

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Школа Инженерная школа новых производственных технологий
 Направление подготовки Материаловедение и технологии материалов
 Отделение школы (НОЦ) Отделение материаловедения

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Тема работы
Микроструктура и механические свойства образцов из титанового сплава Ti-6Al-4V, полученных методом аддитивных технологий

УДК 669.295.5:620.18

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
154Б62	Сяо Яньсинь		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Панина А.А.	к.ф-м.н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ШБИП	Кашук И.В.	к.т.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ШБИП	Сечин А.И.	д.т.н		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
22.03.01 Материаловедение и технологии материалов	Овечкин Б.Б.	к.т.н., доцент		

Томск – 2020 г.

Планируемые результаты обучения по ООП 22.03.01

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)
P1	Применять основные положения и методы гуманитарных наук при решении социально-общественных и профессиональных задач в области материаловедения и технологии материалов
P2	Использовать современное информационное пространство при решении профессиональных задач в области материаловедения и технологии материалов
P3	Разрабатывать, оформлять и использовать техническую документацию, включая нормативные документы по вопросам интеллектуальной собственности в области материаловедения и технологии материалов
P4	Проводить элементарный экономический анализ ресурсов, технологий и производств при решении профессиональных задач в области материаловедения и технологии материалов
P5	Эффективно работать в коллективе на основе принципов толерантности, использовать устную и письменную коммуникации на родном и иностранном языках в мультикультурной среде.
P6	Эффективно выполнять трудовые функции по реализации высокотехнологичных производств материалов и изделий
P7	Проводить комплексную диагностику материалов, процессов и изделий с использованием технических средств измерений, испытательного и производственного оборудования
P8	Готовность к мотивированному саморазвитию, самоорганизации и обучению для обеспечения полноценной социальной и профессиональной деятельности в области материаловедения и технологии материалов
P9	Успешно использовать методы и приемы организации труда, обеспечивающие эффективное, экологически, социально и технически безопасное производство
P10	Использовать принципы производственного менеджмента и управления персоналом в производственной деятельности в области материаловедения и технологии материалов

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Школа Инженерная школа новых производственных технологий

Направление подготовки (специальность) Материаловедение и технологии материалов

Отделение школы (НОЦ) Отделение материаловедения

УТВЕРЖДАЮ:
Руководитель ООП

(Подпись) _____ Б.Б. Овечкин
(Дата)

ЗАДАНИЕ

на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Бакалаврской работы

(бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)

Студенту:

Группа	ФИО
154Б62	Сяо Яньсинь

Тема работы:

Микроструктура и механические свойства образцов из титанового сплава Ti-6Al-4V, полученных методом аддитивных технологий

Утверждена приказом директора ИШНПТ

Приказ № 59-87/с от 28.02.220

Срок сдачи студентом выполненной работы:

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе

*(наименование объекта исследования или проектирования;
производительность или нагрузка; режим работы
(непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья
или материал изделия; требования к продукту, изделию или
процессу; особые требования к особенностям
функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в
плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую
среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.)*

Образцы титанового сплава Ti-6Al-4V (5.95 Al, 4.37 V, 0.02 Si, 89.66 вес. % Ti), полученные методом аддитивных технологий.

Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов <i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i>	– Литературный обзор; – Экспериментальная часть; – Социальная ответственность; – Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.
Перечень графического материала <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i>	Презентация ВКР в Power Point

Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы <i>(с указанием разделов)</i>	
Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент	Кацук Ирина Вадимовна, Доцент ШБИП и Отделение социально-гуманитарных наук
Социальная ответственность	Сечин Александр Иванович, Профессор ООД ШБИП

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	
---	--

Задание выдал руководитель / консультант (при наличии):

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Панина А.А.	к.ф-м.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
154Б62	Сяо Яньсинь		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ
И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

Группа	ФИО
154Б62	Сяо Яньсинь

Школа	ИШНПТ	Отделение (НОЦ)	ОМ
Уровень образования	Бакалавриат	Направление/специальность	22.03.02

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:

1. <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	Стоимость материальных ресурсов и специального оборудования определены в соответствии с рыночными ценами г. Томска Тарифные ставки исполнителей определены штатным расписанием НИ ТПУ
2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	Норма амортизационных отчислений на специальное оборудование
3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	Отчисления во внебюджетные фонды 30 %

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. <i>Анализ конкурентных технических решений (НИ)</i>	Расчет конкурентоспособности SWOT-анализ
2. <i>Формирование плана и графика разработки и внедрения (НИ)</i>	Структура работ. Определение трудоемкости. Разработка графика проведения исследования
3. <i>Составление бюджета инженерного проекта (НИ)</i>	Расчет бюджетной стоимости НИ
4. <i>Оценка ресурсной, финансовой, бюджетной эффективности (НИ)</i>	Расчет интегрального показателя ресурсоэффективности

Перечень графического материала

1. Оценка конкурентоспособности ИР
2. Матрица SWOT
3. Диаграмма Ганта
4. Основные показатели эффективности НИ

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	
--	--

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН	Кащук Ирина Вадимовна	К.Т.Н		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
154Б62	Сяо Яньсинь		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Группа	ФИО
154Б62	Сяо Яньсинь

Школа	ИШНПТ	Отделение (НОЦ)	ОМ
Уровень образования	Бакалавриат	Направление/специальность	22.03.02 Материаловедение и технологии материалов

Тема ВКР:

Микроструктура и механические свойства образцов из титанового сплава Ti-6Al-4V, полученных методом аддитивных технологий	
Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:	
1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	Объект: титановый сплав Ti-6Al-4V Область применения: космос
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности: — специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; — организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.	Трудовой кодекс Российской Федерации ГОСТ 12.2.032-78. ССБТ ГОСТ 12.2.033-78 ССБТ
2. Производственная безопасность: 2.1. Анализ выявленных вредных и опасных факторов 2.2. Обоснование мероприятий по снижению воздействия	1. Превышение уровня шума. 2. Отклонение показателей микроклимата. 3. Повышенное значение напряжения в электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело человека. 3. Недостаточная освещенность рабочей зоны. 5. Чрезмерное загрязнение воздушной среды в зоне дыхания
3. Экологическая безопасность:	Анализ воздействия объекта на атмосферу (выбросы). Анализ воздействия объекта на гидросферу (сбросы). Анализ воздействия объекта на литосферу (отходы).
4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:	Пожар в лаборатории

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ООД ШБИП	Сечин А.И.	д.т.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
154Б62	Сяо Яньсинь		

КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН
выполнения выпускной квалификационной работы

Срок сдачи студентом выполненной работы:	
--	--

Дата текущего контроля*	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
20.04.2020	Социальная ответственность	15
23.04.2020	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	15
03.05.2020	Литературный обзор	15
05.05.2020	Методика эксперимента	15
22.05.2020	Результаты и обсуждение	40

Составил:

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Панина А.А.	к.ф-м.н.		

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 85 с., 21 рисунок, 23 таблицы, 39 источников, 0 приложений.

Ключевые слова: аддитивные технологии, произвольное электронно-лучевое плавление, титановый сплав Ti-6Al-4V, рентгено-фазовый состав, микроструктура, механические свойства.

Объектом исследования является титановый сплав Ti-6Al-4V (5.95 Al, 4.37 V, 0.02 Si, 89.66 вес. % Ti)

Цель работы – провести сравнительный анализ микроструктуры и механических характеристик образцов Ti-6Al-4V, полученных методами проката и аддитивных технологий.

В процессе исследования проводились: анализ микроструктуры образцов титанового сплава Ti-6Al-4V, полученных в результате проката либо использования методов электронно-лучевого плавления, оценка их фазового состава и механических характеристик.

В результате исследования было показано, что формирующаяся в результате произвольного электронно-лучевого плавления мартенситная микроструктура обеспечивает высокие прочностные характеристики исследуемых образцов, сопоставимые с эксплуатационными свойствами титанового сплава Ti-6Al-4V.

Степень внедрения: Результаты работы доложены и обсуждены на Молодежной школе, проводимой в рамках Международной конференции «X всероссийской научно-практической конференции «Научная инициатива иностранных студентов и аспирантов российских вузов» (22-24 апреля 2020 г, г. Томск).

Область применения: результаты работы могут быть использованы при оптимизации технологии изготовления титановых сплавов методом произвольного электронно-лучевого плавления.

Экономическая эффективность/значимость работы: сокращение времени производства и себестоимости изготовления деталей титанового сплава, используемого в областях авиакосмической промышленности, машиностроения и т.п.

В будущем планируется исследовать механическое поведение образцов титанового сплава Ti-6Al-4V, полученных методом произвольного электронно-лучевого плавления, при различных условиях нагружения.

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ.....	12
Глава 1. Литературный обзор.....	13
1.1 Рентгенофазовый анализ.....	13
1.1.1 Определение рентгеновских лучах.....	13
1.1.2 Устройство рентгеновские трубки.....	15
1.1.3 Устройство дифрактометра.....	17
1.1.4 Уравнение Брэгга–Вульфа и уравнение Лауэ.....	18
1.1.5 Качественный анализ.....	20
1.1.6 Количественный анализ.....	21
1.2 Способы аддитивных технологий	22
1.2.1 Селективное лазерное спекание.....	22
1.2.2 Селективное лазерное плавление.....	24
1.2.3 Электронно-лучевое плавление.....	26
1.2.4 Произвольное электронно-лучевое плавление.....	28
Глава 2 Материалы и методика эксперимента	31
Глава 3 Результаты эксперимента и их обсуждение.....	34
Глава 4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.....	42
Введение.....	42
4.1 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения.....	43

4.1.1 Анализ конкурентных технических решений.....	43
4.1.2 SWOT-анализ.....	44
4.2 Планирование научно-исследовательских работ.....	46
4.2.1 Структура работ в рамках научного исследования.....	46
4.2.2 Разработка графика проведения научного исследования.....	47
4.2.3 Бюджет научно-технического исследования.....	51
4.2.3.1 Расчет материальных затрат научно-технического исследования.....	51
4.2.3.2 Расчет амортизации специального оборудования.....	51
4.2.3.3 Основная заработная плата исполнителей тем.....	53
4.2.3.4 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления).....	55
4.2.3.5 Накладные расходы.....	56
4.3 Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования.....	57
Выводы по разделу.....	60
Глава 5. Социальная ответственность.....	62
5.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности.....	62
5.1.1 Специальные (характерные для рабочей зоны исследователя) правовые нормы трудового законодательства.....	62

5.1.2 Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны исследователя.....	63
5.2 Производственная безопасность ответственность.....	64
5.2.1 Анализ опасных и вредных производственных факторов	65
5.2.1.1 Анализ показателей шума	65
5.2.1.2 Анализ показателей микроклимата	66
5.2.1.3 Анализ электробезопасности.....	67
5.2.1.4 Анализ освещенности рабочей зоны.....	68
5.2.2 Обоснование мероприятий по снижению уровней воздействия опасных и вредных факторов на работающего.....	71
5.2.2.1 Снижение уровня шума на рабочем месте	71
5.2.2.2 Улучшение показателей микроклимата.....	72
5.2.2.3 Обеспечение электробезопасности.....	72
5.2.2.4 Контроль освещенности в лаборатории.....	72
5.2.2.5 Мероприятия по снижению уровня загрязнения воздушной среды в зоне дыхания.....	73
5.3 Экологическая безопасность.....	74
5.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях.....	75
Выводы по разделу.....	76
Заключение.....	78
Список используемых источников.....	80

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время все большую популярность приобретают аддитивные технологии, особенно перспективной является 3D печать из металла. Чаще всего в качестве сырья для 3D печати используют титан и его сплавы, т.к. титановые сплавы широко применяются во многих отраслях промышленности, он объединяет легкость алюминия и прочность стали. К тому же высокая стоимость титана вызывает острую необходимость в снижении отходов. Титан применяют для изготовления авиационных деталей в ракетных реактивных двигателях и узлах летательных аппаратов, которые подвергаются в процессе работы особым нагрузкам. По словам ученых, главное преимущество 3D-печати титановыми сплавами перед литейным производством в том, что аддитивные технологии позволят изготавливать детали любой, даже самой сложной конфигурации, затрачивая на это значительно меньше материала. Титановые сплавы очень тяжело поддаются обработке, и стандартными методами из них сложно изготовить детали сложной геометрической формы [1]. Открывающиеся перспективы использования изделий, изготовленных методами аддитивной технологии, требуют детального изучения структуры и свойств таких материалов.

Настоящая работа посвящена сравнению фазового состава, микроструктуры и механических свойств образцов титана Ti-6Al-4V, полученных методами проката и 3D-печати.

ГЛАВА 1 ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

1.1 Рентгенофазовый анализ

Рентгеновский фазовый анализ (РФА) — это метод, позволяющий определить существующие фазы (качественный анализ) и их относительного содержания в анализируемом образце (количественный анализ).

1.1.1 Определение рентгеновских лучах

Рентгеновские лучи представляют собой электромагнитное излучение с короткими длинами волн от 10-2нм до 102нм ($0,1 \text{ \AA} - 103 \text{ \AA}$) (рисунок 1). Рентгеновские лучи обладают высокой проникаемостью и могут проникать через некоторые непрозрачные вещества, такие как чернильная бумага, дерево и т.д. Этот невидимый невооруженным луч может вызвать видимую флуоресценцию многих твердых материалов, сделать фотопленку фоточувствительной, а также эффект ионизации воздуха.

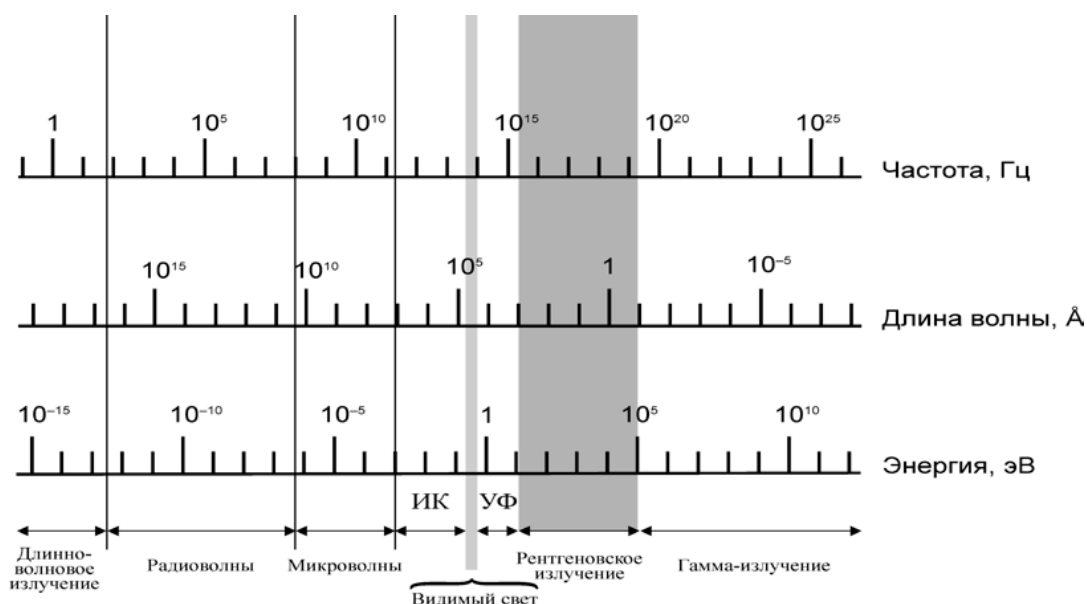


Рисунок 1 - Шкала электромагнитного излучения и место рентгеновского излучения в ней [2]

Чем короче длина волны, тем больше энергия рентгеновского излучения, называемая жестким рентгеновским лучом, и тем ниже энергия рентгеновского излучения с длинной длиной волны, называемая мягким рентгеновским лучом.

Самый простой способ генерации рентгеновских лучей-ударить по металлической мишени ускоренными электронами. Во время удара электрон внезапно замедляется, и его потерянная кинетическая энергия выделяется в виде фотонов, образуя непрерывную часть рентгеновского спектра, называются тормозным излучением. Увеличивая напряжение ускорения и увеличивая энергию, которую несет электрон, можно выбить электроны из внутреннего слоя атома металла. Таким образом, внутренний слой образует дыру, а внешние электроны переходят обратно во внутренний слой, чтобы заполнить дыру, одновременно выделяя фотоны с длиной волны около 0,1 нм. Поскольку энергия, выделяемая внешними электронными переходами, квантована, длины волн выделенных фотонов также сосредоточены в некоторых частях, образуя характерные линии в рентгеновском спектре, которые называются характерным излучением. Свойства непрерывных спектров не имеют ничего общего с материалом-мишенью, а характерные спектры связаны с материалом-мишенью, и разные материалы имеют разные характерные спектры, поэтому они называются “характеристиками”.

