

Школа Инженерная школа ядерных технологий
 Направление подготовки 03.03.02 Физика
 Отделение школы (НОЦ) отделение экспериментальной физики (ОЭФ)

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Тема работы
Сравнительные исследования структурно-фазового состояния и механических свойств титанового сплава Ti-6Al-4V, полученного различными методами

УДК 621.785.545:669.295.018:669.017

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0Б71	Кругляков Марк Александрович		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЭФ ИЯТШ ТПУ	Степанова Е.Н.	к.т.н., доцент		

КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН ШБИП ТПУ	Спицына Л.Ю.	к.э.н., доцент		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент	Мезенцева И.Л.			

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЭФ ИЯТШ	Склярова Е.А.	к.п.н., доцент		

Запланированные результаты освоения ООП

Код	Результат освоения ООП
P1	Использовать основные этапы и закономерности исторического развития общества, основы философских, экономических, правовых знаний для формирования мировоззренческой, гражданской позиций и использования в различных сферах жизнедеятельности
P2	Уметь работать в коллективе, быть готовым к коммуникации в устной и письменной формах, в том числе на иностранном языке, толерантно воспринимать социальные, этические и культурные различия, использовать методы и средства физической культуры, приёмы первой помощи и методы защиты в условиях ЧС.
P3	Использовать в профессиональной деятельности базовые естественнонаучные знания, современные концепции и ограничения естественных наук, использовать фундаментальные знания разделов общей и теоретической физики, математики для создания моделей и решения типовых профессиональных задач, в том числе с использованием знаний профессионального иностранного языка.
P4	Понимать сущность и значение информации, соблюдать основные требования информационной безопасности, использовать методы, способы, средства получения и хранения информации, решать стандартные задачи на основе информационной и библиографической культуры.
P5	Применять организационно-управленческие навыки при работе в научных группах, критически переосмысливать накопленный опыт, изменять при необходимости профиль своей профессиональной деятельности, нести ответственность за последствия своей инженерной деятельности.
P6	Проводить научные теоретические и экспериментальные исследования в областях: материаловедения, атомной и ядерной физики, водородной энергетики, с помощью современной приборной базы с использованием специализированных знаний физики и освоенных профильных дисциплин.
P7	Применять на практике профессиональные знания теории и методов физических исследований, а также профессиональные знания и умения для проведения физических исследований в инновационных областях науки, используя современные методы обработки, анализа и синтеза информации.
P8	Использовать на практике теоретические основы организации и планирования физических исследований, участвовать в подготовке и составлении научной документации по установленной форме, понимать и применять на практике методы управления в сфере природопользования

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

Школа Инженерная школа ядерных технологий
 Направление подготовки (специальность) 03.03.02 «Физика»
 Отделение школы (НОЦ) Экспериментальной физики

УТВЕРЖДАЮ:
 Руководитель ООП

 (Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Бакалаврской работы

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

Студенту:

Группа	ФИО
ОБ71	Кругляков Марк Александрович

Тема работы:

Сравнительные исследования структурно-фазового состояния и механических свойств титанового сплава Ti-6Al-4V, полученного различными методами

Утверждена приказом директора (дата, номер)

--	--

Срок сдачи студентом выполненной работы:

--	--

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе <i>(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.).</i>	– Титановый сплав Ti-6Al-4V, полученный методами электронно-лучевого сплавления и литьем
--	--

<p>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></p>	<ul style="list-style-type: none"> – Обзор литературных источников – Получение титановых сплавов Ti-6Al-4V методом электронно-лучевого сплавления и литьем – Сравнительные исследования структурно-фазового состояния сплавов Ti-6Al-4V в различных структурных состояниях – Сравнительные исследования механических свойств сплавов Ti-6Al-4V в различных структурных состояниях – Социальная ответственность – Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение – Заключение
<p>Перечень графического материала <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i></p>	

Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы

(с указанием разделов)

Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Спицына Любовь Юрьевна, Доцент ОСГН ШБИП ТПУ
Социальная ответственность	Мезенцева Ирина Леонидовна, Ассистент ООД

Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:

--

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

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЭФ ИЯТШ ТПУ	Степанова Е.Н.	к.т.н., доцент		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0Б71	Кругляков Марк Александрович		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа 0Б71	ФИО Кругляков Марк Александрович
-----------------------	--

Школа	ИЯТШ	Отделение (НОЦ)	ОЭФ
Уровень образования	Бакалавриат	Направление/специальность	03.03.02 «Физика»

Тема ВКР:

Сравнительные исследования структурно-фазового состояния и механических свойств титанового сплава Ti-6Al-4V, полученного различными методами

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	<p>Объект исследования: титановый сплав Ti-6Al-4V, изготовленный традиционным методом и методом электронно-лучевого сплавления.</p> <p>Прибор: Quanta 200 3D; Shimadzu XRD 7000; ПБ-2013М; КВ 30S.</p> <p>Рабочая зона: лаборатория.</p> <p>Область применения: научные исследования в лаборатории; авиационная промышленность.</p>
--	---

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

<p>1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:</p> <ul style="list-style-type: none"> – специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; – организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны. 	<ul style="list-style-type: none"> – Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 30.04.2021) – ГОСТ 12.2.032-78 ССБТ. – ГОСТ 12.2.049-80 ССБТ. – ПНД Ф 12.13.1-03.
<p>2. Производственная безопасность:</p> <p>2.1. Анализ выявленных вредных и опасных факторов</p> <p>2.2. Обоснование мероприятий по снижению воздействия</p>	<ul style="list-style-type: none"> – Вредные факторы: повышенная или пониженная температура воздуха рабочей зоны; превышение уровня шума; отсутствие или недостаток необходимого естественного и искусственного освещения; – Опасные факторы: опасность поражения электрическим током;
<p>3. Экологическая безопасность:</p>	<ul style="list-style-type: none"> – Атмосфера: выброс в атмосферу рабочего газа; – Гидросфера: при пробоподготовке образцов методом мокрого шлифования излишки материала, удаленные с образца, приводят к загрязнению гидросферы. – Литосфера: в ходе резки материала для получения экспериментальных образцов образуются отходы в виде стружки, абразивно-металлического шлама, загрязняющие литосферу.

4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:	<ul style="list-style-type: none"> – Сильные морозы; – Наиболее типичная ЧС: Пожар.
--	---

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

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент	Мезенцева И.Л.			

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0Б71	Кругляков Марк Александрович		

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

Студенту:

Группа	ФИО
0Б71	Круглякову Марку Александровичу

Школа	Отделение школы (НОЦ)	Направление/специальность	
Уровень образования	Бакалавриат	03.03.02 «Физика»	

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

1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	Затраты на сырьё, размер окладов, затраты на электроэнергию, амортизационные расходы
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	– Согласно проектной документации. Районный коэффициент 1.3
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	– Отчисления во внебюджетные фонды 30%

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	– Потенциальные потребители результатов исследования; – проведение анализа конкурентоспособности.
2. Планирование и формирование бюджета научных исследований	– цели и результаты проекта; – организационная структура проекта.
3. Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования	– структура работ в рамках научного исследования; – разработка графика проведения научного исследования; – бюджет научно-технического исследования.

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

1. Оценка конкурентоспособности НИ;
2. SWOT- анализ;
3. Диаграмма Ганта;
4. Бюджет затрат научно-технического исследования
5. Основные показатели эффективности НИ

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

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН ШБИП ТПУ	Спицына Любовь Юрьевна	к.э.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0Б71	Кругляков Марк Александрович		

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа содержит 86 страниц, 22 рисунка, 24 таблицы, 41 литературный источник, 2 приложения.

Ключевые слова: Ti-6Al-4V, электронно-лучевое сплавление, рентгенофазовый анализ, сканирующая электронная микроскопия, одноосное растяжение.

Объектом исследований являлся: титановый сплав Ti-6Al-4V полученный различными методами.

Целью работы является: проведение сравнительных исследований структурно-фазового состояния и механических свойств сплава Ti-6Al-4V полученного различными методами.

В процессе работы проводились: пробоподготовка образцов методами шлифования и полирования для изучения структурно-фазового состояния сплава образца из сплава Ti-6Al-4V; исследование структурно-фазового состояния методами рентгеноструктурного анализа, сканирующей электронной микроскопии; исследование механических свойств образцов из сплава Ti-6Al-4V методом одноосного растяжения.

В результате было рассмотрено влияние температуры на механические свойства сплава Ti-6Al-4V: при повышении температуры сплавы приобретают улучшенные пластические свойства при снижении прочностных. Анализ фрактограмм поверхности разрушения показал: при комнатной и при повышенных температурах наблюдаются области вязкого разрушения, характеризуемого наличием микроуглублений на поверхности излома. С ростом температуры у ЭЛС образцов на поверхности разрушения наблюдается образование пор, что является одной из основных причин ухудшения пластических характеристик образцов.

Область применения: авиационная промышленность.

Экономическая эффективность работы: технология является экономичной, энергоэффективной и экологичной, имеет маленький срок готовых результатов при проведении научного исследования.

Оглавление

Введение.....	11
1 Литературный обзор	14
1.1 Титановые Сплавы	14
1.2 Аддитивные технологии.....	16
1.3 Структура и свойства титановых сплавов, полученных методами аддитивных технологий.....	22
2 Материал и методы исследования.....	25
2.1 Исследуемый материал.....	25
2.2 Подготовка образцов методами шлифования, электрохимической полировки. Травление.....	25
2.3 Исследование микроструктуры сплава Ti-6Al-4V.....	27
2.4 Исследование структуры сплава Ti-6Al-4V методом рентгеновской дифракции	27
2.5 Измерение микротвердости методом Виккерса.....	31
2.6 Испытания на одноосное растяжение	32
3 Результаты экспериментальной работы.....	34
3.1 Сравнительные исследования структурно-фазового состояния сплавов Ti-6Al-4V в различных структурных состояниях.....	34
3.2 Сравнительные исследования механических свойств сплавов Ti-6Al-4V в различных структурных состояниях	36
3.2.1 Микротвердость	36
3.2.2 Испытания на одноосное растяжение	37
3.3 Выводы по разделу.....	44
4 Социальная ответственность	46
Введение.....	46
4.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности.....	46
4.1.1 Специальные (характерные для рабочей зоны исследователя) правовые нормы трудового законодательства.	46

4.1.2 Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны исследователя.	47
4.2 Производственная безопасность.....	47
4.2.1 Анализ вредных и опасных факторов, которые могут возникнуть на рабочем месте при проведении исследований.	47
4.2.2 Отклонение показателей микроклимата.....	48
4.2.3 Превышение уровня шума	49
4.2.4 Недостаточная освещенность рабочей зоны	51
4.2.5 Электробезопасность	52
4.3 Экологическая безопасность.....	53
4.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях.....	54
4.4.1 Анализ вероятных ЧС, которые могут возникнуть на рабочем месте при проведении исследований.	54
4.4.2 Обоснование мероприятий по предотвращению ЧС и разработка порядка действия в случае возникновения ЧС.	55
4.5 Выводы по разделу.....	56
5 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.....	57
5.1 Потенциальные потребители результатов исследования	57
5.2 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научного исследования с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения.	59
5.3 Планирование научно-технического исследования	64
5.4 Бюджет научного исследования	68
5.5 Ресурсоэффективность	73
5.6 Выводы по разделу.....	76
Заключение	77
Список литературы	79
Приложение А	84
Приложение Б.....	85

Введение

Решение важнейших технических проблем на производстве, связанных со стоимостью технологических процессов, расхода материала, а также массы деталей и приборов всегда лежало в основе материаловедения. Условия эксплуатации многих материалов стали более сложными, как следствие роста объема производства, появилась необходимость использования наиболее эффективных материалов в каждой из развитой производственной отрасли [1]. Таким образом, с целью повышения тех или иных свойств материала активно используется легирование, изменение характеристик материала путем внедрения в него других химических элементов.

