойкости.

4. Показано, что сильноточный импульсный электронный пучок микросекундной длительности позволяет значительно снизить трудоемкость обработки деталей и является высокоэффективным инструментом для модифицирования поверхности сплавов, полученных методом аддитивных технологий из порошка кобальт-хрома.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК и изданиях, приравненных к ним:

1. Ериков К.М., Быщенко О.А. Оценка возможности использования технологии облучения сильноточными импульсами электронными пучками для улучшения характеристик поверхностного слоя кобальт-хромовых образцов, полученных методом аддитивных технологий // Насосы. Турбины. Системы. 2024. № 3 (52). С. 139-146.

2. Ериков К.М., Быщенко О.А. Модификация при облучении импульсными электронными пучками поверхности CoCrMo-образцов деталей ГТД, полученных с помощью аддитивных технологий // Вестник Московского авиационного института. 2024. Т. 31. №3. С. 43-50.

Другие публикации:

1. Bytzenko O., Steshenko I., Panov V., Erikov K., Markov A. Surface topography of samples obtained using additive technologies from metal powders after irradiation with high-current electron beams // Proceedings - 2020 7th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects. 2020. P. 788–791. DOI:10.1109/EFRE47760.2020.9242013

2. Dzhafarov E.E., Erikov K.M., Bytsenko O.A., Ionov A.V. Investigation of the Effect of Electron-Beam Processing on the Surface of Samples Obtained by Additive Technologies from Cobalt-Chromium and Stainless Steel Powders // Lecture Notes in Electrical Engineering. 2021. V. 680. P. 91-99. DOI:10.1007/978-981-33-6060-0_7

3. Dzhafarov E.E., Erikov K.M., Bytsenko O.A. A study of the effect of electron-beam processing on the surface of samples obtained by additive technologies from cobalt-chromium powder // Journal of Physics: Conference Series. 2021. V. 1891 (1). DOI: 10.1088/1742-6596/1891/1/012049

4. Erikov K.M., Dzhafarov E.E., Bytsenko O.A. Influence of technological factors on porosity in the mass production of inlet guide vanes using additive technologies // Journal of Physics: Conference Series. 2021. V. 1891 (1). DOI: 10.1088/1742-6596/1891/1/012057

5. Быщенко О.А., Стешенко И.Г., Стрижевская Н.О., Ериков К.М. Взаимосвязь пористости и параметров селективного лазерного сплавления в синтезированном материале деталей из нержавеющей стали CL20ES // Научно-техническая конференция «Климовские чтения - 2020: перспективные направления развития авиадвигателестроения»: сборник статей научно-

технической конференции (г. Санкт-Петербург, июнь 2020 г.). — СПб.: Скифия-принт, 2020. С. 144-155.

6. Панов С.В., Джафаров Э.Э., Ериков К.М. Использование технологии облучения сильноточными импульсами электронных пучков (СИЭП) как инструмента для постобработки деталей, полученных методом SLM из сплавов систем Co-Cr и Al-Si-Mg // Сборник аннотаций конкурсных работ XV Всероссийского межотраслевого молодёжного конкурса научно-технических работ и проектов «Молодёжь и будущее авиации и космонавтики». (г. Москва, МАИ (НИУ), ноябрь 2023 г.). — М. Издательство Перо, 2023. С. 56-57.

7. Быценко О.А., Стешенко И.Г., Ериков К.М. Исследование поверхностных слоев образцов из стали CL20ES, полученных методом SLM, после облучения с помощью сильноточных импульсных электронных пучков // Сборник докладов XI Международной юбилейной научно-технической конференции «Проблемы совершенствования робототехнических и интеллектуальных систем летательных аппаратов» (г. Москва, МАИ (НИУ), декабрь 2020 г.) — М. ООО «Эдитус», 2021. С. 267-270.