В исследовании кристаллографии Лауэ открыл явление дифракции, возникающее после прохождения рентгеновских лучей через кристалл, т.е. рентгеновскую дифракцию. Брэгг использовал закон Брэгга для

количественного определения.

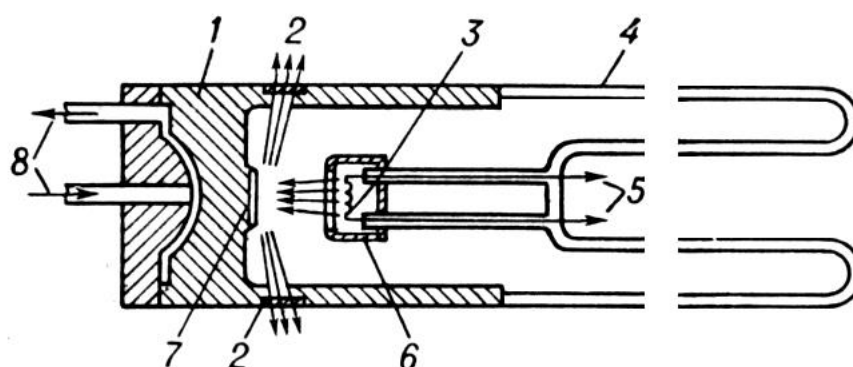
Каждое кристаллическое вещество имеет свою специфическую кристаллическую структуру, включенную тип решетки, расстояние между ячейками и другие параметры. Излучен облученного образца достаточной энергией рентгеновского, вещество в образце возбуждено, произведет вторичное флуоресцентное рентгеновское излучение (идентификация рентгеновского излучения), отражение поверхности кристалла следовать закону Брэгга. Для определения углового положения дифракции (пика) с помощью качественного анализа. Для определения количественного анализа с использованием интегральной интенсивности спектральных линий (пиковой интенсивности), а для определения зависимости интенсивности спектральных линий с изменением угла может провести обнаружением размера и формы зерна.

1.1.2 Устройство рентгеновские трубки

Рентгеновские трубки – электровакуумный прибор, возникающий рентгеновский луч с помощью использования высокоскоростных электронов для получения рентгеновских лучей при ударе по металлической мишени. Когда в вакууме высокоскоростные движущиеся электроны бомбардируют металлическую мишень, цель выпускает рентгеновские лучи, что является структурным принципом рентгеновской трубки.

Рентгеновские трубки содержат два электрода (Рисунок 2): катод (3)– в виде накаливаемой проволочной вольфрамовой спирали для испускания

электронов, и анод (7)- в виде массивной медной трубки для получения электронной бомбардировки в качестве анода. Кроме того, в рентгеновских трубках существует окно для выпуска. Катод испускает электроны теплового излучения при нагревании электронами. Так как большой разность потенциалов между катодом и анодом (10-100 киловольт), поток электронов ускоряется и приобретает большую энергию. Полученный ускоренный пучок электронов попадает на анод и электроны испытывает резкое торможение, затем электроны теряют большую часть энергии. При этом возникает тормозное излучение рентгеновского диапазона. Поскольку рентгеновские лучи излучаются по всему периметру, большая часть поглощается оболочкой трубки и можно использована только для запуска через окно. В процессе торможения лишь около 1% кинетической энергии электрона идёт на рентгеновское излучение, 99% энергии превращается в тепло. Чтобы предотвратить перегрев анода, в мощных рентгеновских трубках применяют водяное или масляное охлаждение и закрепляют мишень на металле с высокой теплопроводностью (латунь) [3].



1—металлический анодный стакан; 2—окна из бериллия; 3—термоэмиссионный катод; 4—стеклянная колба; 5—выводы катода для подвода напряжения; 6 — фокусирующий колпак; 7— анодное зеркало; 8 — каналы для водяного охлаждения

Рисунок 2- Схема рентгеновские трубки

1.1.3 Устройство дифрактометра

Принцип работы являются следующими: рентгеновские лучи испускаются из рентгеновской трубки. Расходимость первичного пучка в экваториальной плоскости задают первой экваториальной щелью. Изменяя ее ширину можно регулировать площадь освещаемой поверхности образца. Аксиальную расходимость рентгеновского пучка ограничивают щелями Соллера (Рисунок 3). Таким образом, на образец падает расходящийся первичный пучок.

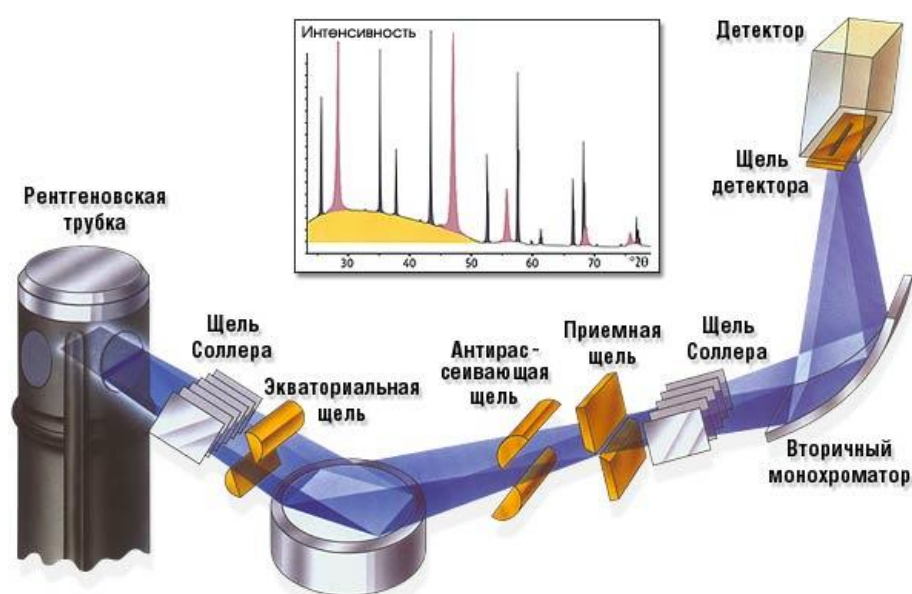
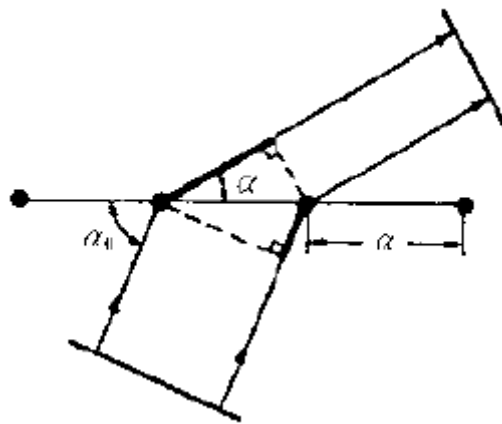


Рисунок 3 - Реализация схемы Брэгга-Брентано на приборе Shimadzu XRD-7000 [4]

На дифрагированном пучке стоит антирассеивающая щель, которая пропускает дифрагированное на образце рентгеновское излучение и отсекает другое рассеянное излучение. Далее следует приемная щель и вторая щель Соллера, которая ограничивает ширину рентгеновского пучка, попадающего на вторичной монохроматоре и отражающего на сцинтиляционный детектор [5].

1.1.4 Уравнение Брэгга–Вульфа и уравнение Лауэ

До 1912 года физики дали точные объяснения дифракции видимого света. Они полагали, что могут производить дифракцию, если константы решетки и длина волны света, излучаемого точечным источником, имеет равную порядку величины. Поскольку расстояние между атомами соизмеримо с длиной волны рентгеновского излучения, кристалл может служить для него дифракционной решеткой.



α_0 - угол падающего луча, α - угол луча, рассеянного в направлении интерференции,
a- расстояние соседних атомов

Рисунок 4 – Условия интерференции [6]

Известно, что при отражении лучи могут интерферировать в том случае, если их разность хода равна $n\lambda$ или разность фаз равна $2n\pi$ (Рисунок 4). Таким образом, получено следующее уравнение:

$$a (\cos\alpha - \cos\alpha_0) = n\lambda$$

$a (\cos\alpha - \cos\alpha_0)$ — разность хода лучей.

Поскольку обычно решётки расположены в трехмерном пространстве:

$$a (\cos\alpha - \cos\alpha_0) = h\lambda$$

$$b (\cos\alpha - \cos\alpha_0) = k\lambda$$

$$c (\cos\alpha - \cos\alpha_0) = l\lambda$$

a, b, c- периоды повторяемости вдоль кристаллографических осей координат;

h, k, l – целые числа, индексы дифракционного луча;

При условии эти три уравнения выполняются одновременно, падающая волна будет отражаться от поверхности (h/n, k/n, l/n) (Рисунок 5). И объединив эти три уравнения, можно получить уравнение Брэгга.

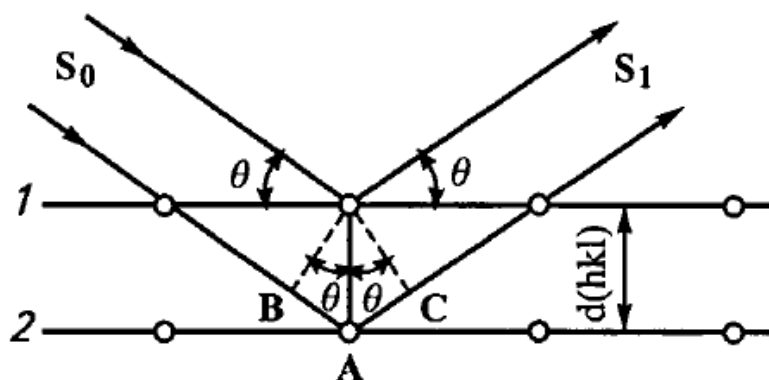


Рисунок 5 - Отражение рентгеновских лучей в кристалле по Брэггу [7]

Уравнение Брэгга—Вульфа:

$$2d_{hkl}\sin\theta = n\lambda$$

где d_{hkl} – межплоскостное расстояние, θ – угол между пучком X-лучей и плоскостью решётки, λ – длина волны используемого характерного излучения, n – порядок отражения.

Уравнение Лауэ, предложенное немецким ученым Максом фон Лауэ в 1912 году, иллюстрирует случай, когда падающий свет дифрагируется решеткой (Рисунок 6).

Интерференционное уравнение Лауэ, являющееся одним из основных уравнений рентгеноструктурного анализа:

$$(\vec{S_0} - \vec{S_1})/\lambda = \vec{H}$$

$\vec{S_0}$ - единичные векторы падающего луча и $\vec{S_1}$ - единичный вектор луча, рассеянного в направлении интерференции. λ – длина волны, \vec{H} – вектор, перпендикулярный к некоторому семейству плоскостей (hkl) в решетке (вектор обратной решетки), причем длина его связана с межплоскостным расстоянием этого семейства (d_{hkl}) соотношением $|\vec{H}| = n/d_{hkl}$, где n – целое число (порядок отражения) [8].

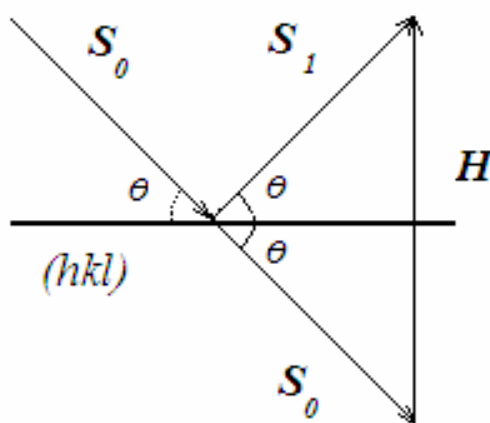


Рисунок 6 - Уравнение Лауэ [8]

1.1.5 Качественный анализ

Качественный анализ основан на том, что идентифицировать кристаллические фазы на основе присущих им значений межплоскостного расстояния и соответствующих интенсивностей линий. Сущность качественного анализа включает сборники дифракционных данных и сравнение с записями по базе данных международной порошковой дифракции [9]. В мировой практике для качественного анализа широко используются Объединенный комитет порошковых дифракционных стандартов (JCPDS).

1.1.6 Количественный анализ

Интегральная интенсивность рефлекса hkl равно:

$$I_{hkl} = C \cdot L(\theta) \cdot |F_{hkl}|^2 \cdot P_{hkl} \cdot e^{-2M} \cdot A(\theta) = C_1 \cdot K_{hkl} \cdot Q(v)$$

где C – общий для всех линий дифрактограммы множитель, зависящий от длины волны излучения;

F_{hkl} – структурный фактор равно:

$$F_{hkl} = \sum_{j=1}^N f_j e^{2\pi i(hx_j + ky_j + lz_j)}$$

f_j – атомная амплитуда рассеяния, зависящая от порядкового номера элемента;

x_j, y_j, z_j – координаты базисных атомов;

P_{hkl} – фактор повторяемости, учитывающий число эквивалентных плоскостей, дающих одну и ту же дифракционную линию. Он зависит от типа кристаллической решетки и сорта плоскостей;

e^{-2M} – температурный фактор;

$A(\theta)$ – фактор поглощения, зависящий от исследуемого вещества, длины волны излучения и метода съемки [10]

А интенсивность узкого пучка рентгеновского излучения, проходящего расстояние x в однородном веществе подчиняется такому закону:

$$I = I_0 \exp(-\mu x),$$

где I_0 – интенсивность рентгеновских лучей, падающих на слой облучаемого материала. μ -линейный коэффициент поглощения, x - толщина образца в направлении рентгеновского луча [5].

1.2 Способы аддитивных технологий

Аддитивные технологии, также называемая 3D-печать является процессом изготовления изделия на основе CAD-модели путем послойного добавления материала. Создание детали обусловлены последовательным формированием слоев материала, их фиксации или отверждения и соединения между собой. В отличие от традиционных методов, она может изготавливать изделия непосредственно без удаления избыточного материала, поэтому его самым большим преимуществом по сравнению с традиционным процессом является экономия материала и простота процесса. В современное время аддитивные технологии применяют во многих областях науки и производства — например, в медицине, аэрокосмической, машиностроении, автомобильной, нефтегазовой промышленности и т.д. [11].

Согласно общей классификации аддитивного производства изделий из титановых сплав, основными методиками являются селективное лазерное спекание (SLS), селективное лазерное плавление (SLM), Электронно-лучевая плавка (EBM) и Произвольная электронно-лучевая плавка (EBF³).

1.2.1 Селективное лазерное спекание

Селективное лазерное спекание (SLS) — это метод, использующий инфракрасный лазер в качестве источника энергии, в основном порошковый материал. При обработке сначала разогреть порошок до температуры немного ниже его точки плавления, а затем сгладить порошок под действием ролики; лазерный луч CO₂ с высокой интенсивностью под компьютерным

управлением в соответствии с информацией о слоистом поперечном сечении выборочно спекается, один слой после завершения, а затем следующий слой спекания, после спекания удалить избыточные порошки, наконец получить спеченные детали (рисунок 7). Процесс построения изделий происходит в камере машины, заполненной инертным газом аргон или азот (в зависимости от типа порошка, из которого происходит построение), при ламинарном его течении. Основной расход инертного газа происходит в начале работы, при продувке камеры построения, когда из нее полностью удаляется воздух (допустимое содержание кислорода менее 0,15%).