Титан является распространенным и востребованным материалом во многих сферах науки и производства, таких, как, например, медицина, атомная энергетика, авиа-машиностроение. В связи с этим возникла необходимость получения титановых сплавов с лучшими характеристиками, чем у исходного материала. Титановые сплавы – металлические соединения, содержащие кроме титана также и другие металлы, а также прочие химические элементы. К преимуществам получаемых соединений можно отнести улучшенную коррозионную стойкость, удельную прочность, а также более высокую жаропрочность при эксплуатации деталей, изготовленных из титановых сплавов. Уже более 40 лет эти сплавы находятся под пристальным наблюдением не только ученых, но и конструкторов, архитекторов. Одним из первых титан начал массово использоваться в Советском Союзе для облицовки монумента покорителям космоса. В настоящее время титан и его сплавы активно используются в Японии, например, уже в 2002 году на долю титана пришлось 93 метрические тонны, это приблизительно 0,6% от всего произведенного в то время титана [2].

Кроме того, следует отметить, что титану и его сплавам характерен ряд не менее полезных свойств: долговечность, гибкость и пластичность, эти свойства позволяют сплавам на основе титана практически не иметь

альтернатив в медицинской сфере. А именно, в изготовлении ортопедических конструкций и приспособлений для сращивания переломов. Благодаря эффекту «памяти формы» появилась возможность применения инновационных материалов в сосудистой и нейрохирургии [3].

При всех значительных преимуществах более массовое применение титановых сплавов затрудняется из-за высокой стоимости их изготовления. Особенно дорогостоящими являются технологические операции при получении промежуточных изделий: фасонное литье, пластическая деформация, сварка, механическая и термическая обработка материала [4]. Несмотря на все сложности при производстве титановые сплавы являются практически незаменимыми при изготовлении обшивок, шпангоутов, стенок лонжеронов. Обусловлено это вышеперечисленными прочностными характеристиками, а также благодаря малой массе используемого материала.

В связи с необходимостью производства сплавов на основе титана, промышленность по изготовлению данных материалов начала стремительно набирать обороты, начали появляться новые методы производства сложных конструкционных материалов, при помощи которых можно было бы снизить стоимость получения необходимых соединений. Аддитивное производство – один из таких методов. Под аддитивным производством понимают процесс изготовления деталей путем послойного соединения различных материалов без изменения его геометрии, в отличие от традиционных процессов, которые существенно изменяют форму образца [5].

Аддитивное производство (Additive Manufacturing, AM) включает в себя несколько методов, например, электронно-лучевая плавка (EBM) и селективное лазерное плавление (SLM). Отличаются данные методы тем, что при SLM источником излучения является лазерный луч, а в EBM – пучок электронов. Перечисленные методы на данный момент имеют широкую область применения как в сфере медицины (биомедицины), так и в инженерной индустрии, что обусловлено высокой скоростью изготовления деталей, при том что стоимость производственного оборудования считается относительно

небольшой. Кроме того, АМ предоставляет возможность изготовления деталей с высокой точностью, сложной внутренней структурой и сложной внешней формой. Например, изготовленные методом ЕВМ индивидуальные имплантаты из сплава ВТ6 (Ti-6Al-4V) могут иметь структуру, соответствующую анатомической структуре костей. Такие имплантаты не только эффективны благодаря функциональным и механическим свойствам, но и благодаря свойствам поверхности, что играет важную роль для многих биологических процессов, таких как регенерация или микробиологическое загрязнение [6].

В данной работе объектом исследования является сплав Ti6Al4V, полученный методом электронно-лучевого сплавления.

Целью данной работы является проведение сравнительных исследований структурно-фазового состояния и механических свойств сплава Ti-6Al-4V полученного различными методами.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Пробоподготовка образцов методами шлифования и полирования для изучения структурно-фазового состояния сплава образца из сплава Ti-6Al-4V .
2. Исследование структурно-фазового состояния методами рентгеноструктурного анализа, сканирующей электронной микроскопии.
3. Измерение микротвердости образца из сплава Ti-6Al-4V методом Виккерса.
4. Исследование механических свойств образца из сплава Ti-6Al-4V методом одноосного растяжения.

1 Литературный обзор

1.1 Титановые Сплавы

Существует огромное множество титановых сплавов, но все они подчиняются общей классификации, делятся на: α -, ($\alpha + \beta$), β -сплавы. Эти обозначения введены по причине фазовых превращений внутри кристаллической решетки – полиморфное превращение при определенной температуре (порядка 882°C), ниже данной температуры – α -сплавы (ГПУ решетка), выше – β -сплавы (ОЦК). Кроме того, широко применяется получение ($\alpha + \beta$) сплавов путем легирования соответствующими α/β -стабилизаторами. Требуют упоминания также псевдо- α (малое содержание β -фазы) и псевдо- β (малое содержание α -фазы) типы сплавов.

Титановые сплавы α -типа имеют только α -фазу, к ним относятся различные сплавы CP-Ti и Ti. Как правило, CP-Ti делится на сплавы, содержащие 0,20-0,50 мас.% Fe и 0,18-0,40 мас.% O. Существуют и так называемые псевдо- α Ti сплавы - такие сплавы, которые содержат незначительное количество β -фазы (менее 5 об.%), сплавы с содержанием β -стабилизаторов в количестве 1-2 мас.% по сравнению со сплавами α -типа. Оба данных типа сплавов имеют схожие свойства, такие как отличная коррозионная стойкость хорошая свариваемость, а также высокое сопротивление ползучести. Следовательно, они подходят для эксплуатации при высоких температурах [7].

Титановые сплавы типа ($\alpha + \beta$) имеют повышенное содержание β -стабилизаторов, чем вышеперечисленные (около 5-30 об.%). Данные сплавы способны выдерживать нагрузки под высоким давлением, высокую прочность при комнатной температуре, и высокую удельную прочность при высоких температурах, исходя из этого, механические свойства такого материала могут быть подвержены и оптимизированы путем термической обработки. Объемное содержание α и β может варьироваться в зависимости от химического состава сплава, температуры нагрева и обработки, а также от скорости охлаждения сплава. Материалы данного типа демонстрируют более высокий предел

прочности при растяжении, чем у сплавов с пониженным содержанием β -фазы. Кроме того, $(\alpha + \beta)$ соединения по-прежнему обладают отличной коррозионной устойчивостью и способностью быстрой остеоинтеграции в человеческом организме благодаря быстрому формированию на поверхности изделия из данного сплава плёнки TiO_2/OH на поверхности костей. Среди сплавов данного типа широко распространен сплав ВТ6 (Ti-6Al-4V), также известный как Е11 или Ti64. Он нашел свое применение в биомедицинской сфере, где используется в имплантатах ортопедических и травматологических областях [7].

Кроме того, выделяются сплавы β -типа, которые в отличие от сплавов $(\alpha + \beta)$ содержат β -стабилизаторы (Mo, Ta, Zr и др.) в больших количествах. Данные соединения поддаются более интенсивной термообработке с целью повышения их прочности. Однако, повышение объема β -фазы приводит к уменьшению модуля упругости сплава.

Титановый сплав ВТ5 (α тип) – сплав с титана содержанием Al в количестве 5% имеет более высокие прочностные характеристики, чем у титана, но невысокую технологичность. Применяется при температуре до 400°C , пригоден для штамповки и сварки, также используется в ковке. Также стоит отметить сплав ВТ5-1, которые вдобавок к алюминию содержит 2-3% олова, используется при температурах до 450°C , используется для изготовления листов, труб, поковок – огромное количество в полуфабрикатной промышленности [8].

Титановый сплав ВТ20 (псевдо- α тип) – титан, легированный алюминием и цирконием, а также V и Mo в меньших количествах. Улучшенные прочностные характеристики по сравнению со сплавами типа ВТ5 и ВТ5-1, а также повышенная эксплуатационная температура, вплоть до 500°C . Используется для изготовления конструкций и деталей, предназначенных для работы в условиях повышенной температуры [8].

Титановые сплавы ОТ4 и ОТ4-1 (псевдо- α тип) – содержат кроме титана алюминий и марганец, отличаются хорошей пластической деформацией при

нагреве и охлаждении. Также используется в производстве полуфабрикатов, таких как трубы, пластины, профили и пруты. Способные выдерживать высокую температуру вплоть до 350°C, но имеют ряд недостатков, среди которых сравнительно низкая жаропрочность на фоне других титановых сплавов, а также высокая вероятность разрушения под воздействием водорода [8].

Из всех различных титановых сплавов наиболее часто используется Ti-6Al-4V (VT6), составляя «50% всего титана, используемого в мире, и 80% титана, используемого в аэрокосмической промышленности». ($\alpha+\beta$ тип) Сплав содержит 6 массовых процентов алюминия и 4 массовых процентов ванадия, что делает его сплавом + V с превосходной прочностью, высокой удельной прочностью и коррозионной стойкостью. Ti-6Al-4V затвердевает при температуре ниже 1605-1660°C в зависимости от чистоты сплава [9].

1.2 Аддитивные технологии

Аддитивное производство представляет собой изготовление изделий в результате поэтапного наложения необходимого материала на платформу. Сама суть аддитивного производства заложена в его названии (лат. *additivus* – прибавляемый), в чем и заключается отличие от традиционных методов изготовления сплавов, где механизм построен на вычитании материала. В традиционных методах имеется исходная заготовка, которая при дальнейших манипуляциях приобретает требуемые размеры и формы путем отсечения частей. В основе же аддитивных методов производства лежит изготовление изделий с нуля из имеющегося расходного материала. Данные методы не только увеличивают практичность и удобность производства за счет увеличения мобильности, но еще и снижают количество компонентов и комплектующих деталей для изготовления деталей. Чтобы изготовить стандартную форсунку для поступления топлива в реактивный двигатель традиционным методом необходимо не только израсходовать определенное количество материала исходной заготовки, но еще и задействовать в процессе

сварки более десятка различных запчастей (потери материала в традиционных методах в некоторых случаях могут достигать порядка 85%), тогда как при помощи АП будет израсходовано ровно столько материала, сколько необходимо для создания изделия. В следствие чего наблюдается тенденция уменьшения массы произведенных изделий, что получило широкое применение в авиационной и космической промышленности. Кроме того, АП позволяет уменьшить длительность производства различных изделий в несколько раз. Например, существуют детали сложной формы, например, лопатки газотурбинных двигателей, кронштейны, на изготовление которых традиционными методами уходит несколько десятков часов. В некоторых случаях традиционное производство и вовсе не позволяет получать детали и изделия сложной формы.

Среди применяемых материалов преобладает печать пластиком — 89%, на долю печати металлом приходится 10%, на все остальные материалы — 1%. При этом доля любительских и полупрофессиональных принтеров составляет 91,6%, а профессиональных и промышленных — 8,4%. Крайне важной тенденцией рыночного развития является прогресс в одном из самых сложных отраслей, связанных с производством изделий из металлических материалов. В 2016 г. [10].