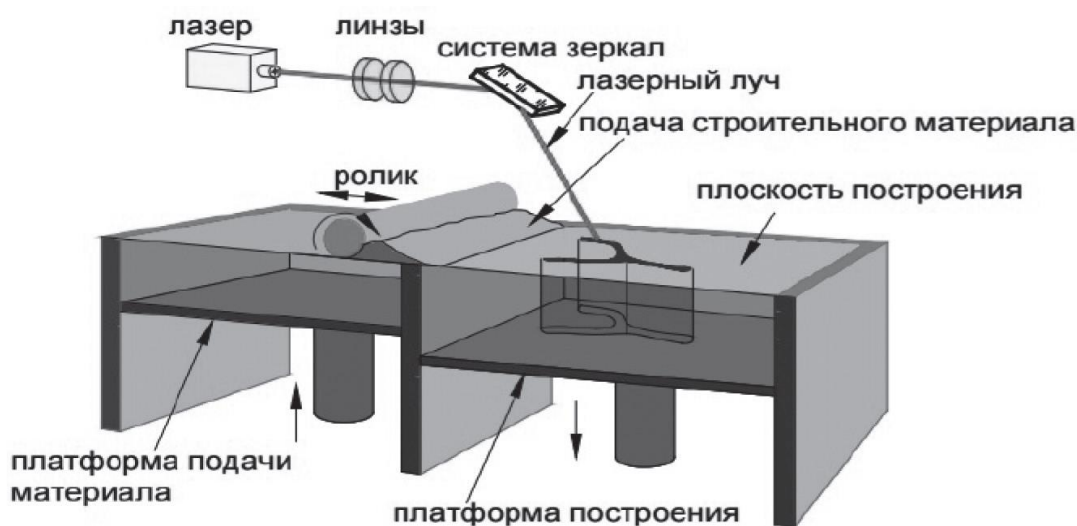


Рисунок 7 – Технология селективного лазерного спекания [12]

Самое большое преимущество процесса SLS селективного лазерного спекания заключается в более широком выборе материалов, таких как нейлон, воск, смола, поликарбонат, металлические и керамические порошки и т.д. могут использоваться в качестве спеченных объектов. Кроме того, так как не спеченная часть на порошковом слое становится опорной структурой спеченной части, поэтому нет необходимости рассматривать систему

поддержки.

С помощью этой технологии можно получать большие изделия с различными физическими свойствами (повышенная прочность, гибкость, термостойкость и др).

Однако недостатками метод SLS являются: меньшая доступность способа за счет более высокой сложности и стоимости оборудования и исходного материала; высокие затраты энергии и времени на предварительный подогрев порошка и рабочей камеры; шероховатость получаемой поверхности изделия (в пределах Ra 6,3–12,5 мкм), что в некоторых случаях требует дополнительной механической обработки [13].

Пористые титановые имплантаты, напечатанные с помощью селективного лазерного спекания, обладают хорошими механическими свойствами и биосовместимостью, пористость которых близка к корковой кости на 30% и сосновой кости на 70%. Таким образом, селективное лазерное спекание обычно использован в область медицине [14].

1.2.2 Селективное лазерное плавление

Селективное лазерное плавление (SLM) является одним из основных технологических путей в аддитивном производстве металлических материалов. Эта технология использует лазер в качестве источника энергии, в соответствии с трехмерной CAD-моделью среза, запланированной в слое металлического порошка для послойного сканирования, отсканированного металлического порошка путем плавления, затвердевания, чтобы достичь

эффекта металлургической связи, сфокусированный лазерный луч полностью расплавляет порошок и сплавляет его с нижним слоем, после чего платформа опускается на одну толщину слоя, и весь процесс повторяется до тех пор, пока деталь не будет изготовлена [15].

Преимущества и недостатки процесса SLM

- 1) технология SLM для обработки стандартного металла с плотностью более 99%, хорошие механические свойства сопоставимы с традиционным процессом.
- 2) вид обрабатываемого материала продолжает увеличиваться, обрабатываемые детали могут быть сварены позже.
- 3) Высокая цена, низкая скорость.
- 4) точность и качество поверхности ограничены и могут быть улучшены после обработки.

Область применения процесса SLM

- 1) внешний вид, сборка, прототип функции обработки стандартного металла.
- 2) поддерживая части, например, струбцина, приспособление и так далее.
- 3) малое производство частей серии.
- 4) пресс-форма впрыски.

Технология SLM преодолевает проблемы, вызванные традиционной технологией изготовления металлических деталей со сложной формой. Он может сразу сформировать почти полностью плотные и хорошие механические свойства частей металла.

Разница между SLS и SLM в том, что SLS обеспечивает лишь частичное

плавление порошка, требуемое для его объединения в единый элемент. Но SLM плавит частицы полностью, спекая порошок в монолитное изделие. Кроме того, процесс SLM обычно требует добавления опорной структуры.

1.2.3 Электронно-лучевое плавление

Электронно-лучевая плавка (EBM) –метод плавки путём использования электронного пучка. В отличие от метода SLM, только использование луча высокоэнергетических электронов вместо лазера в качестве источников энергии для плавки.

Среди различных доступных процессов аддитивного производства процесс EBM показал самое низкое удельное потребление энергии и самую высокую среднюю скорость осаждения.

Процесс EBM состоит из нескольких этапов. Предварительный нагрев как стартовой пластины, так и слоя порошка выполняется до определенной температуры, которая зависит от обрабатываемого материала.

Предварительный нагрев порошкового слоя состоит из двух последующих этапов. Слой порошка сначала равномерно нагревается с помощью ряда проходов для пучков. Затем порошок дополнительно нагревается в области, которая соответствует заранее заданному смещению фактической зоны плавления. Начальный предварительный нагрев в основном направлен на то, чтобы избежать распространения порошка в фазе плавления, в то время как последний уменьшает тепловой градиент для последующей фазы плавления [16].

К преимуществам данного метода относятся:

- более высокая скорость построения, чем при других методах;
- отсутствие необходимости термообработки изделия после печати;
- отсутствие необходимости поддержек.
- низкая пористость готовых изделий;
- высокая прочность, сопоставимая с коваными изделиями;

Недостатки данного метода представляются собой:

- необходимость изоляции печатного устройства вследствие высокой интенсивности излучения.
- высокую сложность и стоимость оборудования и исходных материалов;
- высокие затраты энергии;

По сравнению качества поверхности с SLM, источника электронного луча с минимальным размером элемента 1 мм, а лазерный луч SLM позволяет иметь сварочную ванну узкой до 0,3 мм. С другой стороны, процесс EBM осуществляется в вакуумной атмосфере, где порошок нагревается, что позволяет получить плотность и механические свойства 98%, сравнимые с традиционными технологиями производства. В СЛМ-изготовленных образцах конечная микроструктура является полной α' мартенситной из-за высоких скоростей охлаждения (порядка 106K/C), что создает значительные остаточные напряжения в материале. А полученный из ЭБМ образец имел α -пластинчатую морфологию благодаря камерам, контролируемым температурой около 700 °C, что значительно выше температуры мартенситного пласта и поэтому не нуждается в постобработке для снижения

остаточных напряжений. Кроме того, из-за сильного присутствием мартенситных микроструктур, обусловленных быстрым охлаждением, в процессе SLM позволяет много дефектов, связанных с более высокими тепловыми напряжениями. Таким образом, применение EB предпочтительно к лазеру.

1.2.4 Произвольное электронно-лучевое плавление

Произвольное электронно-лучевое плавление (EBF³) - новый метод АТ, запатентованный NASA аддитивный производственный процесс, предназначенный для создания деталей почти чистой формы, требующих меньшего количества сырья и финишной обработки, чем традиционные методы производства. EBF³ — это метод отличается от EBM, что твердое проволочное сырье вместо порошков [17].

На рисунке 8 представлена схема EBF³ печати. В установке используется сфокусированный электронный луч в вакуумной среде (1×10^{-4} торр или ниже) для создания расплавленного бассейна на металлической подложке. Луч перемещается относительно поверхности подложки, в то время как металлическая проволока подается в расплавленную ванну. Осадок затвердевает сразу же после прохождения электронного пучка, обладая достаточной структурной прочностью, чтобы поддерживать себя. Эта последовательность повторяется послойно-аддитивным способом для получения детали почти чистой формы, требующей только финишной обработки. Процесс EBF³ масштабируется для компонентов от долей дюйма

до десятков футов в размере, ограниченном главным образом размером вакуумной камеры и количеством доступного проволоочного сырья.

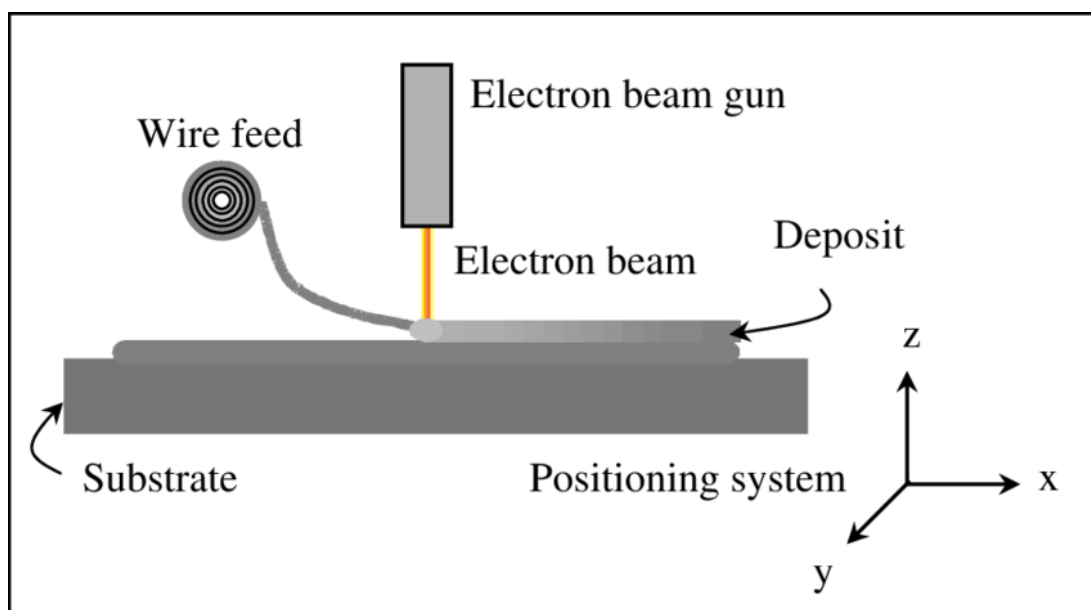


Рисунок 8 – Схема 3D-печати образцов [17]

EBF³ позволяет сократить затраты и время, затраченное на изготовление деталей, и следовательно, повысить производительность за счет оптимизации химии сплавов и микроструктур.

Процесс EBF³ по своей сути является энергоэффективным, на порядок выше 90%. Энергоэффективность процесса CO₂-лазера составляет около 10%. Метод EBF³ имеет все достоинства метода ЕВМ, кроме того, метод EBF³ более экономичен благодаря сокращения количества требуемых сырьев. В таблице 1 приведены свойства образцов титанового сплава Ti-6Al-4V, полученных основными методами аддитивного производства: селективным лазерным спеканием, селективным лазерным плавлением, электронно-лучевой плавкой и произвольной электронно-лучевой плавкой.

Таблица 1 - Сравнение свойства титанового сплава Ti-6Al-4V полученных различными методами аддитивного производства [18]

Методы	Точность	Плотность	Прочность	Пластичность	Скорость печати	Применение
SLS	Шероховатая поверхность ± 300 мкм	Маленькая	Не высокая	Очень маленькая	Не быстрая	Аэрокосмическая, медицинская, автомобильная промышленность
SLM	20~100 мкм Высокая точность изделий, получение тонких стенок (до 50 мкм)	Большая	Не высокая	маленькая	Не быстрая	Сложные мелкие прецизионные детали, металлические коронки, медицинские растения
EBM	точность построения модели ± 200 мкм.	Относительно большая	Относительно высокая	Относительно большая	Относительно быстрая	Металлические элементы аэрокосмического комплекса, медицинские имплантаты
EBF ³	± 50 м	большая	Относительно высокая	Относительно большая	быстрая	Металлические элементы аэрокосмического комплекса

ГЛАВА 2 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В качестве материала исследований был выбран титановый сплав Ti-6Al-4V (5.95 Al, 4.37 V, 0.02 Si, 89.66 вес. % Ti) в виде листов проката и проволоки диаметром 1.6 мм. Из листов проката были вырезаны образцы с размерами рабочей части 1×5×40 мм×мм×мм для последующих испытаний на растяжение.

Для изготовления образцов методами аддитивных технологий использовали проволоку из титанового сплава. Плавление проволоки Ti-6Al-4V диаметром 1.6 мм осуществляли путем метода EBF3 с помощью плазменного источника энергии в вакуумной камере при давлении 1.3×10^{-3} Па и ускоряющем напряжении 30 кВ (электронно-лучевая установка 6E400). Схема 3D печати представлена на рисунке 9. В качестве подложки использовалась титановая пластина размером 150 мм×150 мм×10 мм, имеющая водяное охлаждение. Расстояние между источником электронного пучка и подложкой составляло 630 мм. Сила тока пучка уменьшалась в процессе печати от 24 до 17 мА. Проволока подавалась под углом 35 град. к

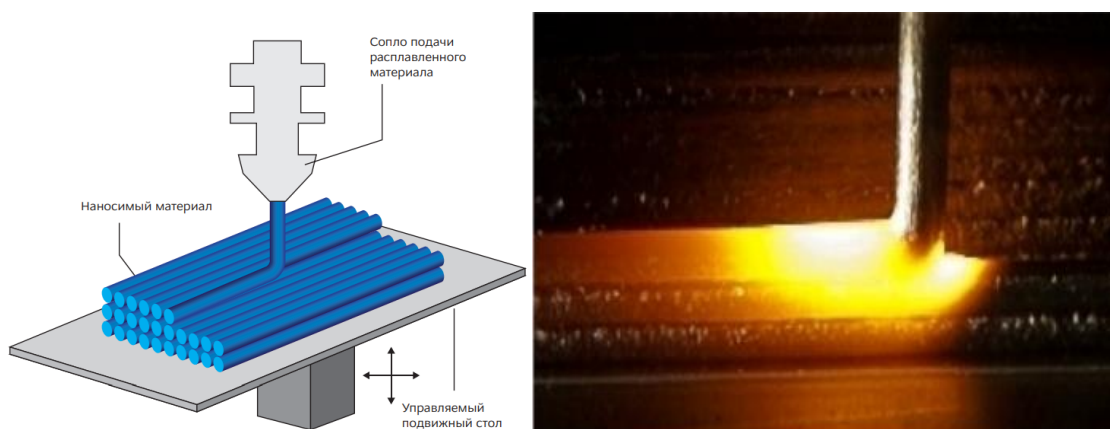


Рисунок 9 – Схема 3D печати образцов

поверхности подложки со скоростью 2 м/мин. На подложку было наплавлено 100 слоев длиной 850 мм, шириной 5 мм и толщиной 0.7 мм.

Микроструктурные исследования проводили с помощью оптического микроскопа Carl Zeiss Axiovert 40 MAT, просвечивающего электронного микроскопа JEM-2100 (ПЭМ) и сканирующего электронного микроскопа LEO EVO 50 (РЭМ), оснащенного детекторами EDS. Образцы для металлографического исследования разрезали параллельно и перпендикулярно направлению сборки с помощью электроэрозионной обработки. Образцы были вытравлены реагентом Кролла для выявления их структуры после механической полировки. Образцы для исследования на ПЭМ готовили методом ионного утонения с использованием Ion Slicer EM-09100IS. В качестве рабочего газа использовали аргон, при этом ускоряющее напряжение составляло 8 кВ, а угол травления составлял 1,5–4°.

Изучение фазового состава исследуемых образцов проводили с использованием дифрактометра Shimadzu – 7000, программных продуктов Search Match, Powder Cell и базы данных PDF-4 2019. Рентгеноструктурные исследования проводились с CuK_α -излучением (длина волны 1,5410 Å) в обычной симметричной геометрии Брэгга-Брентано от 25 до 90° со скоростью сканирования 1,2°/мин.

Изучение микротвердости образцов титанового сплава проводили с помощью микротвердомера «ПМТ-3М» при выдержке под нагрузкой 100 г в течение 10 с.

Механические свойства титанового сплава Ti-6Al-4V оценивали путем испытаний на одноосное квазистатическое растяжение, которое проводили на воздухе при комнатной температуре с использованием испытательной машины INSTRON 5582, скорость нагружения составляла 0,3 мм/мин. В механических испытаниях использовались образцы гантелей, вырезанные в плоскости XY (перпендикулярно направлению сборки) методом электроэрозионной обработки. Размеры рабочей части составляли 1×5×40 мм×мм×мм. Чтобы избежать влияния чистоты поверхности на механические свойства образцов, поверхность образцов перед нагружением механически полировали.

ГЛАВА 3 РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Методом рентгено-фазового анализа выявлено, что как в случае образцов титанового сплава, подвергнутых прокату, так и полученных, основная фаза представлена гексагональным плотноупакованным α -титаном, и лишь небольшую часть составляет объемно-центрированный кубический β -титан. Как видно из рисунка 10, в прокатанных образцах титанового сплава формируется отдельный пик, указывающий на наличие β -фазы. Проведенный количественный анализ позволил оценить содержание β фазы, объем которой составил 6,8 %. В случае получения образцов методом EBF³ отдельный пик формируется слабо, однако доказательством наличия фазы β -Ti является асимметричное уширение пика XRD при $2\theta = 39^\circ$, принадлежащего β -Ti (110) (рисунок 10). Эта конкретная форма пика может рассматриваться как суперпозиция нескольких пиков для α -Ti (1011) и β -Ti (110). Последнее свидетельствует об уменьшении содержания β -фазы, что подтверждается проведенным количественным анализом. Так, в образцах после 3D-печати содержание β -фазы составляло 5,5%.

Проведенные микроструктурные исследования показали, микроструктура прокатанного образца из титанового сплава Ti-6Al-4V состоит из равноосных зерен, средний размер которых составляет 2-3 мкм (рисунок 11а). Детальные исследования, проведенные методом просвечивающей электронной микроскопии, выявили в тройных стыках равноосных зерен α фазы, а также вдоль их границ зерна β фазы, средний размер которых не превышает 500 нм (рисунок 11б-г).

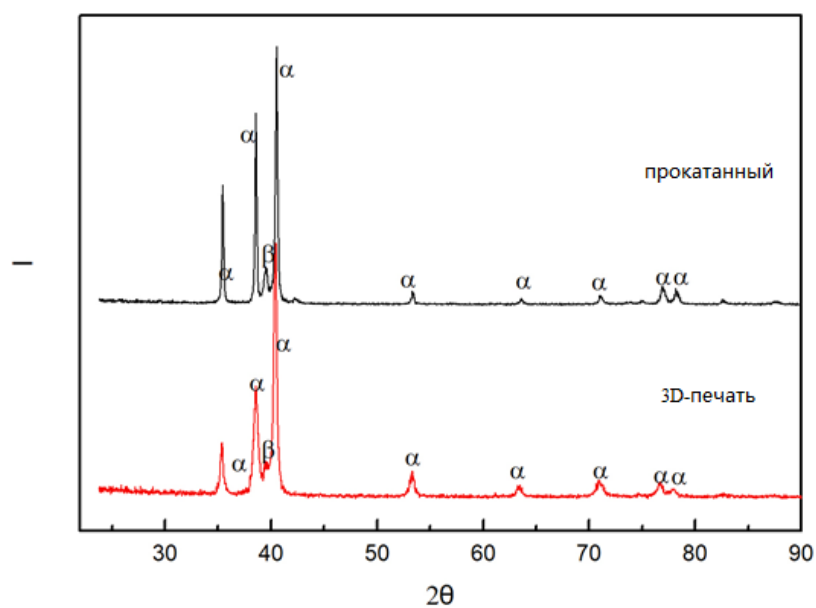
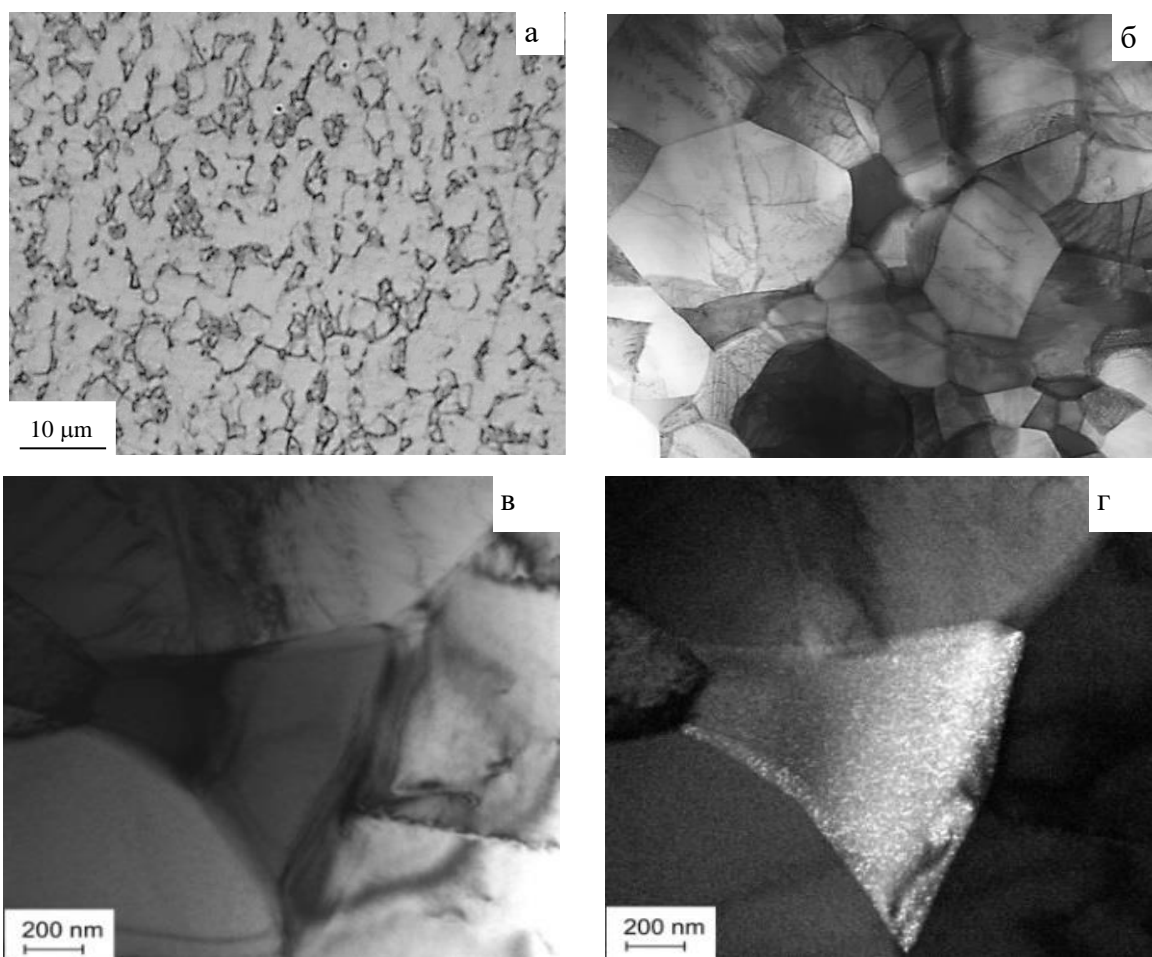
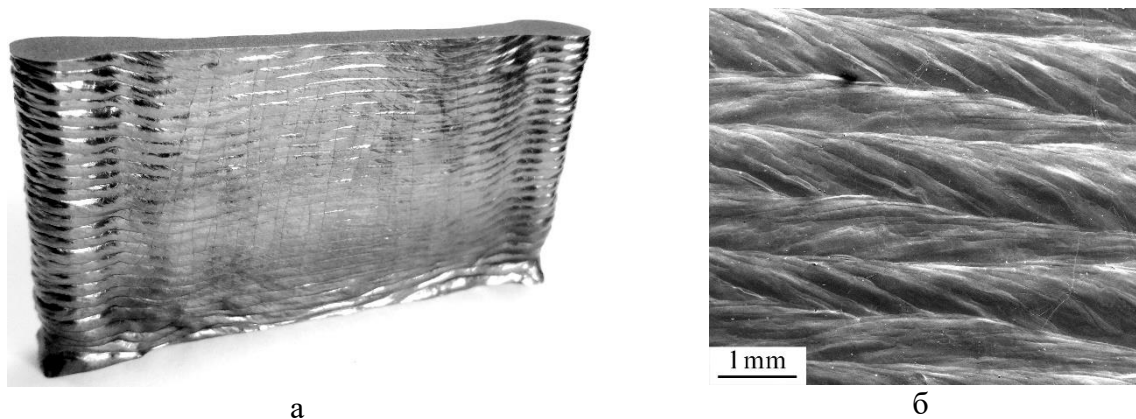


Рисунок 10 - Рентгенограмма прокатанного и напечатанного образцов титанового сплава Ti-6Al-4V



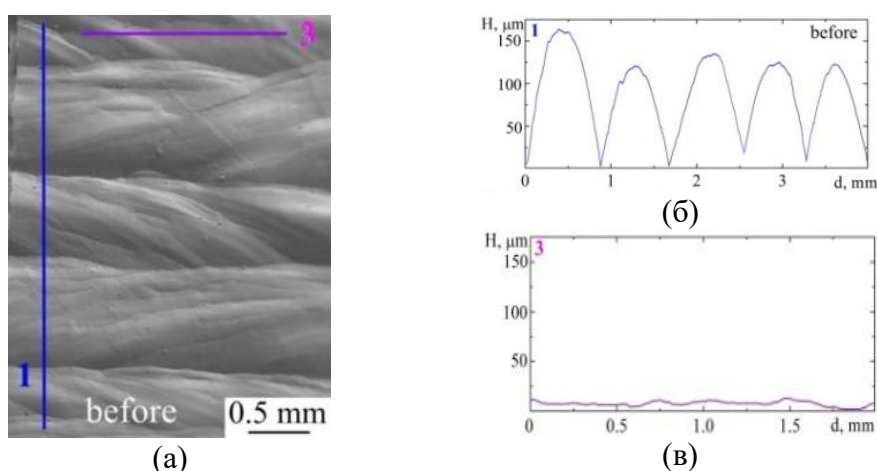
а – оптическое изображение; б,в – светлопольное ПЭМ изображение,
г – темнопольное ПЭМ изображение, полученное в рефлексе $\overline{143}$ (157) β Ti
Рисунок 11 - Микроструктура образцов из прокатанного титанового сплава Ti-6Al-4V

В результате изготовления изделия методом EBF³ была получена пластина Ti-6Al-4V в виде однопроходной многослойной части стенки, изображение которой представлено на рисунке 12. Поверхность напечатанной детали представлена в виде ярко выраженных горизонтальных полос. Морфология такой полосы слоя вдоль горизонтального направления образована последовательными ступенями лестницы, которые определяются направлением потока расплавленной ванны во время процесса добавления слоя. Последнее в явном виде демонстрируется различной морфологией смежных слоев, нанесенных в чередующихся направлениях осаждения (рисунок 12б). Средняя толщина чередующихся слоев равна 700 мкм. Кроме того, шероховатость профиля пика и впадины, ориентированная вдоль направления сборки, является неотъемлемым атрибутом изготовленных из EBF³ деталей из Ti-6Al-4V, что обусловлено поверхностным натяжением в расплавленной ванне. РЭМ-изображение верхней полированной поверхности и боковой поверхности стеночной части свидетельствует о том, что полученные слои являются структурно однородными без наличия пор или трещин (рисунок 13). Анализ, проведенный с помощью оптической профилометрии, показал, что различия в высоте между пиком и долиной профилей, направленных параллельно и перпендикулярно направлению сборки, равны 150 и 15 мкм соответственно (рисунок 13б и в).



а – полученный образец, б – его поверхность

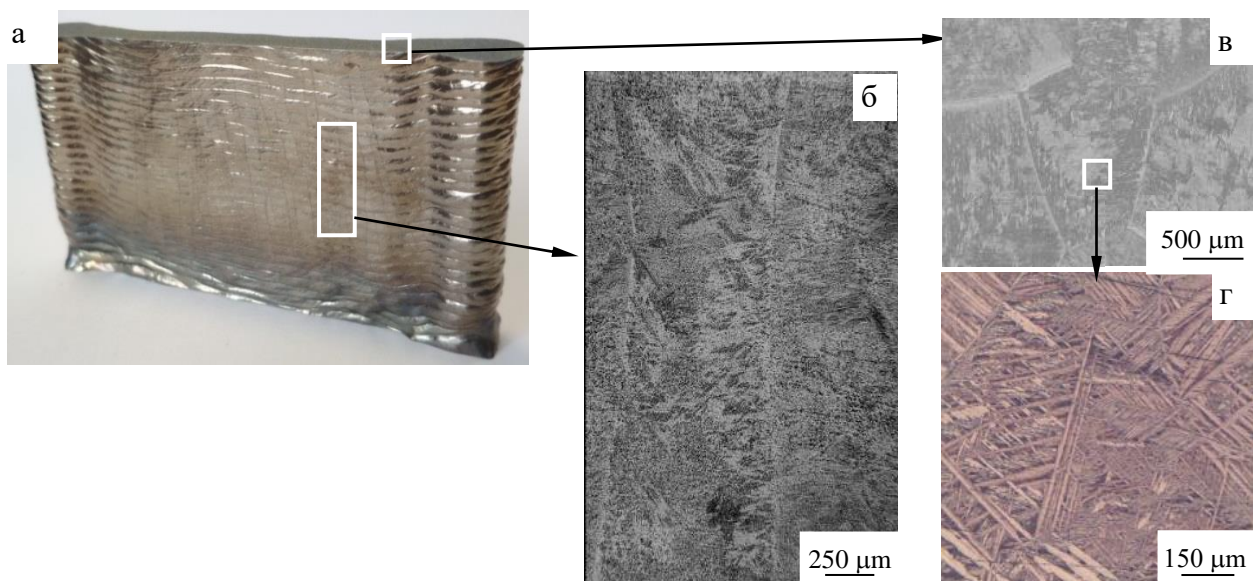
Рисунок 12 - Изображение образца Ti–6Al–4V, полученного методом EBF³



а - РЭМ-изображение; б - профиль сечения параллельного направлению EBF³;
в – профиль сечения перпендикулярного направлению EBF³

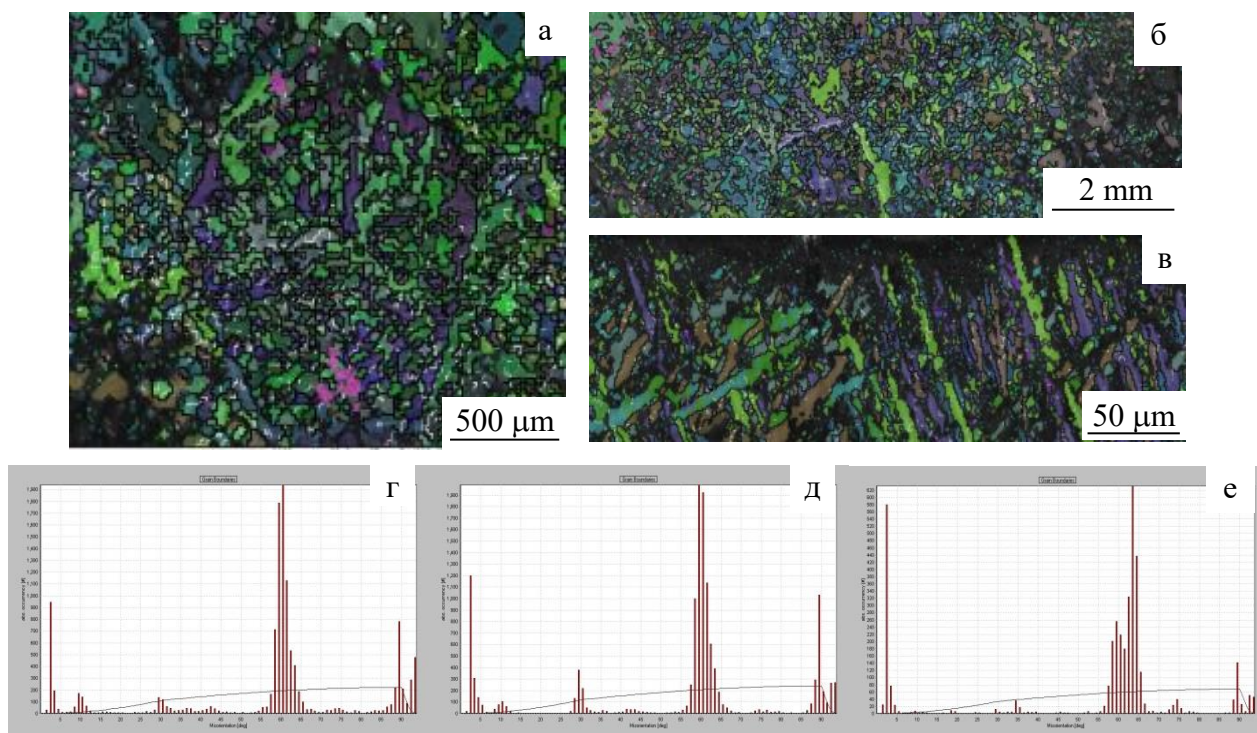
Рисунок 13 – Рельеф поверхности образца Ti–6Al–4V, полученного методом EBF³

Микроструктура 3D-напечатанной пластины состоит из столбчатых зерен первичной β -фазы, высота которых в 2-3 раза превышает их диаметр (рисунок 14а-в). Зерна состоят из пластин α -фазы микронного размера, ориентированных в различных направлениях (рисунок 14г). EBSD-анализ, проведенный в продольном и поперечном сечениях 3D-напечатанного образца Ti–6Al–4V, показал, что столбчатые зерна характеризуются наличием большого числа мало- и большеугловых границ (рисунок 15).