Российский рынок АТ является существенно отстающим от мировых лидеров, но включившимся в конкуренцию, ежегодно набирая обороты. Опыт разработки и реализации металлопечатающих технологий имеют отдельные отечественные компании, высшие учебные заведения. За 2017 год отечественными производителями было создано и отправлено на рынок порядка 2600 устройств, 19 производственных аддитивных систем, в том числе и 3 единицы оборудования для производства изделий на основе металлических порошков [11].

Высокую сложность при изготовлении имеют особенно детали и изделия, предназначенные для эксплуатации в авиации и космосе. Долговечность таких изделий имеет малый срок службы, а также скромные

объемы производства по сравнению с деталями автомобильной и кораблестроительной промышленности. В случае отказа систем или сбоя при работе оборудования, происходит удар по репутации как технологии, так и персонала, ответственного за разработку, а также должностных лиц, допустивших использование данной технологии. Происходит оценка возможности применения новых технологий для производства изделий особо ответственного назначения, совершенствование производственного процесса. Для космонавтики и авиации характерны времязатратные и крайне дорогостоящие циклы разработки, оценки и ввода в эксплуатацию новых аппаратов. Фактически требуется в среднем около десяти лет для перехода от состояния концепции до первого полета [12].

Создание титановых изделий и деталей из сплавов титана связано с огромным количеством труднореализуемых технологических переделов в металлургической отрасли (таких как, вакуумно-дуговая и электронно-лучевая переплавы материала). Титановые слитки массой от 2 до нескольких десятков тонн с диаметром от 300мм, подвергают сложной деформационной обработке, что в итоге ощутимо сказывается на стоимости конечного изделия. Особенно, это заметно, если отметить тот факт, что при создании деталей путем механической обработки до 70 % материала уходит в отходы. При этом коэффициент использования материала составляет всего 0,3–0,4. Именно в этом и заключается один из главных плюсов аддитивных технологий, они дают возможность создать изделие или деталь, сильно сократив количество и затраты на производственные процессы, коэффициент использования материала при котором лежит в диапазоне от 0,9 до 0,98. В аддитивных технологиях изготовление изделий и деталей осуществляется посредством сплавления материалов из порошков, частицы которого имеют сферическую форму [13].

Существенными преимуществами аддитивных технологий перед традиционными являются повышенные производительность и экономичность при создании деталей сложной формы, так как появляется возможность более

точного управления как формой изделия, так и внутренним строением образца, его поверхностью. Благодаря данным возможностям наблюдается снижение массы изделий, а также восстановление геометрии негодных и отработанных деталей, что является одной из главных причин для развития аддитивных технологий по всему миру, в России [14,15].

На данный момент АТ достигли достаточного уровня развития, чтобы появилась реальная возможность для технологий «добавления» занять важные позиции в реалиях существования устаревающих технологий «отнимания». При производстве деталей методами АТ используются титановые порошки, среди важных показателей которых необходимо выделить фракционный состав и форму. Титановые порошки являются частицами титановых сплавов сферической формы, что позволяет гранулам компактно и плотно укладываться в заданном объеме, также благодаря этому частицы соответствуют требованиям «текучести» порошковых композиций в системах подачи материала. [16].

Среди главных методов производства деталей и образцов при использовании АТ выделяют селективное лазерное спекание (СЛС) и электронно-лучевое сплавление (ЭЛС).

При СЛС на подложку наносится порошок необходимой толщины, затем происходит плавление нанесенного слоя лазерным пучком по всей поверхности или на определенных участках. Кроме сплавления частиц порошка между собой, также происходит сплавление напыленного слоя с поверхностью подложки. Далее вместе со столом деталь опускается на толщину слоя, процедура повторяется, остатки несспекшегося порошка удаляются с поверхности детали по окончании процесса. Отличительной особенностью данного метода служит наличие неспеченного порошка вокруг детали, которые становятся опорой для участков изделия, благодаря чему опрощается создание тонких пленок, перегородок и прочих нависающих участков. [17].

Производство металлопорошковых композиций высокой чистоты титановых сплавов методами индуктивной газовой атомизации для аддитивных технологий. Официально данный метод назван «лазерным спеканием», что не

совсем точно, ведь в данном случае получается скорее полная плавка до образования гомогенной детали, нежели непосредственно спекание. Принципиальная схема СЛС-процесса представлена на рисунке 1.1.

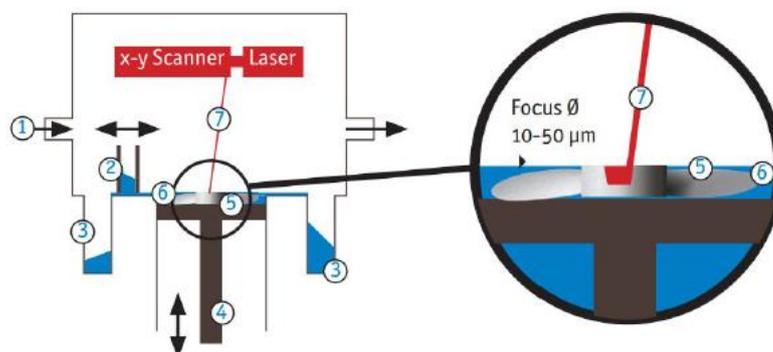


Рисунок 1.1 – Схема СЛС-процесса. 1 – инертный газ; 2 – рапель, выравнивающий слой порошка; 3 – контейнеры с металлическим порошком; 4 – механизм управления движением платформы; 5 – строящаяся деталь; 6 – поверхность построения; 7 – сфокусированный лазерный луч [18]

Наличие большого количества пор и сварных дефектов, образованных из-за присутствия «пузырей» газа при поглощении их жидким металлом в процессе сварки, является одной из главных проблем при изготовлении сплавов. Форма и размер пор зависит от величины энергии, необходимой для полного сплавления порошка в слое: чем выше энергия, тем меньше пористость в методе частичного селективного сплавления, где энергия меньше, чем в представленном методе СЛС [19]. Высокое количество и больший размер пор негативно сказываются на многих механических свойствах материала, таких как теплопроводность и прочность.

Чтобы получить непосредственно спеченные тонкие пленки с меньшими размерами пор используется метод ЭЛС. В отличие от СЛС данный метод отличается повышенной плотностью и прочностью получаемых изделий за счет непосредственного сплавления слоев между собой, а не плавлению всего материала. Тем не менее готовые изделия практически не отличаются от подобных, полученных традиционными методами по своим механическим

свойствам. Границы слоев трехмерной модели выплавляются электронным пучком на участках взаимодействия с порошками металлов. Процедура сплавления производится в вакуумных камерах с целью избежать внедрения примесей в структуру получаемого изделия. Данное условие предоставляет возможность создания изделий из материалов, которые чувствительны к окислению, например, с титаном. Также использование ЭЛС позволяет контролировать и изменять скорость плавления слитков в широких диапазонах, за счет независимого источника излучения, что в свою очередь дает возможность регулировать время нахождения материала в необходимой агрегатной фазе. ЭЛС предоставляет возможность высокоэффективно удалять включения низкой и высокой плотностей [20]. Принципиальная схема ЭЛС-процесса представлена на рисунке 1.2 [21].

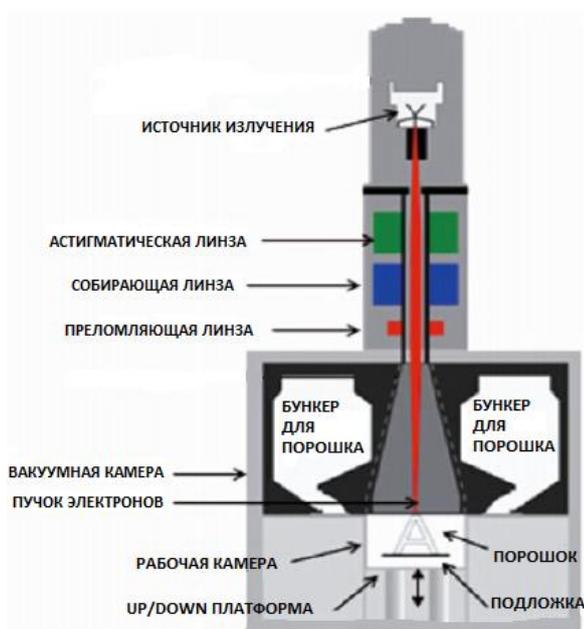


Рисунок 1.2 – Принципиальная схема ЭЛС-процесса [21]

Пучок электронов ускоряется до половины скорости света и контролируется системой линз. Система линз сначала фокусирует электронный луч до необходимого диаметра, затем отклоняет сфокусированный луч на подложку в нужной точке. Электронный пучок плавит порошок согласно предоставленным ему данным. По окончании обработки одного слоя,

платформа опускается и обработке подвергается следующий слой порошка, нанесенный на поверхность мишени. Процесс повторяется до тех пор, пока 3D изделие не будет построено [21].

1.3 Структура и свойства титановых сплавов, полученных методами аддитивных технологий

Ti в α -фазе имеет гексагональную плотноупакованную (ГПУ) структуру при комнатной температуре. β -фаза титана достигается в результате повышения температуры, а структура трансформируется в объемно центрированную кубическую (ОЦК). При изменении легирующих элементов, появляется возможность изменения (либо повышения, либо понижения) ее температуры для возникновения β -фазы. Элементы, известные как α -стабилизаторы (Al, O, N и C) расширяют область существования α -фазы. β -стабилизирующие элементы (V, Mo, Fe, Mn) расширяют область β -фазы.

Сплавы на основе титана характеризуются высокой удельной прочностью – отношение предела текучести к плотности, в отличие от других конструкционных материалов в широком диапазоне рабочих температур. Также титановые сплавы обладают превосходной коррозионной стойкостью и стойкостью к окислению при температурах до 500 °C [22].

Для: $\alpha \rightarrow$ псевдо- $\alpha \rightarrow (\alpha + \beta) \rightarrow$ псевдо- $\beta \rightarrow \beta$

- Более высокая плотность
- Увеличение реакции на термообработку
- Увеличение скорости деформации
- Чувствительность
- Улучшение технологичности

Для: $\beta \rightarrow$ псевдо- $\beta \rightarrow (\alpha + \beta) \rightarrow$ псевдо- $\alpha \rightarrow \alpha$

- Повышение сопротивлению ползучести
- Улучшение свариваемости

Для отслеживания эволюции последовательности фазового превращения $\alpha \rightarrow \beta \rightarrow L \rightarrow \beta \rightarrow \alpha$, при сварке вольфрамовой дугой Ti-6Al-4V были

проведены эксперименты с использованием рентгеновской дифракции [23]. Исходя из результатов можно сделать вывод, что для β -перехода требуется значительное повышение температуры, необходимое для завершения $\alpha \rightarrow \beta$ перехода. Следовательно, при понижении температуры для сплава Ti-6Al-4V в β -фазе сначала будет наблюдаться переход $\beta \rightarrow \alpha$, по окончании которого сплав вернется в α -фазу. На рисунке 1.3 представлена фазовая диаграмма переходов сплава Ti-6Al-4V, где Ms – граница раздела фаз.

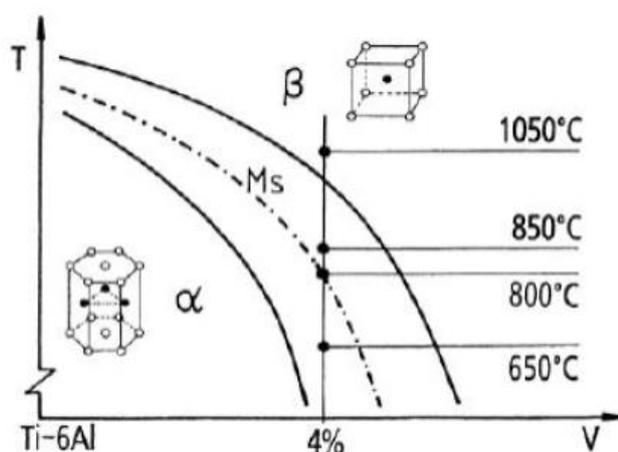


Рисунок 1.3 – Фазовая диаграмма $\alpha \rightarrow \beta \rightarrow L \rightarrow \beta \rightarrow \alpha$ переходов в сплаве Ti-6Al-4V [4]

В настоящий момент существует потребность в создании высокопрочных титановых материалов, которые при этом сохраняли бы свои пластические свойства при хорошей свариваемости в отожженном состоянии, но при этом обладали бы прочностью свыше 1200 МПа. Именно такой сплав типа ($\alpha + \beta$) был создан путем следующего легирования: Ti-Al-Mo-V-Nb-Cr-Fe-Zn. В дальнейшем получил название T120. В данной работе был сделан вывод о том, что пластические свойства выше при большем содержании эквивалента Al, тогда как эквивалент по молибдену остается на одном и том же уровне. Несмотря на повышение прочностных характеристик, пластичность и технологичность данного сплава все равно остается на удовлетворительном уровне. Содержание эквивалента Al в сплаве менее 10%. Свариваемость у

сплава остается хорошей благодаря тому, что прочностные характеристики нового сплава не уменьшаются при ликвидации легирующих элементов [24].

Экспериментально доказано, что исходная микроструктура и ее эволюция при деформации оказывают значительное влияние на величину скоростной чувствительности и относительного удлинения материала. Более устойчивая микроструктура, а также структура с малыми размерами зерна позволяет наблюдать большие удлинения [25].

Создание титановых сплавов методом аддитивных технологий является перспективным и стремительно развивающимся направлением благодаря тому, что позволяет контролировать процесс изготовления материала, а также совершать работу с высокой точностью как в плане формы деталей, так и их поверхности. Управляя количеством тех или иных легирующих компонентов есть возможность изменять фазовый состав сплавов: α -фазы, $(\alpha+\beta)$ -фазы и β -фазы, что непосредственно влияет на различные свойства исследуемого материала. Кроме того, изменяя пропорции и количество легирующих элементов в рамках сплава конкретной фазы, также можно добиться изменения механических свойств изделия, например, характеристики, отвечающие за пластичность, такие как предел текучести [26]. Наличие дефектов, вызванных технологическим процессом, таких как пустоты, трещины и нерасплавленные частицы, влияет на механические свойства деталей АМ, например, в ряде представленных работ на уменьшение относительного удлинения до разрушения, а также на предел прочности сплава [27].

2 Материал и методы исследования

2.1 Исследуемый материал

В качестве материала исследования в работе был использован сплав титана Ti-6Al-4V в состояниях, полученных традиционным методом (литой) и методом электронно-лучевого сплавления (ЭЛС). Образцы были изготовлены на оборудовании ARCAM A2 EBM из порошка титанового сплава Ti-6Al-4V (Ti6Al4V ELI). Порошок был приобретен у ARCAM АВ. Средний гранулометрический состав от 50 до 150 мкм. Толщина слоя порошка составляла 70 мкм. СЭМ-снимок порошка представлен на рисунке 2.1.

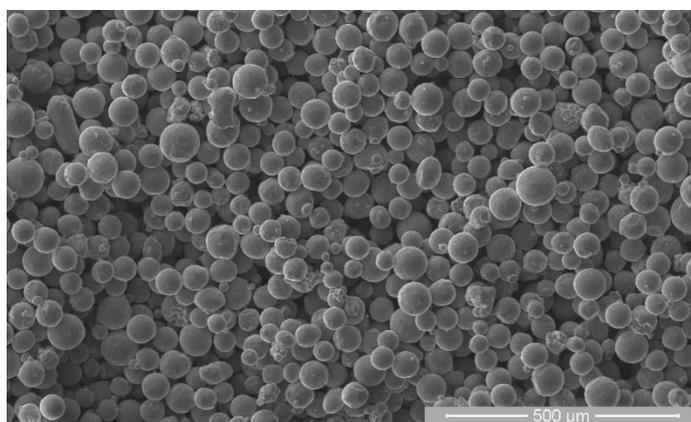


Рисунок 2.1 – Порошок титанового сплава Ti-6Al-4V (Ti6Al4V ELI)

2.2 Подготовка образцов методами шлифования, электрохимической полировки. Травление

Образцы для исследований были вырезаны методом электроискровой резки.

Подготовка образца к исследованиям производилась путем шлифования при использовании наждачной бумаги с различным размером зерна). Прежде чем проводить анализ образца необходимо произвести пробоподготовку, под которой понимается комплекс мероприятий по механической обработке поверхности. Осуществление подготовки производится путем шлифовки при использовании специального оборудования: наждачной бумаги с различным размером зерна и специальной машинки Saphir 320 АТА (Германия). Шлифовально-полировальная машинка осуществляет мокрое шлифование и

полирование различных материалов в автоматическом режиме. Оснащена автоматической головкой Rubin 500. Шлифование и полирование алюминия, аллюмооксидной керамики, бронзы, вольфрама, инструментальной и конструкционной стали, латуни, магния, меди, нержавеющей и низкоуглеродистой стали, никеля, титана, стекла, циркония, чугуна и других материалов с применением абразивных кругов, полировального сукна, алмазных суспензий с различным размером зерна. Шлифовка осуществляется методом пошагового изменения, уменьшения зерна шлифовальной бумаги. Первый этап полировки заключался в обработке поверхности материала крупнозернистой бумагой с последующим уменьшением зерна. Для получения наиболее однородной поверхности пробы необходимо зафиксировать образец так, чтобы все риски были параллельны, в последствии периодически изменяя угол обработки на 90°. После удаления видимых царапин, диск заменяется на другой с меньшим размером зерна, процедура повторяется по ранее проделанному циклу. В целях достижения наибольшей однородности необходимо соблюдать меры, предохраняющие материал от нагрева (охлаждение водой).

Электрополирование – это более тонкий вид обработки поверхности исследуемых изделий и образцов с использованием анода с целью повышения гладкости поверхности (создания эффекта блеска), устранения невидимых невооруженным глазом царапин.

Электрополирование образцов проводили с помощью электролита: 80 об.% ледяной уксусной кислоты и 20 об.% хлорной кислоты (напряжение 10 В, время полировки 30 с).

Травление - вид обработки поверхности исследуемых изделий и образцов с использованием химических веществ с целью создания контраста на поверхности образца для дальнейшего исследования микроструктуры с помощью различных видов микроскопии, в частности сканирующей электронной.

Травление образцов проводили в 2% растворе HF в дистиллированной воде.

2.3 Исследование микроструктуры сплава Ti-6Al-4V

Сканирующая электронная микроскопия (СЭМ) применяется для непосредственного исследования непрозрачных объектов. Фундаментальным принципом является телевизионная развертка электронного пучка малой толщины по поверхностному слою исследуемого объекта. Электронный зонд создает изображение, которое формируется с помощью одной линзы или системы из двух линз. Зонд перемещается по внешнему слою образца и выбивает из его поверхности вторичные электроны. Контраст полученной картинки зависит от наклона участков поверхности относительно электронного пучка. Также существенное влияние на контраст изображения оказывает и состава образца. Даже учитывая тот фактор, что максимально высокое разрешение сканирующего микроскопа приблизительно на порядок ниже, чем у просвечивающего электронного микроскопа, это не мешает методу СЭМ получить востребованность во множестве важных областях применения. Метод СЭМ представляет возможность получить большой объем данных об исследуемом материале благодаря большому количеству разнообразных физических явлений, сопровождающих взаимодействие пучка электронов с объектом.

В данной работе микроструктуру сплава анализировали с помощью растрового ионно-электронного микроскопа Quanta 200 3D.

2.4 Исследование структуры сплава Ti-6Al-4V методом рентгеновской дифракции

Самым распространенным методом для определения фазового состава исследуемых материалов (кристаллических тел) считается рентгеноструктурный анализ. Фазой называется составляющая вещества, которая отделена от других составляющей границей. Эту границу называют

границей раздела, переходя которую изменяются свойства материала. Оценка фазового состава заключается в определении молярной или весовой составляющей того или иного вещества в конкретном соединении. Сравнение и сопоставления полученных результатов анализа осуществляется при помощи международной базы данных ICDD.

В основе метода рентгенофазового анализа лежит явление дифракции. Под дифракцией понимается явление сильного рассеяния волн на периодической решетке рассеивателя при определенных углах падения и длинах волн [30]. Рассеивателем будет являться кристаллическая решетка исследуемой фазы опытного образца. Основопологающим принципом методов рентгеноструктурного и рентгенофазового анализа лежит условие Вульфа-Брэгга, описывающее ход рентгеновского луча. Для получения результатов эксперимента и необходимо выполнение условия Вульфа-Брэгга:

$$2d_{hkl} \cdot \sin(2\theta) = n\lambda \quad (1)$$

Где: d – расстояние между кристаллографическими плоскостями, θ – угол дифракции, n – порядок дифракции, λ – длина волны.

На рисунке 2.2 представлена схема хода рентгеновского луча при выполнении условия Вульфа-Брэгга.

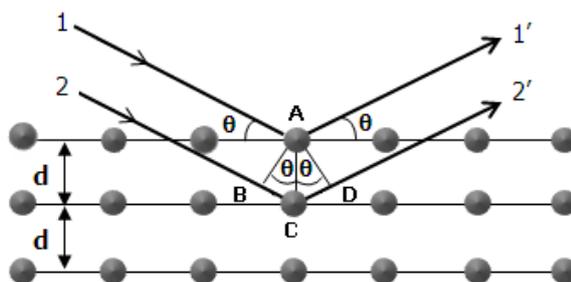


Рисунок 2.2 – Схема хода рентгеновского луча [28]

При облучении кристаллической структуры материала монохроматическим рентгеновским излучением в каждой плоскости вещества существует определенное количество кристаллов, находящихся в «отражающей» позиции. Обозначенное на рисунке 14 расстояние d

характеризует положение максимума для приведенных наборов плоскостей в дифракционном максимуме. Это расстояние характеризуется параметрами h, k, l и зависит от строения кристаллической решетки, в зависимости от фазы вещества.

В данной работе, как и во многих других, при определении фазового состава образцов методом рентгеновской дифракции используется дифрактометр XRD-7000S (Shimadzu, Kyoto, Japan). На рисунке 2.3 наглядно представлена принципиальная схема работы данного дифрактометра.