а – напечатанный образец, б - продольном сечении; в, г - микроструктура в поперечном сечении

Рисунок 14 – Микроструктура напечатанного образца Ti-6Al-4V



а - EBSD-карта микроструктуры в поперечном сечении, б, в - EBSD-карта микроструктуры в продольном сечении, г - гистограмма распределения границ зерен по углам разориентации в поперечном сечении, д - гистограмма распределения границ зерен по углам разориентации в продольном сечении

Рисунок 15 - EBSD-карта и соответствующие гистограммы распределения границ зерен в напечатанных образцах Ti-6Al-4V

Другой недостаток 3D-печати титановых образцов путем послойного плавления проволоки был обнаружен при исследовании образца, вырезанного из центра напечатанной пластины. Он проявляется в виде неоднородности структуры по образцу. Так, по периметру 3D-напечатанного образца Ti-6Al-4V вследствие более высокой скорости охлаждения в первичных зернах β -Ti формируются крупные пластины α -Ti, поперечные размеры которых составляют 10 мкм, а длина достигает 100 мкм (рисунок 16). ПЭМ-исследования показали, что данные пластины состоят из более мелких пластин α -Ti со средним поперечным размером 1 мкм (рисунок 17а,б), по границам которых наблюдаются двухфазные прослойки из α -Ti и β -Ti толщиной до 200 нм (рисунок 17в).

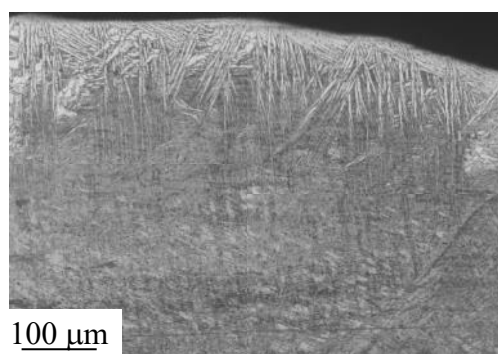
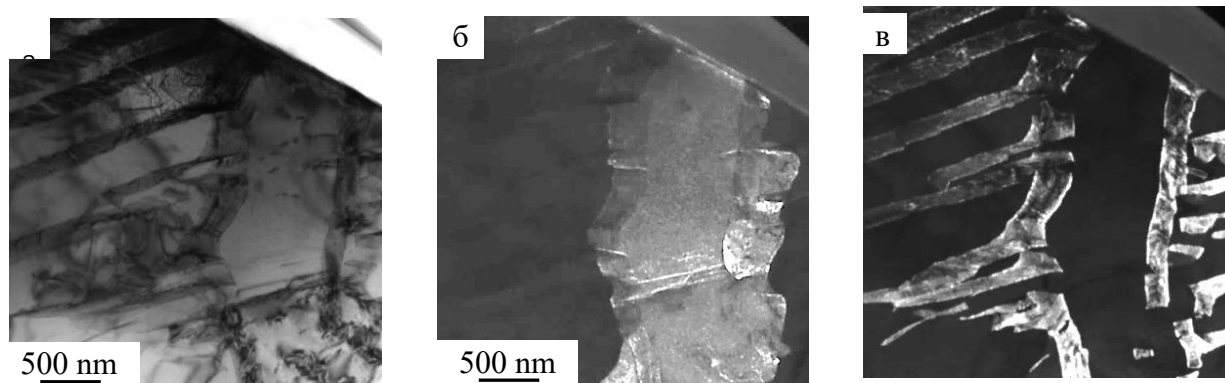
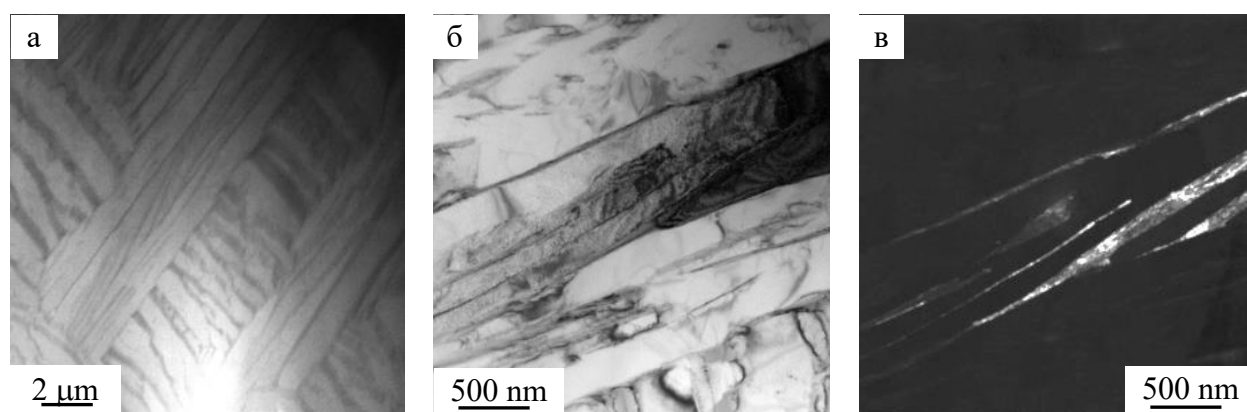


Рисунок 16 - Микроструктура боковой грани 3D-напечатанного образца из сплава Ti-6Al-4V

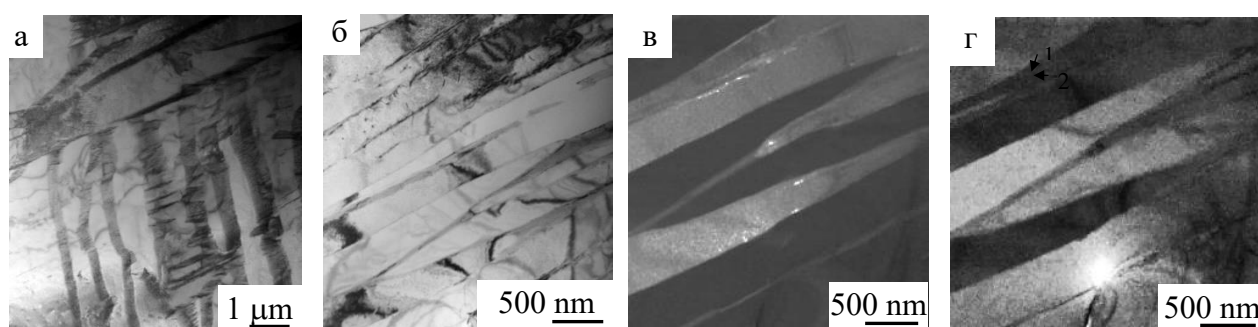


а – светлопольное ПЭМ-изображение; б, в - темнопольные ПЭМ-изображения
Рисунок 17 – Микроструктура в поверхностном слое напечатанного образца Ti-6Al-4V

В свою очередь, в центре 3D-напечатанных образцов также происходит формирование пластин α -Ti, однако их поперечный размер не превышает 500 нм (рисунок 18а,б). По границам пластин α -Ti выделяются прослойки β -фазы (рисунок 18в), объемная доля которой не превышает 10%. Кроме того, в зернах α -Ti наблюдаются области, испытавшие сильную фрагментацию за счет образования дислокационных стенок, формирующих малоугловые границы (рисунок 19а), и двойники (рисунок 19б-г).



а – РЭМ-изображение, б - светлопольное ПЭМ-изображение,
в – темнопольное ПЭМ-изображение
Рисунок 18 - Микроструктура в объеме напечатанного образца Ti-6Al-4V



а, б – светлопольные, в, г - темнопольные
Рисунок 19 - ПЭМ-изображения напечатанного образца из сплава Ti-6Al-4V

Результаты механических испытаний представлены на рисунке 20, из которого видно, что методом EBF³ с использованием проволоки удалось

достигнуть значений прочности и пластичности, близких состоянию проката. Так, предел прочности прокатанного образца составляет 900 МПа, а его пластичность достигает 11%. Прочность напечатанных образцов всего на 50 МПа меньше, чем прочность прокатанного образца, в то время как их пластичность различается на 2% (рисунок 20). Высокая прочность напечатанных образцов обусловлена сильной фрагментацией материала внутри зерен α -Ti, происходящей из-за двойникования, а также образования мало- и большеугловых границ. Следует отметить, что формирование пластин α -фазы обуславливает достаточно высокую твердость 3D-напечатанных образцов Ti-6Al-4V даже при чрезвычайно большом среднем размере зерна. Микротвердость таких образцов составляет 3,5 ГПа, что превышает значения микротвердости для прокатанных образцов (3,18 ГПа).

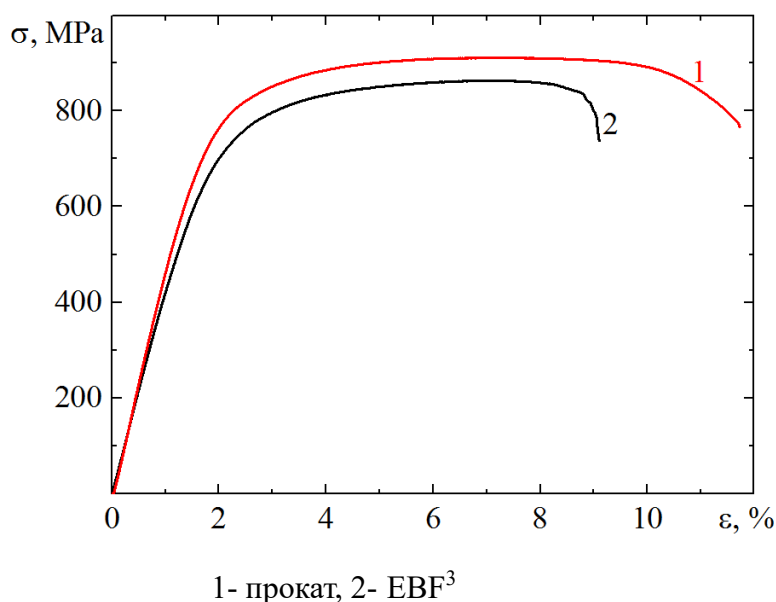


Рисунок 20 – Кривые нагружения образца титанового сплава Ti-6Al-4V

ГЛАВА 4 ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ

Введение

Цель данного раздела ВКР заключается в оценке перспективности разработки и планировании финансовой и коммерческой ценности конечного продукта, предлагаемого в рамках НИ. Коммерческая ценность определяется не только наличием более высоких технических характеристик над конкурентными разработками, но и тем, насколько быстро разработчик сможет ответить на следующие вопросы: будет ли продукт востребован на рынке, какова будет его цена, каков бюджет научного исследования, какое время будет необходимо для продвижения разработанного продукта на рынок.

Данный раздел, предусматривает рассмотрение следующих задач:

- оценка коммерческого потенциала разработки;
- планирование научно-исследовательской работы;
- расчет бюджета научно-исследовательской работы;
- определение ресурсной, финансовой, бюджетной эффективности исследования.

Цель данной ВКР – провести сравнительный анализ микроструктуры, микротвердости и механических характеристик прокатанных образцов Ti-6Al-4V и полученных методами аддитивных технологий. Микротвердость 3D-напечатанных образцов Ti-6Al-4V, характеризующихся столбчатыми

зернами с мартенситной структурой, сопоставима с микротвердостью прокатанных образцов Ti-6Al-4V, имеющих структуру бимодального типа.

4.1 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения

4.1.1 Анализ конкурентных технических решений

В процесс исследования рассматривались две конкурирующие разработки:

- 1) Получение титанового сплава Ti-6Al-4V методом электронно-лучевого плавления
- 2) Получение титанового сплава Ti-6Al-4V методом селективного лазерного спекания

В таблице 2 представлено сравнение разработок-конкурентов и разработки данного НИ с точки зрения технических и экономических критериев оценки эффективности.

Таблица 2 – Сравнение конкурентных технических решений (разработок)

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		Б _ф	Б _{к1}	Б _{к2}	К _ф	К _{к1}	К _{к2}
1	2	3	4	5	6	7	8
Технические критерии оценки ресурсоэффективности							
1.Точность	0,1	4	5	3	0,1	0,12	0,7
2.Низкая пористость	0,11	5	4	3	0,8	0,6	0,3
3.Высокая прочность	0,1	5	5	2	0,8	0,5	0,1
4. Высокая плотность	0,08	5	4	2	0,4	0,2	0,1
5. Технологичность	0,1	5	4	5	0,15	0,15	0,15
6. Эффективность работы	0,06	5	5	5	0,3	0,2	0,1

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		Б _ф	Б _{к1}	Б _{к2}	К _ф	К _{к1}	К _{к2}
1	2	3	4	5	6	7	8
Экономические критерии оценки эффективности							
1. Реализация продукта	0,1	5	5	5	0,5	0,5	0,3
2. Уровень охвата рынка	0,05	4	5	3	0,12	0,15	0,06
3. Предполагаемая цена	0,06	4	4	5	0,4	0,2	0,4
4. Предполагаемый срок эксплуатации	0,08	5	3	2	0,4	0,24	0,1
5. Финансирование научной разработки конкурентных товаров и разработок	0,08	5	4	1	0,3	0,2	0,1
6. Срок выхода на рынок	0,03	5	5	3	0,15	0,15	0,17
7. Наличие сертификации разработки	0,05	5	5	4	0,15	0,12	0,12
Итого	1	62	58	43	5,32	3,33	2,7

В результате проведенного анализа можно сделать вывод, что предлагаемое в данной ВКР решение обладает конкурентоспособностью.

4.1.2 SWOT-анализ

Для исследования внешней и внутренней среды проекта проведен SWOT-анализ, где детально продуманы сильные и слабые стороны научно-технической разработки. На втором этапе проведения SWOT-анализа составлены интерактивные матрицы проекта, в которых осуществлено выполнение анализа соответствия параметров SWOT каждого с каждым. Соотношения параметров представлены в таблицах 3–6.

Таблица 3 – Интерактивная матрица проекта «Возможности проекта и сильные стороны»

Сильные стороны проекта					
Возможности проекта		C1	C2	C3	C4
	B1	+	+	-	-
	B2	-	+	-	-
	B3	-	+	-	+

	B4	-	+	-	+
	B5	+	+	-	-

Таблица 4 – Интерактивная матрица проекта «Возможности проекта и слабые стороны»

Слабые стороны проекта					
Возможности проекта		Сл1	Сл2	Сл3	Сл4
	B1	-	-	-	+
	B2	-	-	-	-
	B3	-	-	-	-
	B4	-	-	-	-

Таблица 5 – Интерактивная матрица проекта «Угрозы проекта и сильные стороны»

Сильные стороны проекта					
Угрозы проекта		С1	С2	С3	С4
	У1	+	+	-	-
	У2	-	-	-	-

Таблица 6 – Интерактивная матрица проекта «Угрозы проекта и слабые стороны»

Слабые стороны проекта					
Угрозы проекта		Сл1	Сл2	Сл3	Сл4
	У1	-	-	-	+
	У2	-	+	-	-

Результаты выполнения SWOT-анализа представлены в таблице 7.