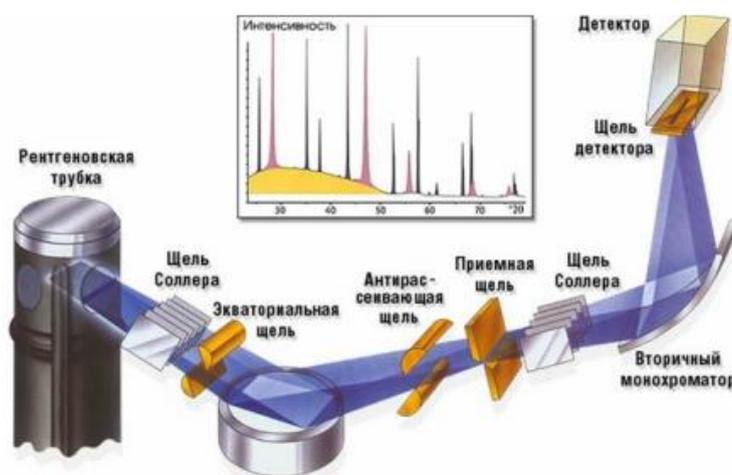


Рисунок 2.3 – Принципиальная схема работы дифрактометра [28]

Основными компонентами оборудования являются: рентгеновская трубка и детектор, которые расположены на движущемся устройстве (гониометре). Это система для точной установки и отслеживания угла излучения относительно поверхности образца. Один рычаг гониометра контролирует угол облучения образца с помощью рентгеновской трубки, а другой - угол брэгговского отражения излучения от образца (записанный сигнал). Детектор непрерывно определяет интенсивность рентгеновского излучения при его движении (при изменении угла). Остальные части оптической схемы дифрактометра придают такие свойства излучению, чтобы оптимизировать его для решения различных задач дифрактометрического анализа. В данном методе экспериментальными результатами являются рентгенограммы. Рентгенограммы являются наглядной демонстрацией

зависимости интенсивности от угла 2θ , охарактеризовать то или иное вещество можно с помощью полученного спектра рентгеновского излучения. Определить качественный и количественный состав нам позволяют рефлексы, находящиеся в определенной области спектра [28]. Сопоставление полученных результатов со стандартными карточками базы данных ICDD позволяет определить и рассчитать фазовый состав в исследуемых образцах.

Рентгеноструктурный анализ (РСА) был произведен с помощью дифрактометра Shimadzu XRD 7000.

На основе данных, полученных в результате РСА, были рассчитаны параметры решетки для α и β фаз. Для расчета были использованы следующие формулы:

Для ОЦК-решетки (β -фаза):

$$d = \frac{a}{\sqrt{H^2 + K^2 + L^2}} \quad (2)$$

Для ГПУ-решетки (α -фаза):

$$d = \frac{a}{\sqrt{\frac{4}{3}(H^2 + HK + K^2) + L^2 \left(\frac{a}{c}\right)^2}} \quad (3)$$

Также на основе полученных в результате РСА данных можно рассчитать объемные доли фаз с помощью формул:

$$\frac{J_{\alpha}^{(002)}}{J_{\beta}^{(110)}} = 0,168 \frac{C_{\alpha}}{1 - C_{\alpha}} \quad (4)$$

Также можно воспользоваться следующей формулой:

$$\frac{J_{\alpha}^{(101)}}{J_{\beta}^{(110)}} = 0,67 \frac{C_{\alpha}}{1 - C_{\alpha}} \quad (5)$$

В данных формулах: J – интегральная интенсивность, C_{α} – объемная доля α -фазы.

2.5 Измерение микротвердости методом Виккерса

Микротвердостью называется твердость отдельных участков микроструктуры материала. Метод Виккерса – метод измерения твёрдости металлов и сплавов по Виккерсу. Воздействие вершиной алмазной пирамиды, имеющей квадратное основание с углом при вершине между гранями 136° . Оказывая давление, приложенного к индентору, на величину твердости, полученную в области конической канавки, определяемой диагональю выемки. Данный метод является универсальным за счет того, что дает возможность производить измерения твердости любого имеющегося образца. Однако, в данном методе имеет место ограничение на толщину исследуемого объекта: не более 6,05 мм. Метод измерения твердости по Виккерсу требует тщательной обработки поверхности, поэтому, предварительно производится шлифование и полировка поверхности материала. Для измерения твердости образца необходимо вдавить в него алмазный индентор, затем после определенной нагрузки извлечь индентор из сплава. Для определения твердости производится измерение диагоналей, полученного углубления, может вычисляться как отношение нагрузки, приложенной к пирамидке, к площади поверхности отпечатка. На рисунке 2.4 представлена принципиальная схема исследования образца методом Виккерса на микротвердость.

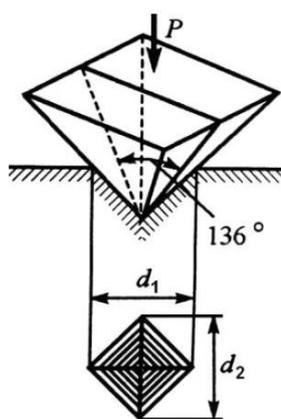


Рисунок 2.5 – Принципиальная схема исследования образца методом Виккерса на микротвердость. P – нагрузка на индентор, d_1 и d_2 – диагонали полученного углубления [29]

Вычисление микротвердости производится по формуле (2):

$$HV = \frac{2 \cdot F \cdot \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)}{d_1 \cdot d_2} \quad (6)$$

Где HV – микротвердость (кг/мм²), α – наклон индентора, F – усилие на инденторе, d_1 и d_2 .

В данной работе Микротвердость образцов была измерена с помощью микротвердомера КВ 30 S. Нагрузка при измерении микротвердости составила 0,5 кг при выдержке 30 с.

2.6 Испытания на одноосное растяжение

Испытания на одноосное растяжение представляют собой деформацию растяжением плоской пластины образца, закрепленной в захватах, и одновременном фиксировании нагрузки и относительного удлинения для последующего анализа данных, полученных через программное обеспечение. Испытания производятся лишь для заготовок, которые строго соответствуют стандартам: ГОСТ 1497- 84, ГОСТ 11701-84 и ГОСТ 9651-84, они могут быть нормальные (с расчетной длиной $l_{расч}=10d$) и укороченные (с $l_{расч}=5d$). Эксперимент завершается в выбираемый оператором момент, либо в момент разрушения образца. На рисунке 2.6 представлен пример образца для испытания на одноосное растяжение.

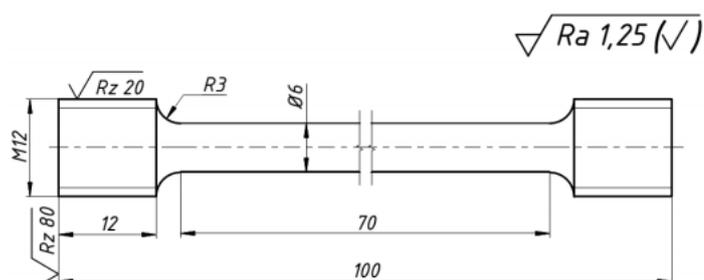


Рисунок 2.6 – Пример образца для испытания на одноосное растяжение по ГОСТ 1497-84 [29]

В общем случае испытания на одноосное растяжение производятся с целью определения следующих параметров образца: предел упругости – наибольшее напряжение, до которого все деформации в материале упругие; предел пропорциональности ($\sigma_{\text{пл}}$) – постепенный переход от упругих деформаций к пластическим, значение напряжения, превышение которого приводит к отклонению от закона Гука; предел текучести ($\sigma_{0,2}$) – напряжение, при котором остаточная (пластическая) деформация составляет 0.2%. Условный момент отклонения кривой « σ - ε » от линейности при напряжении $\varepsilon = 0,002$. $\varepsilon_{0,2}$ – напряжение, при котором происходит пересечение линии с деформационной кривой, переходящей в область пластичности; предел прочности (σ_B) – напряжение, превышение которого приводит к разрушению материала; деформация до разрушения (ε) – удлинение материала под действием нагрузки при котором происходит его разрушение.

Например, в работе [30] образец имел предел текучести, сопоставимый с 600 МПа, и предел прочности, равный 905 МПа. Величина деформации до разрушения составляла 12%. Кривая растяжения исследуемого в работе [30] образца и образца представлена на рисунке 2.7.

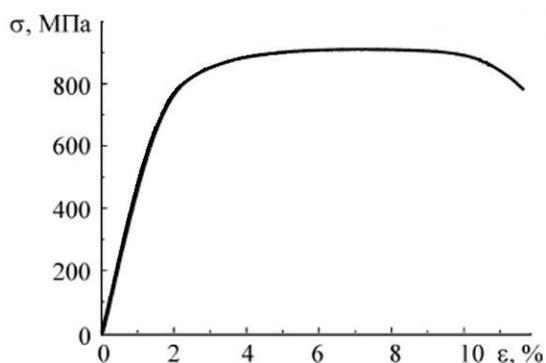


Рисунок 2.7 – Кривая «напряжение – деформация» сплава Ti-6Al-4V [30]

В данной работе испытания на одноосное растяжение образцов в форме двойной лопатки с размерами рабочей части $5 \times 1,5 \times 1$ мм³ проводили на растяжной машине ПВ-2013М с начальной скоростью растяжения $6,9 \cdot 10^{-3}$ с⁻¹ в интервале температур (25–600)°С.

4 Социальная ответственность

Введение

Данный раздел выпускной квалификационной работы посвящен вопросам обеспечения нормативных условий труда и (санитарно-гигиенические требования, обеспечение пожарной безопасности, защита от опасных и вредных производственных факторов) в соответствии с нормативными документами.

Данная работа представляет собой Сравнительные исследования структурно-фазового состояния и механических свойств титанового сплава Ti-6Al-4V, полученного различными методами это предполагает работу на различных установках. Например, установка ARCAM A2 EBM для печати металлических изделий методом электронно-лучевого сплавления (ЭЛС), сканирующий электронный микроскоп с энергодисперсионной приставкой Quanta 200 3D.

Поэтому рассмотрение безопасности и гигиены труда при осуществлении работ по измерению характеристик покрытия титанового сплава Ti-6Al-4V с помощью специального оборудования для проведения экспериментов с целью определения морфологии поверхности особенно важно при проведении данного исследования.

Данный раздел рассматривает опасные и вредные факторы исследования, а также отвечает на вопросы безопасности рабочего и сохранности его здоровья.

4.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности.

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

Правовые нормы трудового законодательства, относительно работы в описанных выше условиях регулируются таким документом как, трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 30.04.2021) [31].

Таким образом, нормальная продолжительность рабочего времени не может превышать 40 часов в неделю, а режим работы предусматривает продолжительность рабочей недели, в данном случае шестидневная рабочая неделя. Как следствие, применяется следующий режим работы: с понедельника по пятницу 7 часов в день, в субботу 5 часов в день. Оплата труда производится в размере не меньше МРОТ, и нормы труда установлены в соответствии с уровнем техники, технологии, организации производства и труда.

4.1.2 Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны исследователя.

Рациональная планировка рабочего места должна обеспечивать: наилучшее размещение орудий и предметов труда, не допускать общего дискомфорта, уменьшать утомляемость работника, повышать его продуктивность труда. Согласно ГОСТ 12.2.032-78 «ССБТ. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования.» [32], должны быть соблюдены требования о размере зоны досягаемости моторного поля в вертикальной и горизонтальной плоскостях, высоты рабочей поверхности, пространства для ног и рабочего сиденья. Отрегулировано размещение средств отображения информации, именно мониторов ЭВМ: под углом $\pm 15^\circ$ от нормальной линии взгляда и в горизонтальной плоскости под углом $\pm 15^\circ$ от сагиттальной плоскости.

4.2 Производственная безопасность

4.2.1 Анализ вредных и опасных факторов, которые могут возникнуть на рабочем месте при проведении исследований.

В ходе анализа рабочего места при проведении исследований было выявлено, что в лаборатории возможно наличие таких вредных и опасных факторов, как: отклонение показателей микроклимата; повышение уровня шума; недостаточная освещенность рабочей зоны; опасность электрического

тока. Все вышеописанные факторы объединены в таблице 4.1 и классифицированы в соответствии с ГОСТ 12.0.003-2015 [33].

Таблица 4.1 - Возможные опасные и вредные факторы

Факторы (ГОСТ 12.0.003-2015)	Тип фактора		Нормативные документы
	Вредный	Опасный	
1.Отклонение показателей микроклимата	+	-	СанПиН 2.2.4.548–96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений [34].
2. Превышение уровня шума	+	-	ГОСТ 12.1.003-2014 ССБТ. Шум. Общие требования безопасности.[35]
3.Недостаточная освещенность рабочей зоны	+	-	СанПиН 2.1.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания.[37]
4.Опасность электрического тока	-	+	Система стандартов безопасности труда. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты. ГОСТ 12.1.019- 2017[39]

4.2.2 Отклонение показателей микроклимата

Микроклиматом называются метеорологические условия внутри производственных помещений. К показателям, входящим в понятие микроклимат можно отнести такие факторы как: температура воздуха, скорость движения воздуха, влажность и тепловое излучение. Отклонение микроклиматических условий от нормы могут вызвать такие факторы, как изменение природных условий, к ним относятся аномальная жара или мороз.

Повышенная влажность воздуха затрудняет терморегуляцию организма, т.к. происходит снижения испарения пота, а пониженная влажность вызывает пересыхание слизистых оболочек дыхательных путей.

Санитарными нормами, установленными для производственных помещений [34] заданы оптимальные и допустимые диапазоны температуры воздуха, скорости движения молекул и влажности воздуха. В таблицах 5-6 представлены оптимальные и допустимые параметры рабочей зоны для

различных категорий работ. В нашем случае, категория работ - Па, т.е. работы, связанные с постоянной ходьбой, выполняемые стоя или сидя, но не требующие перемещения тяжестей.

Таблица 5 - Оптимальные и допустимые параметры температуры для рабочей зоны [34]

Период года	Температура, °С		Относительная влажность воздуха, %		Скорость движения воздуха, м/с	
	Оптим.	Допуст.	Оптим.	Допуст.	Оптим.	Допуст.
Холодный	22-24	18-26	40-60	75	0,1	≤ 0,1
Теплый	23-25	20-30	40-60	55 (280°С)	0,1	0,1-0,2

Таблица 6 - Оптимальные и допустимые параметры скорости движения воздуха для рабочей зоны

Период года	Категория работ по уровню энергозатрат, Вт	Относительная влажность воздуха, %	Скорость движения воздуха, м/с	
			Для диапазона температур воздуха ниже оптимальных величин, не более	Для диапазона температур воздуха выше оптимальных величин, не более
Холодный	Па (175-232)	15-75	0,1	0,3
Теплый	Па (175-232)	15-75	0,1	0,4

К средствам коллективной защиты можно отнести установки кондиционирования воздуха, основная задача которых поддерживать параметры воздуха в установленных пределах, для обеспечения надежной работы и комфортных условий для работников.

4.2.3 Превышение уровня шума

Производственным шумом называется шум на рабочих местах, на участках или на территориях предприятий, который возникает во время производственного процесса. Источниками шума на производстве являются транспорт, технологическое оборудование и системы вентиляции. В нашей научно-исследовательской лаборатории не находится никаких приборов и устройств, создающих шум, который может оказать влияние на здоровье.

Следствием вредного действия производства шума могут быть снижение работоспособности и снижение производительности труда.

Уровень шума на рабочем месте математиков - программистов и операторов видеоматериалов не должен превышать 50дБА, а в залах обработки информации на вычислительных машинах - 65дБА. Для снижения уровня шума стены и потолок помещений, где установлены компьютеры, могут быть облицованы звукопоглощающими материалами с максимальными коэффициентами звукопоглощения в области частот 63 - 8000 Гц.

Средства индивидуальной защиты органов слуха работающих установлены ГОСТ 12.4.318-2019 по системе стандартов безопасности труда.

Для определения допустимого уровня шума на рабочих местах используется ГОСТ 12.1.003-2014 ССБТ. «Шум. Общие требования безопасности.» [35], СН 2.2.4/2.1.8.562–96. «Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории застройки» [36]. В таблице 7 приведены допустимые уровни звукового давления на рабочем месте согласно нормам из СН 2.2.4/2.1.8.562–96.

Таблица 7 - Допустимые уровни звукового давления на рабочем месте, согласно [6]

Вид деятельности	Частота, Гц							
	Уровень звукового давления, дБ							
Научная деятельность, проектирование	62	125	250	500	1000	2000	4000	8000
	71	61	54	49	45	42	40	30

Необходимо использовать средства коллективной защиты. По отношению к источнику возбуждения шума коллективные средства защиты подразделяются на средства, снижающие шум в источнике его возникновения, и средства, снижающие шум на пути его распространения от источника до защищаемого объекта. Внутри здания тихие помещения необходимо располагать вдали от шумных так, чтобы их разделяло несколько других помещений или ограждение с хорошей звукоизоляцией.

4.2.4 Недостаточная освещенность рабочей зоны

Качество освещения влияет на работоспособность сотрудника, на его психологическое состояние в процессе выполнения работ. Наиболее благоприятное влияние на состояние сотрудника оказывает преимущественно естественное освещение. Нормы естественного, искусственного и совмещенного освещения зданий и сооружений, мест производства работ вне зданий представлены в СанПиН 2.1.3685-21 «Гигиенические требования к естественному, искусственному и совмещённому освещению жилых и общественных зданий» [37] он определяет наименьшую освещенность рабочих поверхностей в производственных помещениях в зависимости от вида производимой деятельности.

В соответствии с СП 52.13330.2016 «Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95*» [38] все зрительные работы делятся на 8 разрядов и зависимости от размера объекта различия и условий зрительной работы. Принимаем четвертый разряд зрительной работы (средней точности). Допустимые значения наименьшей освещенности рабочих поверхностей в производственных помещениях в соответствии с выше обозначенным документом, для четвертого разряда зрительной работы приведены в таблице 8.

Таблица 8 – Нормирование значения освещенности на рабочих местах производственных помещений при искусственном освещении

Характер зрительной работы	Наименьший размер объекта	Подразряд зрительной работы	Контраст объекта различия	Характер фона	Освещенность, лк	
					Комбинир.	Общее
Средняя точность	0,5-1,0	а	Малый	Темный	750	300
		б	Малый	Средний	500	200
Разряд зрительной работы	4	в	Средний	Темный	500	200
			Малый	Средний	400	200
			Средний	Средний	400	200

Естественного освещения в лаборатории по условиям зрительной работы, как правило, недостаточно, как правило, недостаточно, поэтому на

рабочих местах оказывается задействованным и искусственное освещение. Оно может быть обеспечено с помощью люминесцентных ламп ЛВ (белого цвета) мощностью 20, 40, 80 Вт. Для рабочих мест с искусственным освещением регламентирована допустимая освещенность, согласно действующим санитарным нормам и правилам СП 52.13330.2016 [39]. Согласно СП 52.13330.2016 газоразрядные лампы приняты в качестве основного источника света. Необходимо учитывать, пульсацию светового потока, слепящее действие, а также возникновение стробоскопического эффекта. Для уменьшения коэффициента пульсации люминесцентные лампы включают в разные фазы трехфазной электрической сети.

4.2.5 Электробезопасность

Основными причинами воздействия тока на человека являются: случайные проникновения или приближение на опасное расстояние к токоведущим частям; появление напряжения на металлических частях оборудования в результате повреждения изоляции и т.д. Поражающее действие электрического тока зависит от значения и длительности протекания тока через тело человека, рода и частоты тока, места протекания тока, индивидуальных свойств человека. Опасной величиной тока является ток, равный 0,001 А, а смертельной 0,1 А. Также исход электропоражения зависит от состояния внешней среды. Могут быть следующие виды воздействий: термическое (ожог); электрическое; механическое (электрометаллизация), биологическое (паралич мышц, электрический удар)

Устанавливает предельно допустимые уровни (ПДУ) напряжений и токов ГОСТ 12.1.038 – 82 [9]. Помещение, в котором производилась дипломная работа, относится к помещениям третьего класса, так как там отсутствуют условия, создающие повышенную или особую опасность, вследствие этого к оборудованию предъявляются следующие требования: экран видеомонитора должен находиться на расстоянии не менее 50 см от пользователя (расстояния от источника); защитное заземление — это преднамеренное электрическое

соединение с землей или ее эквивалентом металлических нетоковедущих частей, которые могут оказаться под напряжением.

Цель защитного заземления – снизить до безопасной величины напряжение относительно земли на металлических частях оборудования, которые не находятся под напряжением, но могут оказаться под напряжением вследствие нарушения изоляции электроустановок. В результате замыкания на корпус заземленного оборудования снижается напряжение прикосновения и, как следствие, ток, проходящий через тело человека, при его прикосновении к корпусам. Наибольшие допустимые значения сопротивления заземления растеканию тока, установленные правилами устройства электроустановок, составляют для установок до 1000В. 4 Ом – при суммарной мощности генераторов или трансформаторов, питающих данную сеть, не более 100 кВА. Наиболее допустимое значение постоянного тока 0,1 А. Наиболее допустимое значение напряжения 36В [40].

4.3 Экологическая безопасность.

Вопрос об охране окружающей среды является актуальным и крайне важным в настоящее время, так как с каждым годом увеличивается количество веществ, загрязняющих окружающую среду. Использование металлических отходов состоит из нескольких технологических операций, в том числе: проверка металлических отходов, отделение отходов черных металлов от отходов цветных металлов, разделение различных неметаллических примесей, окончательный контроль отходов, обработка.

Для утилизации титановых проб используют специальные контейнеры для неорганических материалов. Ввиду того, что титан не токсичен, предварительной обработке перед утилизацией он не подвергается. Вывоз отработанных проб продуктов осуществляется специализированными службами. Таким образом удастся избежать каких-либо загрязнений атмосферы, гидросферы и литосферы, непосредственно, в процессе работы.

4.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях.

4.4.1 Анализ вероятных ЧС, которые могут возникнуть на рабочем месте при проведении исследований.

Возможной ЧС на объекте в данном случае, могут быть сильные морозы. Низкие температуры могут привести к авариям систем теплоснабжения. Также в результате порывов ветра могут быть обрывы линий электропитания, из-за чего возможны перебои в электроснабжении; перегрузки, которые могут стать причиной пожара. Для предотвращения подобных ситуаций необходима организация системы аварийного электропитания, по возможности проведение линии электроснабжения под землей.

Наиболее вероятной ЧС является возникновение пожара при работе с электронной аппаратурой может быть по причинам электрического характера. Причины возникновения пожара электрического характера: короткое замыкание, перегрузки по току, искрение и электрические дуги, статическое электричество и т. п.

Пожарная безопасность обеспечивается наличием огнетушителей. Огнетушитель углекислотный (ОУ-2) для тушения загораний веществ, горение которых не происходит без доступа воздуха, и электроустановок, находящихся под напряжением не более 10000 В. Огнетушитель химический водно-пенный (ОХВП-10) для тушения начальных загораний твердых веществ и легковоспламеняющихся жидкостей (кроме щелочных металлов и веществ, т.к. их горение происходит без доступа воздуха).

Здание должно соответствовать требованиям пожарной безопасности, а именно, наличие охранно-пожарной сигнализации, плана эвакуации, порошковых или углекислотных огнетушителей с поверенным клеймом, табличек с указанием направления к запасному (эвакуационному) выходу [41].