Таблица 7 – Результаты SWOT-анализа

	Сильные стороны научно-исследовательского проекта С1. Высокий уровень физико- и термомеханических свойств продукции С2. Экологичность технологии С3. Низкая стоимость исходного сырья С4. Высокая оптимизация материалов	Слабые стороны научно-исследовательского проекта Сл1. Риск нарушения правил безопасности и возникновения различных непредвиденных ситуаций Сл2. Невысокие объемы производства Сл3. Большой срок поставок материала, используемого при проведении научного исследования Сл4. Отсутствие инжиниринговой компании,
--	---	--

		способной построить производство под ключ
Возможности В1. Появление дополнительного спроса на новый продукт В2. Использование оборудования ИШНПТ ТПУ В3. Внедрение технологии в производство В4. Выход на зарубежные рынки	Направления развития В1С1. Высокий уровень физико- и термомеханических свойств продукции позволит расширить спрос В3С1С2. Высокий уровень физико- и термомеханических свойств продукции и экологичность технологии являются основанием для внедрения технологии в производство В4С1С3. Низкая стоимость исходного сырья и высокий уровень физико-механических свойств продукции является хорошим основанием для выхода на зарубежные рынки	Сдерживающие факторы В2Сл3. Новейшее оборудование позволит на ранних стадиях исследование выявить и сокращать срок поставок материала
Угрозы У1. Развитая конкуренция технологий производства У2. Разработка новых технологий конкурентами и снижение цен	Угрозы развития У1С1С3. Более ускоренные темпы разработки и производства и поиск технологического решения для ускорения технологического процесса	Уязвимости: У2Сл2. Разработка новых технологий для увеличения объема производства

Результаты проведенного SWOT-анализа учтены в процессе дальнейшей разработки структуры работ, которые необходимо выполнить в научно-исследовательском проекте.

4.2 Планирование научно-исследовательских работ

4.2.1 Структура работ в рамках научного исследования

Планирование работ предполагало определение структуры работ по проведению научного исследования, определение участников каждого вида

работ, установление продолжительности работ, построение графика проведения исследований. Перечень этапов, работ и распределение исполнителей по выполнению НТР представлены в таблице 8.

Таблица 8 – Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№ раб	Содержание работ	Должность исполнителя
Разработка технического задания	1	Составление и утверждение технического задания, утверждение плана-графика	Научный руководитель
	2	Календарное планирование выполнения ВКР	инженер, научный руководитель
Выбор способа решения поставленной задачи	3	Обзор научной литературы	инженер
	4	Выбор методов исследования	инженер
Теоретические и экспериментальные исследования	5	Планирование эксперимента	инженер, научный руководитель
	6	Проведение эксперимента	инженер
Обобщение и оценка результатов	7	Обработка полученных данных	инженер
	8	Анализ полученных результатов НИР	Научный руководитель
Оформление отчета по НИР (комплекта документации по ОКР)	9	Оценка правильности полученных результатов	инженер
	10	Оценка эффективности	инженер
	11	Составление пояснительной записки	инженер

4.2.2 Разработка графика проведения научного исследования

Определение трудоемкости выполнения научного исследования проведено экспертным путем в человеко-днях. Для определения ожидаемого (среднего) значения трудоемкости $t_{ожи}$ использована следующая формула:

$$t_{ожи} = \frac{3t_{мини} + 2t_{макси}}{5}, \quad (1)$$

где $t_{ожи}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения i -ой работы, человеко-дни;

$t_{\min i}$ – минимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы, человеко-дни;

$t_{\max i}$ – максимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы, человеко-дни.

Исходя из рассчитанной ожидаемой трудоемкости работ, была определена продолжительность каждого этапа работы (в рабочих днях T_p), учитывающая параллельность выполнения работ несколькими исполнителями, а также возможность выполнения нескольких видов работ в один временной промежуток. Далее с помощью формулы 2 рассчитана продолжительность одной работы в рабочих днях:

$$T_{pi} = \frac{t_{ожi}}{Ч_i}, \quad (2)$$

где T_{pi} – продолжительность одной работы, рабочие дни;

$t_{ожi}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения одной работы, человеко-дни;

$Ч_i$ – численность исполнителей, выполняющих одновременно одну и ту же работу на данном этапе, чел.

Расчеты временных показателей проведения научного исследования обобщены в таблице 9.

Таблица 9 – Временные показатели проведения научного исследования

Название работы	Трудоёмкость работ			Длительность работ в рабочих днях T_{pi}	Длительность работ в календарных днях T_{ki}
	t_{\min} , чел-дни	днях $T_{pi} t_{\max}$, чел-дни	$t_{ожi}$, чел-дни		

	Исп.1	Исп.2	Исп.1	Исп.2	Исп.1	Исп.2	Исп.1	Исп.2	Исп.1	Исп.2
1. Составление и утверждение технического задания, утверждение плана-графика	1	-	4	-	2,2	-	2,2	-	3	-
2. Календарное планирование выполнения ВКР	1	1	4	4	2,2	2,2	1,1	1,1	2	2
3. Обзор научной литературы	-	5	-	15	-	9	-	9	-	14
4. Выбор методов исследования	1	5	2	10	1,4	7	0,7	7	1	11
5. Планирование эксперимента	-	10	-	25	-	16	-	16	-	24
6. Проведение эксперимента	-	15	-	25	--	19	-	19	-	29
7. Обработка полученных данных	3	4	6	6	4,2	4,8	2,1	2,4	3	4
8. Анализ полученных результатов НИР	2	4	4	6	2,8	4,8	1,4	2,4	2	4
9. Оценка правильности полученных результатов	-	1		3	-	1,8	-	1,8	-	3
10. Оценка эффективности	-	5		10	-	7	-	7	-	11
11. Составление пояснительной записки	-	5		10	-	7	-	7	-	11
Итог	8	55	20	114	12,8	78,6	7,5	69,8	11	113

Примечание: Исп. 1 – научный руководитель, Исп. 2 – студент-инженер.

На основе таблицы составлен календарный план-график выполнения проекта с использованием диаграммы Ганта (таблица 10).

Таблица 10 – Диаграмма Ганта

№	Вид работ	Исп	T_{ki} кал. дн.	Продолжительность работ											
				февр			март			апр			май		
				1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	Составление и утверждение технического задания, утверждение плана-графика	Исп1	3												
2	Календарное планирование выполнения ВКР	Исп1 Исп2	2 2	 ■											
3	Обзор научной литературы	Исп2	14	■											
4	Выбор методов исследования	Исп1 Исп2	1 11		 ■										
5	Планирование эксперимента	Исп2	24				■								
6	Проведение эксперимента	Исп2	29						■						
7	Обработка полученных данных	Исп1 Исп2	3 4								 ■				
8	Анализ полученных результатов НИР	Исп1 Исп2	2 4								 ■				
9	Оценка правильности полученных результатов	Исп2	3										■		
10	Оценка эффективности	Исп2	11										■		
11	Составление пояснительной записки	Исп2	11												■

Примечание:

||| – Исп 1 (научный руководитель)

■ – Исп 2 (студент-инженер)

4.2.3 Бюджет научно-технического исследования

При планировании бюджета научно-технического исследования учитывались все виды расходов, связанных с его выполнением.

4.2.3.1 Расчет материальных затрат научно-технического исследования

Материальные затраты отражают стоимость приобретенных материалов и сырья, которые входят в состав вырабатываемой продукции, образуя ее основу, или являются необходимыми компонентами при изготовлении продукции (таблица 11).

Таблица 11 – Затраты на получение образца титанового сплава Ti-6Al-4V, изготовленных 3D-печати

Наименование статей	Количество, шт.	Цена за единицу, руб.	Итого затраты, руб.
Проволока титанового сплава Ti-6Al-4V ГОСТ 27265-87.	1 кг	3840	3840
Наждачная бумага	3 шт.	27	81
Спирт	100 мл	150	150
Защитные перчатки	5 шт.	8,5	15
Итого:			4086

4.2.3.2 Расчет амортизации специального оборудования

Расчет амортизации производится на находящееся в использовании оборудование. В итоговую стоимость проекта входят отчисления на амортизацию за время использования оборудования в статье накладных расходов (таблица 12).

Таблица 12 – Затраты на оборудование

№	Наименование оборудования	Кол-во, шт.	Срок полезного использования, лет	Цена единицы оборудования, тыс. руб.	Общая стоимость оборудования, тыс. руб.
1	Установка электронно-лучевая плавка Teta 6E400	1	15	60млн.	60 млн.
2	Установка XRD-7000	1	15	12 млн.	12 млн.
3	Микротвердомер ПМТ-3М	1	5	320 тыс.	320 тыс.
Итого:		72,32 млн. руб.			

Расчет амортизации проводится следующим образом:

Норма амортизации:

$$H_A = \frac{1}{n}, \quad (3)$$

где n – срок полезного использования в количестве лет.

Амортизация :

$$A = \frac{H_A I}{12} \cdot m, \quad (4)$$

где I – итоговая сумма, тыс. Руб. ; m – время использования, мес.

Рассчитаем амортизацию для установки электронно-лучевой плавки, с учётом, что срок полезного использования 15 лет :

$$H_A = \frac{1}{n} = \frac{1}{15} = 0,067 \quad (5)$$

Рассчитаем амортизацию для Микротвердомера ПМТ-3М, с учётом, что срок полезного использования 5 лет :

$$H_A = \frac{1}{n} = \frac{1}{5} = 0,2 \quad (6)$$

Общую сумму амортизационных отчислений находим следующим образом:

Установка электронно-лучевая плавка Teta 6E400:

$$A = \frac{H_{\text{ЛЛ}}}{12} \cdot m = \frac{0,067 \cdot 60000000}{12} \cdot 1 = 335000 \text{ руб.} \quad (7)$$

Установка XRD-7000:

$$A = \frac{H_{\text{ЛЛ}}}{12} \cdot m = \frac{0,067 \cdot 12000000}{12} \cdot 1 = 67000 \text{ руб.} \quad (8)$$

Микротвердомер ПМТ-3М:

$$A = \frac{H_{\text{ЛЛ}}}{12} \cdot m = \frac{0,2 \cdot 320000}{12} \cdot 1 = 5325 \text{ руб.} \quad (9)$$

Суммарные затраты амортизационных отчислений:

$$A = 335000 + 67000 + 5325 = 407325 \text{ руб.}$$

4.2.3.3 Основная заработная плата исполнителей темы

В данном разделе рассчитывается заработная плата инженера и руководителя, помимо этого необходимо рассчитать расходы по заработной плате, определяемые трудоемкостью проекта и действующей системой оклада.

Основная заработная плата $З_{\text{осн}}$ одного работника рассчитывается по следующей формуле:

$$З_{\text{осн}} = З_{\text{он}} \cdot T_p, \quad (10)$$

где $З_{\text{он}}$ - среднедневная заработная плата, руб. ; T_p - продолжительность работ, выполняемых работником, раб.дн. (таблица 9).

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле 11:

Для шестидневной рабочей недели (рабочая неделя руководителя) :

$$З_{\text{он}} = \frac{З_{\text{м}} \cdot M}{F_{\text{о}}} = \frac{51285 \cdot 10,4}{246} = 2168,1 \text{ руб.} \quad (11)$$

где $З_m$ – должностной оклад работника за месяц; F_o – действительный годовой фонд рабочего времени исполнителей, раб.дн.; M – количество месяцев работы без отпуска в течение года:

– при отпуске в 28 раб. Дня – $M = 11,2$ месяца, 5-дневная рабочая неделя;

– при отпуске в 56 раб. Дней – $M = 10,3$ месяца, 6-дневная рабочая неделя.

Для пятидневной рабочей недели (рабочая неделя инженера) :

$$З_{он} = \frac{З_m \cdot M}{F_o} = \frac{33150 \cdot 11,2}{213} = 1743,1 \text{ руб.} \quad (12)$$

Должностной оклад работника за месяц :

– для руководителя:

$$З_m = З_{мс} \cdot (1 + k_{np} + k_o) k_p = 26300 \cdot (1 + 0,3 + 0,2) \cdot 1,3 = 51285 \text{ руб.} \quad (13)$$

– для инженера:

$$З_m = З_{мс} \cdot (1 + k_{np} + k_o) k_p = 17000 \cdot (1 + 0,3 + 0,2) \cdot 1,3 = 33150 \text{ руб.}, \quad (14)$$

где $З_{мс}$ – заработная плата, согласно тарифной ставке, руб.; k_{np} – премиальный коэффициент, равен 0,3; k_o – коэффициент доплат и надбавок, равен 0,2; k_p – районный коэффициент, равен 1,3 (для г. Томска).

В таблицах 13 и 14 соответственно представлены баланс рабочего времени исполнителей и основной заработной платы исполнителей.

Дополнительная заработная плата определяется по формуле:

– для руководителя:

Таблица 13 – Баланс рабочего времени исполнителей [19]

Показатели рабочего времени	Руководитель	Инженер
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней - выходные дни - праздничные дни	52/14	104/14
Потери рабочего времени - отпуск - невыходы по болезни	48/5	24/10
Действительный годовой фонд рабочего времени	246	213

Таблица 14 – Расчет основной заработной платы исполнителей

Исполнители НИ	$З_{мс}, руб$	k_{np}	k_o	k_p	$З_m, руб$	$З_{он}, руб$	$T_p, раб.дн.$	$З_{осн}, руб$
Руководитель	26300	0,3	0,2	1,3	51285	2147,3	11	23620,3
Инженер	17000	0,3	0,2	1,3	33150	1743,1	113	196970,3
Итого:								220590,6

$$З_{доп}=k_{доп} \cdot З_{осн}=0,15 \cdot 23620,3=3543,045 \text{ руб.} \quad (15)$$

– для инженера:

$$З_{доп}=k_{доп} \cdot З_{осн}=0,15 \cdot 196970,3=29545,545 \text{ руб.} \quad (16)$$

где $k_{доп}$ – коэффициент дополнительной заработной платы (на стадии проектирования принимаем равным 0,15).

4.2.3.4 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)

Отчисления во внебюджетные фонды определяется по формуле:

Для руководителя:

$$З_{внед}=k_{внед}(З_{осн}+З_{доп})=0,3 \cdot (23620,3+3543,045)=8149 \text{ руб.} \quad (17)$$

Для инженера:

$$З_{внед}=k_{внед}(З_{осн}+З_{доп})=0,3 \cdot (196970,3+29545,545)=67954,8 \text{ руб.} \quad (18)$$

где $k_{внеб}$ – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд ОМС и социальное страхование). Общая ставка взносов составляет в 2020 году – 30% (ст. 425, 426 НК РФ).

4.2.3.5 Накладные расходы

Накладными расходами учитываются прочие затраты организации, такие как: печать и ксерокопирование проектировочных документов, оплата услуг связи.

Накладные расходы в целом:

$$З_{накл} = (\text{сумма статей}) \cdot k_{нр} = 741193,9 \cdot 0,2 = 148238,8 \text{ руб.} \quad (19)$$

где $k_{нр}$ – коэффициент, учитывающий накладные расходы. Величина коэффициента принимается равной 0,2.

На основании полученных данных по отдельным статьям затрат составляется калькуляция плановой себестоимости НИ «Микроструктура и механические свойства образцов из титанового сплава Ti-6Al-4V, полученных методом аддитивных технологий» по форме, приведенной в таблице 15.

Таблица 15 – Группировка затрат по статьям

Статьи							
Амортизация	Сырье, материалы	Основная заработная плата	Дополнительная заработная плата	Отчисления на социальные нужды	Итого без накладных расходов	Накладные расходы	Итого бюджетная стоимость
407325	4086	220590,6	33088,6	76103,8	741193,9	148238,8	889432,7

4.3 Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования

Для определения эффективности исследования рассчитан интегральный показатель эффективности научного исследования путем определения интегральных показателей финансовой эффективности и ресурсоэффективности.

Интегральный показатель финансовой эффективности научного исследования получен в ходе оценки бюджета затрат трех вариантов исполнения научного исследования. Для этого наибольший интегральный показатель реализации технической задачи принят за базу расчета (как знаменатель), с которым соотносятся финансовые значения по всем вариантам исполнения.

В качестве аналогов данной НТР рассмотрены:

- 1) Получение титанового сплава Ti-6Al-4V методом электронно-лучевого плавления
- 2) Получение титанового сплава Ti-6Al-4V методом селективного лазерного спекания

Интегральный финансовый показатель вариантов выполнения проектируемого объекта определялся по формуле:

$$I_{\text{финр}}^{\text{Var.i}} = \frac{\Phi_{\text{pi}}}{\Phi_{\text{max}}}, \quad (20)$$

где $I_{\text{финр}}^{\text{Var.i}}$ – интегральный финансовый показатель разработки;

Φ_{pi} – стоимость i -го варианта исполнения;

Φ_{\max} – максимальная стоимость исполнения научно-исследовательского проекта.

$$I_{\text{финр}}^{\text{Вар.1}} 933000/933000 = 1$$

$$I_{\text{финр}}^{\text{Вар.2}} 908300,5/933000 = 0,97$$

$$I_{\text{финр}}^{\text{Вар.3}} 889432,7/933000 = 0,95$$

В результате расчета интегрального финансового показателя по трем вариантам разработки вариант 3 (данная НТР) с небольшим перевесом признан более приемлемым с точки зрения финансовой эффективности.