Здание, где был разработан дипломный проект, построено из кирпича. Помещение снабжено противопожарной защитой, направленной на предотвращение воздействия на людей опасных факторов пожара и

ограничения материального ущерба от него рабочее помещение относится к 1-й степени огнестойкости по СНиП 21-01-97 [41].

4.4.2 Обоснование мероприятий по предотвращению ЧС и разработка порядка действия в случае возникновения ЧС.

В качестве превентивных мер по предотвращению пожаров и взрывов на объекте используются такие меры как: не менее одного раза за полгода необходимо проводить со всеми работниками противопожарный инструктаж, обучение правилам противопожарной безопасности; внедрение инструктивных материалов наглядной агитации, регламентов и норм ведения технологического процесса на подстанции; необходимо устраивать противоаварийные работы с распределением выполнения работ при аварийных ситуациях [41].

В рассматриваемой рабочей зоне, для увеличения противопожарной устойчивости: периодический осмотр состояния лабораторного оборудования, ремонт при необходимости; содержание в исправном состоянии токоведущих проводников, обеспечение беспрепятственного подхода, и отхода от оборудования.

В помещениях для оповещения рабочего персонала о наличии ЧС предусмотрено звуковое оповещение, происходящее при срабатывании датчиков на задымление в помещениях. Для локализации или ликвидации загорания на начальной стадии используются первичные средства пожаротушения, применяющиеся до прибытия пожарной команды.

На каждом этаже должно размещаться не менее двух переносных огнетушителей. Огнетушители следует располагать на видных местах вблизи от выходов из помещений. План эвакуации представлен на рисунке 4.1.

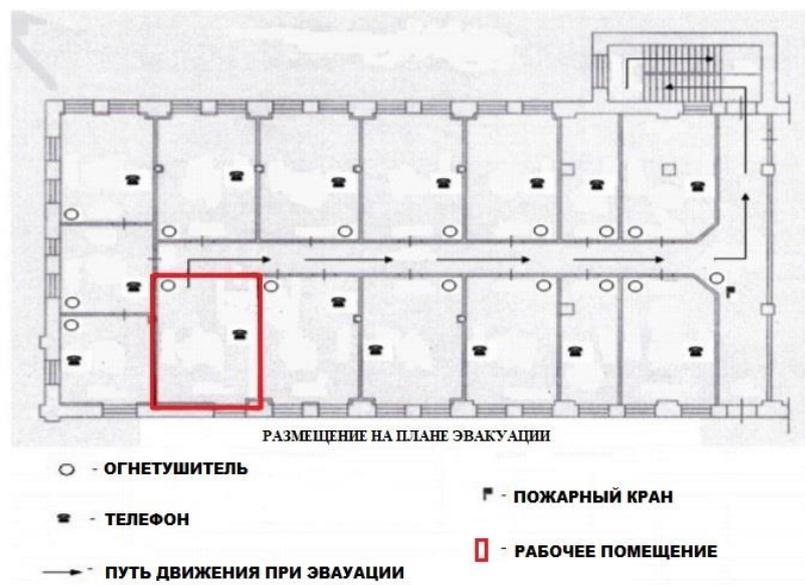


Рисунок 4.1 – План эвакуации из рабочего помещения

4.5 Выводы по разделу

В данном разделе были рассмотрены вопросы обеспечения безопасных, безвредных и пожароопасных условий труда, необходимых при выполнении и написании выпускной работы. Были выделены факторы, оказывающие вредное и опасное влияние на студента в ходе написания работы.

В результате анализа опасных и вредных факторов можно сделать вывод, что помещение, где был разработан дипломный проект, принадлежит к категории помещений без повышенной опасности по степени вероятности поражения электрическим током.

Для создания комфортных условий относительно микроклимата помещения необходимо наряду с естественной применять искусственную (механическую) вентиляцию, например, установить кондиционеры.

В случае ЧС в лаборатории присутствует план эвакуации, огнетушитель. Лаборатория закрывается на сигнализацию и корпус находится под вахтовой охраной. По состоянию пожаробезопасности помещение соответствует нормам.

5 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

Темой настоящей ВКР является: Сравнительные исследования структурно-фазового состояния и механических свойств титанового сплава Ti-6Al-4V, полученного различными методами. Исследуются как сами закономерности изменения механических свойств изделий, изготовленных из титанового сплава Ti-6Al-4V методом электронно-лучевого сплавления (ЭЛС), так и их отличия от изделий, изготовленных традиционными металлургическими методами.

В процессе поиска источников финансирования для проведения научного исследования и коммерциализации его результатов, оценка коммерческой ценности работы является необходимым условием. Помимо превышения технических параметров над предыдущими разработками необходимо понимать коммерческую привлекательность научного исследования.

Целью выполнения финансово-экономической части выпускной квалификационной работы является формирование навыков оценки результата научной работы и поиск источников финансирования для проведения научного исследования. 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.

5.1 Потенциальные потребители результатов исследования

Потенциальными потребителями результатов исследований являются организации в сфере авиастроения, машиностроения и нефтедобывающей

промышленности. В каждой сфере необходимо изготовление материалов менее затратными способами, добываясь новых свойств и качеств. Это означает, что потребители – крупные коммерческие и некоммерческие организации отраслевой принадлежности.

Так как исследования представленных в работе механических свойств для весьма молодого российского рынка аддитивных технологий (АТ) ранее никем не проводилось, результаты будут интересны большинству организаций, вне зависимости от их месторасположения. Проведенные исследования позволяют выявить наиболее подходящих поставщиков напечатанного материала для изготовления конечных изделий, а также получить данные для производства изделий с необходимыми свойствами, что позволит компаниям повысить свою эффективность на интенсивно развивающемся рынке АТ. Карта сегментирования рынка по модификации поверхностей представлена в таблице 5.1.

Таблица 5.1 - Карта сегментирования рынка услуг в области АТ

		Вид услуги			
		3D печать	Испытание на пригодность в условиях эксплуатации	Исследование закономерностей поведения изделий в экстренных ситуациях	
Сфера услуг	Машиностроение				
	Авиастроение				
	Космическая Промышленность				
	Нефтедобывающая промышленность				
	ЗАО «Новомет-Пермь»		ПАО «НПО «Сатурн»		ПАО «Авиадвигатель»

Для определения группы потребителей, которых может заинтересовать результаты данных научных исследований, произведено сегментирование рынка. Выбранные основные характеристики потребителей сегмента: месторасположение – регионы с развитыми отраслями тяжелой промышленности (авиастроение, машиностроение и ядерная энергетика).

Отношение к услуге – готовность внедрять новые технологии в технологический процесс. Закупочные принципы – компании, проводящие централизованный закуп услуг.

В качестве конкурентных компаний были рассмотрены: ЗАО «Нововет-Пермь», ПАО «НПО «Сатурн», ПАО «Авиадвигатель».

Компания «Нововет-Пермь» производство погружных электроцентробежных насосов для добычи нефти.

ПАО «НПО «Сатурн», ПАО «Авиадвигатель» - разработка газотурбинных технологий и двигателей.

Исходя из карты сегментирования рынка услуг в области АТ, результаты научных исследований можно предоставить в рамках сотрудничества с компаниями из сегмента производства деталей авиастроения и/или космической промышленности, учитывая не высокую конкуренцию.

5.2 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научного исследования с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения.

5.2.1 Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения

В связи с необходимостью производства сплавов на основе титана, промышленность по изготовлению данных материалов начала стремительно набирать обороты область производства сложных конструкционных материалов методами АТ, при помощи которых можно было бы снизить стоимость получения необходимых соединений.

Детальный анализ конструктивного исполнения необходим, т.к. каждый тип конструктивного исполнения имеет свои достоинства и недостатки. Данный анализ производится с применением оценочной карты. Экспертная оценка производится по техническим характеристикам и экономическим показателям по 5 бальной шкале, где 1 – наиболее низкая оценка, а 5 – наиболее сильная. Общий вес всех показателей в сумме должен составлять 1. Б_ф –

высокоинтенсивная модификация внутренней поверхности отверстий пучками ионов азота низкой энергии. B_{K1} – нанесение защитных покрытий.

Анализ проводится с помощью оценочной карты; были отобраны 2 конкурентные разработки. Расчет показателя конкурентоспособности производился по формуле:

$$K = \sum i B_i B_i, \quad (5.1)$$

где B_i – балл i -го показателя, B_i – вес показателя (в долях единицы).

Таблица 5.2 - Оценочная карта сравнения конкурентных технических решений

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы		Конкурентоспособность	
		B_{Φ}	B_{K1}	$K_{K\Phi}$	K_{K1}
Технические критерии оценки ресурсоэффективности					
1. Повышение производительности труда пользователя	0.1	4	4	0.4	0.4
2. Удобство в эксплуатации (соответствует требованиям потребителей)	0.05	4	3	0.2	0.15
3. Помехоустойчивость	0.05	4	2	0.2	0.1
4. Энергоэкономичность	0.05	4	4	0.2	0.2
5. Надежность	0.1	4	3	0.4	0.3
6. Уровень шума	0.05	3	3	0.15	0.15
7. Безопасность	0.01	5	5	0.05	0.05
8. Потребность в ресурсах памяти	0.1	4	4	0.4	0.4
9. Функциональная мощность (предоставляемые возможности)	0.1	5	3	0.5	0.3
10. Простота эксплуатации	0.05	4	4	0.2	0.2
11. Качество интеллектуального интерфейса	0.05	4	4	0.2	0.2
12. Возможность подключения в сеть ЭВМ	0.01	5	5	0.05	0.05
Экономические критерии оценки эффективности					
1. Конкурентоспособность продукта	0.05	4	3	0.2	0.15
2. Уровень проникновения на рынок	0.02	5	5	0.1	0.1
3. Цена	0.03	4	4	0.12	0.12

Продолжение таблицы 5.2

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы		Конкурентоспособность	
		Б _Ф	Б _{К1}	К _{КФ}	К _{К1}
4. Предполагаемый срок эксплуатации	0.03	4	4	0.12	0.12
5. Послепродажное обслуживание	0.01	4	4	0.04	0.04
6. Финансирование научной разработки	0.08	4	5	0.32	0.4
7. Срок выхода на рынок	0.05	4	4	0.2	0.2
8. Наличие сертификации разработки	0.01	4	4	0.04	0.04
Итого	1	83	77	4.09	3.67

Исходя из данных таблицы 5.2, конкурентоспособность разработки научного исследования механических свойств изделий из сплава Ti-6Al-4V (Б_Ф) составила 4.09, против 3.67 исследования механических свойств изделий из сплава Ti-6Al-4V (Б_{К1}). Полученные данные свидетельствуют о превосходстве научно-технической разработки (Б_Ф) по критериям: удобство в эксплуатации, помехоустойчивость, надёжность, функциональная мощность и конкурентоспособность продукта. В исследования механических свойств изделий из сплава Ti-6Al-4V (Б_Ф) получить больший объем информации об экспериментальных данных, в отличие от конкурирующего принципа и метода исследования механических свойств изделий (Б_{К1}). Данный метод (Б_Ф) имеет более широкую область применения в промышленности.

5.2.2 SWOT – анализ

SWOT – Strengths (сильные стороны), Weaknesses (слабые стороны), Opportunities (возможности) и Threats (угрозы) – представляет собой комплексный анализ научно-исследовательского проекта.