Интегральный показатель ресурсоэффективности вариантов выполнения НТР (I_{pi}) определен путем сравнительной оценки их характеристик, распределенных с учетом весового коэффициента каждого параметра (таблица 16).

Таблица 16 – Сравнительная оценка характеристик вариантов НТР

Объект исследования Критерии	Весовой коэффициент параметра	Вар.1	Вар.2	Вар.3
1. Безопасность при использовании установки	0,2	4/0,8	4/0,8	4/0,8
2. Стабильность работы	0,2	3/0,45	2/0,3	4/0,8
3. Технические характеристики	0,4	4/08	2/0,3	5/1
4. Ремонтопригодность	0,2	4/0,8	5/1	5/1
ИТОГО	1	15/2,85	13/2,6	18/3,6

$$I_{p-\text{вар1}} = 2,85;$$

$$I_{p-\text{вар3}} = 2,6;$$

$$I_{p-\text{вар2}} = 3,2;$$

На основании полученных интегрального финансового показателя и интегрального показателя ресурсоэффективности был рассчитан интегральный показатель эффективности вариантов исполнения разработки ($I_{вари}$) по формуле:

$$I_{вари} = \frac{I_{р-вари}}{I_{финр}} \cdot \quad (21)$$

$$I_{вар1} = \frac{2,85}{1} = 2,85, I_{вар2} = \frac{2,6}{0,97} = 2,68, I_{вар3} = \frac{3,2}{0,95} = 3,37$$

Далее интегральные показатели эффективности каждого варианта НТР сравнивались с интегральными показателями эффективности других вариантов с целью определения сравнительной эффективности проекта (таблица 17).

Таблица 17 – Сравнительная эффективность разработки

№ п/п	Показатели	Вар. 1	Вар. 2	Вар. 3
1	Интегральный финансовый показатель разработки	1	0,97	0,95
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	2,85	2,6	3,2
3	Интегральный показатель эффективности	2,9	2,6	3,3
4	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	Вар.1/Вар.2 = 1,09 Вар. 1/Вар. 3 = 0,9	Вар. 2/Вар. 1 = 0,91 Вар. 2/Вар. 3 = 0,83	Вар. 3/Вар. 1 = 1,1 Вар. 3/Вар. 2 = 1,2

Сравнение среднего интегрального показателя сопоставляемых вариантов позволило сделать вывод о том, что наиболее финансово- и ресурсоэффективным является вариант 3 (данная разработка), т. к. показатель

его сравнительной эффективности по отношению к каждому из сравниваемых вариантов больше 1.

Выводы по разделу

В результате выполнения целей раздела можно сделать следующие выводы:

1. Результатом проведенного анализа конкурентных технических решений является выбор одного из вариантов реализации НТР как наиболее предпочтительного и рационального по сравнению с остальными.

2. При проведении планирования был разработан план-график выполнения этапов работ для руководителя и инженера, позволяющий оценить и спланировать рабочее время исполнителей. Определено следующее: общее количество календарных дней для выполнения работы – 124 дней; общее количество календарных дней, в течение которых работал инженер, – 113; общее количество календарных дней, в течение которых работал руководитель, – 11;

3. Составлен бюджет проектирования, позволяющий оценить затраты на реализацию проекта, которые составляют 889432,7 руб;

4. По факту оценки эффективности ИР, можно сделать выводы:

1) значение интегрального финансового показателя ИР составляет 0,95, что является показателем того, что ИР является финансово выгодной по сравнению с аналогами;

2) значение интегрального показателя ресурсоэффективности ИР составляет 3,2 по сравнению с 2,6 и 2,85;

3) значение интегрального показателя эффективности ИР составляет 3,3, по сравнению с 2,6 и 2,9, и является наиболее высоким, что означает, что техническое решение, рассматриваемое в ИР, является наиболее эффективным вариантом исполнения.

ГЛАВА 5. СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ

Объектом данного исследования являются образцы из титанового сплава Ti-6Al-4V, полученные методом аддитивных технологий. В ходе работы использовались дифрактометр, микротвердомер, низкоскоростная пила.

В данном разделе рассмотреть, какие опасные и вредные факторы могут влиять на лаборанта, проводящего исследование образцов титанового сплава, и как данное исследование влияет на окружающую среду. Также следует охарактеризовать правила электробезопасности и безопасности в чрезвычайных ситуациях.

5.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

5.1.1 Специальные (характерные для рабочей зоны исследователя) правовые нормы трудового законодательства

На производстве требуется соблюдение норм Трудового кодекса Российской Федерации от 30.12.2001 №197-ФЗ (Ред.от 02.12.2019) [20].

Некоторые виды деятельности в нанотехнологических лабораториях относятся к видам работ в тяжелых и вредных условиях. Для таких работников Российское законодательство предполагает гарантии повышенной оплаты труда, сокращенной продолжительности рабочего времени, дополнительного оплачиваемого отпуска, обеспечения лечебно-профилактическим питанием, досрочного назначения трудовой пенсии. Компенсации и гарантии

устанавливают в соответствии с трудовым кодексом РФ, а также локальными нормативными актами, коллективным договором, трудовым договором.

5.1.2 Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны исследователя

Рабочее место располагается на 0 этаже в аудитории, помещение представляет собой комнату размером 6 м на 7 м, высотой 3 м, 1 окно выходящих на север, в помещении находится (4 единиц технологического оборудования, 4 людей). Остальное при анализе по разделам.

При проведении лабораторных работ работник лаборатории находится в положении стоя или сидя. На основании этого организация рабочего места специалиста должна соответствовать требованиям ГОСТ 12.2.032-78 [21] и ГОСТ 12.2.033-78 [22].

В рабочей зоне установлены отопление, вентиляция или кондиционер. Для отделки помещений необходимо использовать диффузно-отражающие материалы. Следует, чтобы поверхность пола была ровная, нескользкая, удобная, без выбоин, с антистатическими свойствами. Помещение необходимо оборудовать аптечкой первой медицинской помощи, углекислотным огнетушителем для тушения пожара.

Рабочий стол может быть любой конструкции, отвечающей современным требованиям эргономики и позволяющей удобно разместить на рабочей поверхности оборудование с учетом его количества, размеров и характера выполняемой работы. Конструкцией рабочего места должно быть

обеспечено выполнение трудовых операций в пределах зоны досягаемости моторного поля. Рабочие столы должны располагаться удобно, чтобы обеспечивать удобство работы за ними и давать возможность осмотра и ремонта оборудования.

5.2 Производственная безопасность

Были выявлены потенциальные вредные и опасные производственные факторы (ГОСТ 12.0.003-2015), которые могут воздействовать на исследователя в процессе изучения фазовых превращений в образцах титана ВТ6 при нагружении (таблица 18).

Таблица 18 – Возможные опасные и вредные факторы

Факторы (ГОСТ 12.0.003-2015)	Этапы работ			Нормативные документы
	Разработ ка	Изготовл ение	Эксплуат ация	
1. Превышение уровня шума		+		ГОСТ 12.1.003-2014 [24] ГОСТ 12.1.029-80 [25] СН 2.2.4/2.1.8.562-96 [26]
2. Отклонение показателей микроклимата	+	+	+	СанПиН 2.2.4.548-96 [27] ГОСТ 12.1.005-88 [28]
3. Повышенное значение напряжения в электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело человека	+	+	+	ГОСТ 12.1.019-2017 [29] ГОСТ 12.1.038-82 [30]
4. Недостаточная освещенность рабочей зоны	+	+	+	СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03 [31] СП 52.13330.2016 [32]
5. Чрезмерное загрязнение воздушной среды в зоне дыхания		+		СанПиН 2.2.4.548-96 [27] ГОСТ 12.1.005-88 [28] ГН 2.2.5.3532-18 [33] ГОСТ 12.1.007-76 [34]

				ГОСТ 12.4.011-89 [35]
--	--	--	--	-----------------------

5.2.1 Анализ опасных и вредных производственных факторов

5.2.1.1 Анализ показателей шума

Требования к уровню шума представлены в ГОСТ 12.1.003-2014 [24] и СН 2.2.4/2.1.8.562- 96 [26] (таблица 19).

Таблица 19 – Предельно допустимые уровни звука и эквивалентные уровни звука на рабочих местах для трудовой деятельности разных категорий тяжести и напряжённости, в дБА [26]

Категория напряжённости трудового процесса	Категория тяжести трудового процесса				
	лёгкая физическая нагрузка	средняя физическая нагрузка	тяжёлый труд 1 степени	тяжёлый труд 2 степени	тяжёлый труд 3 степени
Напряжённость легкой степени	80	80	75	75	75
Напряжённость средней степени	70	70	65	65	65
Напряжённый труд 1 степени	60	60	-	-	-
Напряжённый труд 2 степени	50	50	-	-	-

Работа специалиста по материаловедению в лаборатории относится к категории работ с легкой степенью по напряженности и с легкой физической нагрузкой. Для рабочих мест таких работников предельно допустимый уровень шума составляет 80 дБА [26].

Прибором в лаборатории, издающим шум, является дифрактометр.

Длительное влияние шума вызывает тугоухость, снижение работоспособности и ослабления слухового аппарата.

5.2.1.2 Анализ показателей микроклимата

Микроклимат включают следующие показатели: температуру и относительную влажность воздуха, скорость его движения, а также степень интенсивность теплового излучения.

Оптимальные и допустимые показатели микроклимата в рабочей зоне производственного помещения для категории работ, «Легкая Ia» по ГОСТ 12.1.005-88 [28] представлены в таблице 20.

Таблица 20 - Требования к микроклимату помещения для категории работ «Лёгкая Ia» [28]

Период года	Температура, °С					Относительная влажность, %		Скорость движения, м/с	
	оптимальная	допусти мая				оптимальная	допустимая на рабочих местах постоянных и непостоянных, не более	оптимальная, не более	допустима я на рабочих местах постоянных и
		верхняя граница		нижняя граница					
		на рабочих местах							
		посто- янных	не- посто- янных	пос- тоян- ных	не- посто- янных				
Холод- ный	22- 24	25	26	21	18	40-60	75	0,1	Не более 0,1
Теплый	23- 25	28	30	22	20	40-60	55 (при 28°С)	0,1	0,1- 0,2

От микроклимата в рабочей зоне зависят здоровье человека и надежность его работы. Микроклимат является важным фактором здоровья работающего, а также качества его работы.

Лаборатория, в которой проводилось исследование, находится в подвальном помещении. В таких помещениях есть опасность высокого уровня влажности, а также недостаточной скорости движения воздуха в связи с отсутствием больших окон.

Требования к воздуху рабочей зоны установлены стандартом ГОСТ 12.1.005-88 [28], устанавливающим допустимое содержание в воздухе рабочей зоны вредных веществ.

Содержание вредных веществ в воздухе нужно регулярно контролировать.

В процессе выполнения данной ВКР в лаборатории при шлифовании образцов титана возможно появление титановой пыли. Данное вещество относится к четвертому классу опасности – малоопасные вещества [33], его ПДК – 10мг/м³ [34].

Превышенная концентрация вредных веществ в воздухе рабочей зоны может привести к головокружению, раздражению кожного покрова и расстройству кишечного тракта.

5.2.1.3 Анализ электробезопасности

Электрический ток выступает в качестве повышенного источника опасности. В таблице 21 указаны предельно допустимые значения электрического тока при нормальном режиме работы электроустановка.

Таблица 21 – Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов

Род тока	U , В	I , мА
	не более	
Переменный, 50 Гц	2,0	0,3
Переменный, 400 Гц	3,0	0,4
Постоянный	8,0	1,0

Источниками поражения током могут быть розетка, проводка, выключатель, а также открытые металлические участки электроприборов. К

основным причинам поражения током относится случайное прикосновение к токоведущим частям, появление напряжения в результате повреждения изоляции, появление напряжения вследствие ошибочного включения оборудования, напряжение на поверхности в результате замыкания проводки на этой поверхности.

Электрический ток оказывает на человека термическое воздействие (ожог, функциональное расстройство органов в результате их нагрева), электрическое воздействие (разложение органических жидкостей), механические (разрыв, расслоение тканей организма) и биологическое (судорога, спазм, сокращения мышцы, проводящие к нарушению деятельности органов дыхания и кровообращения).

Классификация помещения по электрической опасности, категория помещения оказывает мало опасные помещения.

5.2.1.4 Анализ освещенности рабочей зоны

Нормы освещения научно-технических лабораторий, в том числе физических, стилметрических, спектрографических ит.п., по СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03 [31] представлены в таблице 22.

Исследуемые в работе образцы титана имеют размер более 5 мм, соответственно, работы исследователя относятся к категории зрительных работ VI.

Нормы разных видов освещения для промышленных помещений со зрительными работами шестого разряда [32] представлены в таблице 23.

Таблица 22 – Нормируемые показатели естественного, искусственного и совмещённого освещения научно-технических лабораторий [31]

Рабочая поверхность и плоскость нормирования КЕО и освещённости (Г – горизонтальная, В – вертикальная) и высота плоскости над полом, м	Естественное освещение КЕО e_n , %		Совмещённое освещение КЕО e_n , %		Искусственное освещение				
	при верхнем или комбинир ованном освещении	при боковом освещен ии	при верхнем или комбинир ованном освещении	при боковом освещен ии	Освещенность, лк		Показа тель диском форта, М, не более	Коэффици ент пульсаций освещённо сти, КЕО e_n , %, не более	
					при комбинир ованном освещении	при общем освеще нии			
									всег о
Г-0,8	3,5	1,2	2,1	0,7	500	300	400	40	10

Таблица 23 – Требования к освещению помещений промышленных предприятий (для категории VI) [22]

Искусственное освещение				
Освещенность, лк			Сочетание нормируемых величин объединенного показателя дискомфорта UGR и коэффициента пульсации	
при системе комбинированного освещения		при системе общего освещения	UGR, не более	К _п , %, не более
Всего	В том числе от общего			
-	-	200	25	20

Длительная работа при недостаточном освещении приводит к увеличению зрительной нагрузки и появлению астигматизма, близорукости и т.п.

Дано помещение с размерами: длина $A = 7$ м, ширина $B = 6$ м, высота H

= 3 м. Высота рабочей поверхности $h_{\text{рп}} = 1,1$ м. Требуется создать освещенность $E = 300$ лк.

Коэффициент отражения стен $R_c = 30 \%$, потолка $R_n = 50 \%$.

Коэффициент запаса $k = 1,5$, коэффициент неравномерности $Z = 1,1$.

Рассчитываем систему общего люминесцентного освещения.

Выбираем светильники типа ОД, $\lambda = 1,4$. Приняв $h_c = 0,5$ м,

определяем расчетную высоту:

$$h = H - h_c - h_{\text{рп}} = 3 - 0,5 - 1,1 = 1,4 \text{ м};$$

Расстояние между светильниками:

$$L = 1,4 * 1,4 = 1,96 \text{ м};$$

Расстояние от крайнего ряда светильников до стены: $L/3 = 0,65$ м.

Определяем количество рядов светильников и количество светильников в ряду:

$$n_{\text{ряд}} = \frac{(B - \frac{2}{3}L)}{L} + 1 \approx 3$$

$$n_{\text{св}} = \frac{A - \frac{2}{3}L}{l_{\text{св}} + 0,5} \approx 3$$

Размещаем светильники в три ряда. В каждом ряду можно установить 3 светильников типа ОД мощностью 40 Вт (с длиной 1,23 м), при этом разрывы между светильниками в ряду составят 50 см. Изображаем в масштабе план помещения и размещения на нем светильников (Рисунок 21). Учитывая, что в каждом светильнике установлено две лампы, общее число ламп в помещении $N = 18$.

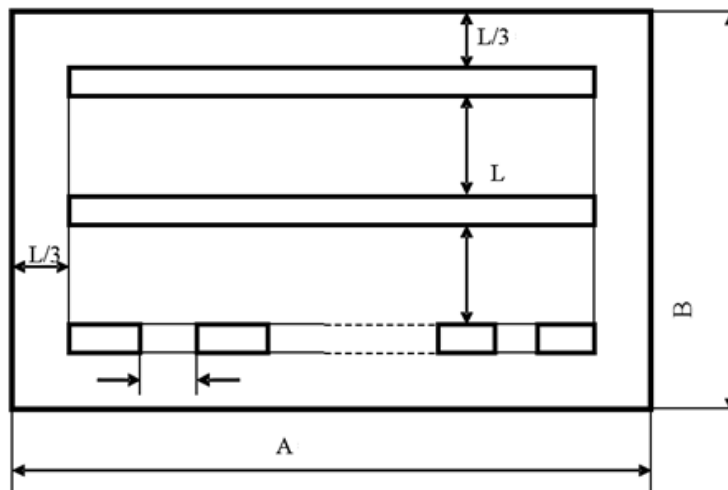


Рисунок 21 - План помещения и размещения светильников с люминесцентными лампами

Находим индекс помещения

$$i = S/h(A+B) = 42 / (1,4(6 + 7)) = 2,3$$

коэффициент использования светового потока: $\eta = 0,48$.

Определяем потребный световой поток ламп в каждом из рядов:

$$\Phi = \frac{E_n \cdot S \cdot K_z \cdot Z}{N_a \cdot \eta} = \frac{300 \cdot 42 \cdot 1,5 \cdot 1,1}{18 \cdot 0,48} = 2406,25$$

Определяем электрическую мощность осветительной установки

$$P = 18 \cdot 40 = 720 \text{ Вт.}$$

5.2.2 Обоснование мероприятий по снижению уровней воздействия опасных и вредных факторов на работающего

5.2.2.1 Снижение уровня шума на рабочем месте

Показатели уровня шума в лаборатории соответствуют нормативным.

Если уровень шума превышает нормы, необходимо принимать меры по снижению уровня шума и защите работников от его воздействия в соответствии с [25]:

- звукоизолирующие элементы,
- рациональное планирование режима труда,
- индивидуальные средства защиты.

5.2.2.2 Улучшение показателей микроклимата

Соответствие показателей микроклимата нормам необходимо регулярно проверять посредством измерений данных показателей по требованиям, указанным в СанПиН 2.2.4.548-96 [27].

Для улучшения микроклимата в лаборатории используется вентиляция.

5.2.2.3 Обеспечение электробезопасности

Электробезопасность является совокупностью технических и организационных средств и мероприятий, которые обеспечивают защиту людей от воздействия тока.

Обеспечению электробезопасности служит [29]:

- диэлектрические перчатки,
- указатели напряжения,
- изолирующие подставки,
- инструмент с изолирующими ручками.

5.2.2.4 Контроль освещенности в лаборатории

Для правильного освещения рабочего места необходимо верно выбрать вид освещения, количество и расположение ламп, тип осветительных приборов. Лаборатория должна быть освещена верхним общим освещением. В лаборатории используются люминесцентные лампы, расположенные на

потолке в виде прерывистых линий. Используемое в лаборатории освещение обеспечивает достаточную освещенность рабочей поверхности, освещенность стабильная, без блескости и без теней.

При необходимости выполнения более тонких зрительных работ применяется имеющееся в лаборатории дополнительное местное освещение (светильники, настольные лампы). Специальное оборудование для лабораторных исследований (микроскоп, твердомер, дифрактометр) снабжено встроенными осветительными приборами.

5.2.2.5 Мероприятия по снижению уровня загрязнения воздушной среды в зоне дыхания

В организациях, деятельность которых связана с вредными веществами, должны быть выполнены комплексы медико-биологических, санитарно-гигиенических и организационно-технических мероприятий:

- соблюдение герметичности оборудования,
- регулярная уборка помещений,
- применение средств индивидуальной защиты (респираторов/масок, очков, перчаток),
- контроль содержания вредных веществ на рабочем месте [35].

5.3 Экологическая безопасность

Одним из возможных вредных факторов для атмосферы при исследовании свойств титановых сплавов может быть распространение порошка Ti в воздушной среде.

Средства защиты атмосферного воздуха от выбросов включают очистку вредных выбросов в специальных аппаратах (циклоны, фильтры и т.п.) и рассеивание очищенных выбросов в воздухе. Выбросы порошка, появляющиеся при проведении исследования, не превышают ПДК [36].

Для проведения исследования используются пила, в процессе работы которой с целью понижения температуры образца применяется вода. При этом вредные вещества через водопроводную систему могут попадать в почву и в воду. Для очистки воды от вредных веществ используют механические, химические, физико-химические, биологические и термические методы. Избыточное количество вредных веществ в воде опасно для людей, животных и растений. Количество отходов, попадающих в процессе исследования в воду, не превышает ПДК [37].

В ходе проведения исследования образуются твердые отходы: образец, салфетка для очистки. Попадая в почву, порошковые материалы могут менять ее состав, что негативно влияет на находящиеся там живые организмы. Утилизация вредных твердых отходов должна осуществляться в соответствии с действующим законодательством.

Таким образом, проведение исследования не наносит вред атмосфере, гидросфере и литосфере.

5.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях

Под чрезвычайными ситуациями понимают опасные события или явления, в связи с которыми нарушается безопасность жизнедеятельности.

Основные причины возникновения чрезвычайных ситуаций разделяют на 2 категории: 1) внешние – стихийные бедствия, сильные морозы зимой, неожиданное прекращение подачи электроэнергии, воды, технологических продуктов и т.д.; 2) внутренние – сложность технологий, недостаточная квалификация персонала, проектно-конструкторские недоработки, физический и моральный износ оборудования, низкая трудовая и технологическая дисциплина и т.п.

В лаборатории наиболее вероятно возникновение чрезвычайных ситуаций техногенного характера. На случай возникновения чрезвычайной ситуации в лаборатории должен быть предусмотрен следующий комплекс мероприятий: 1) необходимо эвакуировать людей или укрыть их людей в защитных сооружениях; 2) обеспечить людей индивидуальными средствами защиты; 3) организовать медицинскую помощь пострадавшим.

Анализ пожарной безопасности

Наиболее распространенная вероятная ЧС в лаборатории – это пожар. Помещение лаборатории по степени пожароопасности относится к классу П-2, т.к. в нем присутствует выделение пыли и волокон во взвешенном состоянии [38].

Пожар может быть вызван следующими причинами:

- неосторожное обращение с огнем;
- оставление без присмотра нагревательных приборов;
- использование открытого огня;
- самовоспламенение и самовозгорание веществ.

Во избежание пожара в лаборатории необходимо обеспечить правильный тепловой и электрический режим работы оборудования. Все сотрудники лаборатории должны пройти противопожарный инструктаж.

Пожарный инвентарь и первичные средства пожаротушения должны содержаться в исправном состоянии и находиться на видном и легко доступном месте.

Если в лаборатории возник пожар, то после ликвидации пожара формируют комиссию, определяющую возможность дальнейшего использования лабораторного оборудования, которое проверяют на соответствие требованиям пожарной безопасности. При отсутствии повреждений возможно продолжение работ [39].

На рабочем месте отсутствуют горючие газы, пыли или волокна, а существуют твердые горючие и трудногорючие вещества и материалы. И удельная пожарная нагрузка не превышает $180 \text{ МДж} \cdot \text{м}^{-2}$. Таким образом, определяет категорию помещения по пожаровзрывоопасности-V4.

Выводы по разделу

В данном разделе рассмотрены опасные и вредные факторы, которые могут влиять на лаборанта, проводящего исследование образцов титанового сплава: превышение уровня шума, отклонение показателей микроклимата, недостаточная освещенность рабочей зоны, чрезмерное загрязнение воздушной среды в зоне дыхания. Чтобы улучшить безопасность рабочего места надо снижать уровень шума, установить больше осветители,

использоваться вентиляция в лаборатории и снижать уровня загрязнения воздушной среды в зоне дыхания. Охарактеризованы правила электробезопасности и пожарной безопасности. Выявлено, что проведение исследования не наносит существенного вреда экологии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленная работа посвящена актуальной задаче – анализу возможности взаимозаменяемости проката методами аддитивных технологий для производства изделий из титанового сплава Ti-6Al-4V. В работе выполнен подробный анализ литературных данных, посвященных тематике выпускной квалификационной работы, описаны основные методы аддитивных технологий. Показано, что наиболее перспективным является произвольное электронно-лучевое плавление.

Методами оптической, растровой и просвечивающей электронной микроскопии детально исследована микроструктура образцов из титанового сплава Ti-6Al-4V, полученного с помощью проката и 3D-печати. Показано, что после проката в тройных стыках равноосных зерен α -фазы происходит выделение зерен β фазы со средним размером зерна 500 нм. В то время как в результате произвольного электронно-лучевого плавления, в первичных зернах β -титана формируются отдельные пластины α -фазы, поперечные размеры которых составляют 5-10 мкм, а их длина достигает 100 мкм. В свою очередь, по границам α -пластин выделяются прослойки β -фазы толщиной 200 и 500 нм у поверхности образца и в его объеме, соответственно. Меньшая толщина прослоек у поверхности образцов обусловлена более быстрым его охлаждением. Подобная фрагментация в виде осаждения наноразмерных зерен в поверхностном слое обуславливают их повышенную микротвердость (3,5 ГПа) по сравнению с прокатанным состоянием (3,18 ГПа). При этом прочностные характеристики напечатанных образцов незначительно уступают

прочности прокатанных образцов. Таким образом, в работе продемонстрирована способность производить детали методом произвольного электронно-лучевого плавления, механические свойства которых сопоставимы с эксплуатационными характеристиками титанового сплава Ti-6Al-4V.

В работе разработан раздел «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение». Рассчитанные в разделе значения интегрального финансового показателя и интегрального показателя ресурсоэффективности (0,95 и 3,2, соответственно) свидетельствуют о том, что исследовательская работа является финансово выгодной и ресурсоэффективной.

В рамках раздела «Экологическая и производственная безопасность» рассмотрены основные вопросы техники безопасности, выполнен подробный анализ условий труда на рабочем месте. Предложен комплекс защитных мероприятий по предупреждению пожаров, чрезвычайных ситуаций и охране окружающей среды.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Илларионов, А. Г. Технологические и эксплуатационные свойства титановых сплавов. – М.: Изд-во Урал. ун-та, 2014. – 137 с.
2. Богдан Т.В. ОСНОВЫ РЕНТГЕНОВСКОЙ ДИФРАКТОМЕТРИИ [Электронный ресурс]. – режим доступа: http://www.chem.msu.su/rus/lab/phys/crychem/lectures/man_bogdan.pdf (дата обращения: 04.04.2020)
3. Рентгенографический и электронно- оптический анализ. Горелик С.С., Скаков Ю.А., Расторгуев Л. Н.: Учеб. Пособие для вузов. –3-е изд. Доп. И перераб. – М.: МИСИС, 1994. –328 с.
4. Курзина И.А., Годымчук А.Ю., Качаев А.А. Рентгенофазовый анализ нанопорошков. – М.: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. – 14 с.
5. Трушин В.Н., Андреев П.В., Фаддеев М.А. Рентгеновский фазовый анализ поликристаллических материалов [Электронный ресурс]. – режим доступа: <http://www.unn.ru/pages/e-library/methodmaterial/files/andreev.pdf> (дата обращения: 05.04.2020)
6. Guo Liwei, Dai Hongbin, Li Aibin. Modern material analysis and testing methods. – М.: Ordnance Industry Press, 2008. –236 с.
7. Пушаровский Д.Ю. Рентгенография минералов. – М.: ЗАО 'Гео информмарк', 2000. – 292 с.
8. Черепанов В.А. Учебно-методический комплекс дисциплины

Рентгеновские и нейтронные методы исследования наноматериалов.
[Электронный ресурс]. – режим доступа:
http://elar.urfu.ru/bitstream/10995/1315/4/1324741_methodbook.pdf(дата
обращения: 05.04.2020)

9. Рентгенография. Качественный рентгенофазовый анализ: учебное пособие / Л. Н. Мони́на; Министерство образования и науки Российской Федерации, Тюменский государственный университет, Институт химии. –М.: Издательство Тюменского государственного университета, 2016. – 120 с.
10. А.К. Штольц., А.И. Медведев., Л.В. Курбатов. Рентгеновский фазовый анализ. – М.: Издательство ГОУ-ВПО УГТУ-УПИ, 2005. –24 с.
11. Згонников А. Ю. Аддитивные технологии в производстве [Электронный ресурс]. – режим доступа:
https://www.cadmaster.ru/magazin/articles/cm_86_20.html (дата
обращения: 06.04.2020)
12. Хаба Этьен, В.А. Тимирязев Использование аддитивных технологий для изготовления деталей машин // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2018., No.11. – С. 136–144.
13. Литунов С. Н., Слободенюк В. С., Мельников Д. В. Обзор и анализ аддитивных технологий. Часть 1 // Омский научный вестник. – 2016., No.1. – С. 12–17.
14. Ting Wei, Xinwei Zhang, Huiqiang Sun, Mengyun Mao. Selective laser sintering and performances of porous titanium implants // West China journal

of stomatology. – 2018., –Т. 36(5)., – С. 532-538.

15. M.Brandt. Laser Additive Manufacturing Materials, Design, Technologies, and Applications. – М.: Woodhead Publishing, 2017. – 498 с.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780081004333020017?via%3Dihub> (дата обращения: 12.04.2020)
16. Vincenzo Lunetto, Manuela Galati, Luca Settineri, Luca Iuliano. Unit process energy consumption analysis and models for Electron Beam Melting (EBM): Effects of process and part designs // Additive Manufacturing. – 2020. –Т. 33., № 101115.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214860419322146>(дата обращения: 12.04.2020)
17. W. J. Seufzer, K. M. Taminger. Control Methods for the Electron Beam Free Form Fabrication Process. [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/241890883_Electron_beam_freeform_fabrication_A_rapid_metal_deposition_process (дата обращения: 13.04.2020)
18. Смуров И. Ю., Конов С. Г., Котобан Д. В., Назаров А. П., Сундуков С. К. Инновационное цифровое производство на базе аддитивных технологий // ИННОВАЦИИ. № 8 (202), – 2015. – С. 39-41.
19. Прока Н.И. Экономика труда в организациях АПК. – М.: КолосС, 2009. – 440 с.
20. Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 № 197-ФЗ (ред. от 02.12.2019).

21. ГОСТ 12.2.032-78. ССБТ. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования (дата введения: 01.01.1979).
22. ГОСТ 12.2.033-78 ССБТ. Рабочее место при выполнении работ стоя. Общие эргономические требования (дата введения: 01.01.1979).
23. ГОСТ 12.0.003-2015. ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация (дата введения: 01.03.2017).
24. ГОСТ 12.1.003-2014. ССБТ. Шум. Общие требования безопасности (дата введения: 01.11.2015).
25. ГОСТ 12.1.029-80. ССБТ. Средства и методы защиты от шума. Классификация (дата введения: 01.07.1981).
26. СН 2.2.4/2.1.8.562-96. Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории застройки (утв. Постановлением Госкомсанэпиднадзора РФ от 31 октября 1996 г.).
27. СанПиН 2.2.4.548-96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений (утв. Постановлением Госкомсанэпиднадзора РФ от 1 октября 1996 г.).
28. ГОСТ 12.1.005-88. ССБТ. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны (дата введения: 01.01.1989).
29. ГОСТ 12.1.019-2017. ССБТ. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты (дата введения: 01.01.2019).
30. ГОСТ 12.1.038-82. ССБТ. Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов (дата введения: 01.07.1983).

31. СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03. Гигиенические требования к естественному, искусственному и совмещенному освещению жилых и общественных зданий (дата введения: 15.06.2003).
32. СП 52.13330.2016. Естественное и искусственное освещение.
Актуализированная редакция СНиП 23-05-95* (дата введения: 08.05.2017).
33. ГОСТ 12.1.007-76. ССБТ. Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности (дата введения: 01.01.1977).
34. ГН 2.2.5.3532-18. Предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ в воздухе рабочей зоны (утв. Постановлением Главного государственного санитарного врача РФ от 13.02.2018 № 25).
35. ГОСТ 12.4.011-89. ССБТ. Средства защиты работающих. Общие требования и классификация (дата введения: 01.07.1990).
36. ГН 2.1.6.3492-17. Предельно-допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе городских и сельских поселений (утв. 22.12.2017, с изменениями на 31.05.2018).
37. ГН 2.1.5.1315-03 Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования (утв. 30.04.2003, с изменениями на 13.07.2017).
38. Федеральный закон «О внесении изменений в Федеральный закон "Технический регламент о требованиях пожарной безопасности"» от 10.07.2012 № 117-ФЗ.

39. ВНЭ 5-79. Правила пожарной безопасности при эксплуатации предприятий химической промышленности (утв. Министерством химической промышленности 25 июля 1979 г.).