Сильные стороны – это факторы, которые характеризуют конкурентоспособную сторону научно-исследовательского проекта. Указывают на отличительное преимущество проекта или ресурсы, являющиеся особенными с точки зрения конкуренции.

Слабые стороны – это недостаток, упущение или ограниченность научно-исследовательского проекта, которые препятствуют достижению его целей.

Возможности включают в себя предпочтительную ситуацию в настоящем или будущем, возникающую в условиях окружающей среды проекта, например, тенденцию, изменение или предполагаемую потребность, которая поддерживает спрос на результаты проекта и позволяет руководству проекта улучшить свою конкурентную позицию.

Угроза – это любая нежелательная ситуация, тенденция или изменение в условиях окружающей среды проекта, которая имеет разрушительный или угрожающий характер для его конкурентоспособности в настоящем или будущем.

SWOT-анализ можно осуществить и представить в результирующей таблицы возможностей и угроз НИР, таблица 5.3, а также в виде интерактивной матрицы работы, таблицы 5.4.

Каждый фактор таблицы 5.4 помечается либо знаком «+» (означает сильное соответствие сильных сторон возможностям), либо знаком «-» (что означает слабое соответствие); «0» – если есть сомнения в том, что поставить «+» / «-».

Таблица 5.3 - SWOT-анализ

	<p>Сильные стороны проекта: С1. Актуальность. С2. Применение современного оборудования. С3. Квалифицированный персонал. С4. Заявленная экономичность и энергоэффективность технологии.</p>	<p>Слабые стороны проекта: Сл1. Высокая стоимость. Сл2. Малый круг потребителей. Сл3. Отсутствие у потенциальных потребителей квалифицированных кадров по работе с научной разработкой. Сл4. Отсутствие прототипа научной разработки.</p>
--	--	---

Продолжение таблицы 5.3

<p>Возможности: В1. Появление дополнительного спроса на новый продукт. В2. Снижение таможенных пошлин на сырье и материалы, используемые при научных исследованиях. В3. Повышение стоимости конкурентных разработок.</p>	<p>Результаты анализа интерактивной матрицы проекта полей «Сильные стороны и возможности»: 1. Обеспечение условий для создания кадров в области создания пористых структур для медицинского применения. 2. Появление дополнительного спроса и финансирования, обеспеченных актуальностью тематики.</p>	<p>Результаты анализа интерактивной матрицы проекта полей «Слабые стороны и возможности»: 1. Необходимо финансирование на модернизацию, что возможно реализовать в условиях вуза. 2. Расширение круга потребителей путем модернизации системы.</p>
<p>Угрозы: У1. Отсутствие спроса на новые технологии производства. У2. Развитая конкуренция технологий производства. У3. Введение дополнительных государственных требований к сертификации продукции.</p>	<p>Результаты анализа интерактивной матрицы проекта полей «Сильные стороны и угрозы»: 1. Благодаря возможностям системы своевременному финансированию продвижение на рынок может стать успешным. 2. Повышение конкурентоспособности после модернизации разработки.</p>	<p>Результаты анализа интерактивной матрицы проекта полей «Слабые стороны и угрозы»: 1. Относительно высокая стоимость, и ограниченный круг потребителей может вызвать низкий спрос со стороны заказчиков.</p>

Таблица 5.4 - Интерактивная матрица проекта

Сильные стороны проекта					
Возможности проекта		С1	С2	С3	С4
	В1	+	+	+	0
	В2	+	+	+	-
	В3	-	-	-	0

Результаты SWOT-анализа учитываются при разработке структуры работ, выполняемых в рамках научно-исследовательского проекта. Приведённый анализ показал, что технология, находясь на этапе разработки, имеет хорошие шансы на коммерциализацию, с учетом проявляемого интереса партнеров и удачных исследований. При этом если переход разработки в стадию коммерциализации затянется, то возможна потеря спроса на готовую технологию.

5.3 Планирование научно-технического исследования

В данном разделе составлен перечень этапов и работ в рамках проведения научного исследования и проведено распределение исполнителей по видам работ. Планирование комплекса предполагаемых работ осуществлялось в следующем порядке:

- разработка задания;
- теоретические исследования;
- составление порядка эксперимента, выбор технических режимов;
- изготовление и подготовка исследуемых образцов к исследованиям;
- экспериментальные исследования и оценка результатов экспериментов;
- оформление отчёта и подготовка к защите ВКР.

Данный порядок приведен в таблице 5.5.

Таблица 5.5 - Распределение исполнителей и этапы выполняемых работ

Основные этапы	№ раб	Содержание работ	Должность исполнителя
Разработка технического задания	1	Составление и утверждение технического задания	Руководитель темы (НР)
Выбор направления исследований	2	Подбор и изучение материалов по теме	Руководитель, Лаборант (ЛАБ)
	3	Проведение патентных исследований	Руководитель, лаборант
	4	Выбор направления исследований	Руководитель, лаборант
	5	Календарное планирование работ по теме	Руководитель, лаборант
Теоретические и экспериментальные исследования	6	Проведение теоретических расчетов и обоснований	Руководитель, лаборант
	7	Составление порядка эксперимента, выбор технических режимов	Руководитель, лаборант, сотрудник-техник (СТ)
	8	Изготовление исследуемых образцов	Лаборант

Продолжение таблицы 5.5

Основные этапы	№ раб	Содержание работ	Должность исполнителя
Теоретические и экспериментальные исследования	9	Подготовка исследуемых образцов к проведению экспериментов	Лаборант
	10	Проведение экспериментов	Руководитель, лаборант, сотрудник-техник
	11	Сопоставление результатов экспериментов с теоретическими исследованиями и подготовка к участию в конференции	Руководитель, лаборант
Обобщение и оценка результатов	12	Оценка эффективности полученных результатов и участие в конференции	Руководитель, лаборант
	13	Определение целесообразности проведения ОКР	Руководитель, лаборант

Данная таблица отображает вклад каждого участника исследовательской работы. Наибольшая часть работы приходится на лаборанта (дипломника).

5.3.1 Определение трудоемкости выполнения работ

Трудовые затраты в большинстве случаев образуют основную часть стоимости разработки, поэтому важным моментом является определение трудоемкости работ каждого из участников научного исследования.

С целью определения ожидаемого (среднего) значения трудоемкости используем следующую формулу:

$$t_{ож} = \frac{3t_{min} + 2t_{max}}{5}, \quad (5.2)$$

где $t_{ож}$ – ожидаемая трудоёмкость выполнения работы, чел.дн.; t_{min} – минимально возможная трудоёмкость выполнения работы, чел.дн.; t_{max} – максимально возможная трудоёмкость выполнения работы, чел.-дн. Оценка трудоёмкости выполнения научного исследования для научного руководителя:

$$t_{ож} = \frac{3 \cdot 43 + 2 \cdot 91}{5} = 62.2 \text{ чел.} - \text{дн.}$$

Трудоёмкость выполнения научного исследования для сотрудника – техника:

$$t_{ож} = \frac{3 \cdot 6 + 2 \cdot 18}{5} = 10.8 \text{ чел.} - \text{дн.}$$

Трудоёмкость выполнения научного исследования для лаборанта:

$$t_{ож} = \frac{3 \cdot 61 + 2 \cdot 129}{5} = 88.2 \text{ чел.} - \text{дн.}$$

Далее определим продолжительность каждой работы в рабочих днях T_p , учитывая параллельность выполнения работ несколькими исполнителями, по следующей формуле:

$$T_{pi} = \frac{t_{ож_i}}{Ч_i} \quad (5.3)$$

где $T_{ди}$ – продолжительность одного этапа работы, раб.дн.; $t_{ож_i}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения одной работы, чел.-дн.; $Ч_i$ – численность исполнителей, выполняющих одновременно одну и ту же работу на данном этапе, чел.

Произведем длительно работ в рабочих днях.

Расчёт продолжительности работы выполнения научного исследования для научного руководителя:

$$T_{рд} = \frac{t_{ож}}{K_{вн}} \cdot K_{д} = \frac{62.2 \text{ чел.} - \text{дн.}}{1} \cdot 1 = 62.2 \text{ раб.дни}$$

Продолжительность работы выполнения научного исследования для сотрудника-техника:

$$T_{рд} = \frac{10.8 \text{ чел.} - \text{дн.}}{1} \cdot 1 = 10.8 \text{ раб.дни}$$

Продолжительность работы выполнения научного исследования для лаборанта:

$$T_{рд} = \frac{88.2 \text{ чел.} - \text{дн.}}{1} \cdot 1 = 88.2 \text{ раб.дни}$$

Ленточный график проведения научных работ изображается в форме диаграммы Ганта. Для построения диаграммы необходимо перевести рабочие дни в календарные дни, для чего воспользуемся следующим соотношением:

$$T_{\text{кд}} = T_{\text{рд}} \cdot T_{\text{к}}, \quad (5.4)$$

где $T_{\text{кд}}$ – продолжительность выполнения этапа в календарных днях; $T_{\text{к}}$ – коэффициент календарности, определяющийся выражением 4.4.

$$T_{\text{к}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вд}} - T_{\text{пд}}}, \quad (5.5)$$

где $T_{\text{кал}}$ – количество календарных дней в году; $T_{\text{вд}}$ – количество выходных дней в году; $T_{\text{пд}}$ – количество праздничных дней.

Рассчитаем коэффициент календарности по формуле 4.4:

$$T_{\text{к}} = \frac{365}{365 - 66} = 1.22$$

Построим таблицу по результатам расчётов, в которой укажем трудоёмкости работ, название работы, а также укажем длительность работ в рабочих и календарных днях, таблица 5.6 (Приложение А).

На основе таблицы 5.6, построим календарный план-график. График построим для максимального по длительности исполнения работ в рамках научно-исследовательского проекта, с разбивкой по месяцам и декадам за период времени дипломирования. Отметим области в зависимости от исполнителей, ответственных за конкретную работу, таблица 5.7 (Приложение Б).

Таким образом, в ходе данного этапа работы были определены длительности и обозначены сроки выполнения всех запланированных видов работ. Была построена диаграмма Ганта, наглядно демонстрирующая этапы выполнения проекта участниками.

В результате выполнения подраздела был разработан план-график выполнения этапов работ для руководителя и инженера, позволяющий оценить и спланировать рабочее время исполнителей, а также рассчитано количество дней, в течение которых работал каждый из исполнителей.

5.4 Бюджет научного исследования

5.4.1 Расчет материальных затрат НИИ

В данном разделе составлен полный бюджет научных исследований. Расходы научных исследований состоят из материальных затрат, расходов на специальные оборудования, основной и дополнительной заработной платы, социальные отчисления и накладные расходы.

В статью расходов входят затраты на приобретение материалов, комплектующих изделий, необходимых для выполнения работ по данному научному исследованию. В таблице 5.8 приведены расходы по данной статье.

Таблица 5.8 - Сырье, материалы, комплектующие изделия

Наименование	Марка, размер	Кол-во	Цена за единицу, руб.	Сумма, руб.
Порошок (Ti-6Al-4V) для печати образцов	кг	1	5500	5500
Канцелярские товары	шт.			1500
Спирт	100 мл	2	45	90
Абразивная бумага для шлифовки	Диаметр 300 мм	20	50	1000
Халат	М	1	500	500
Набор лабораторных инструментов	Малый	1	1000	1000
Чашка Петри	80x17	1	400	400
Всего за материалы				9990
Транспортно-заготовительные расходы (3-5%)				499.5
Итого по статье				10489,5

По полученным данным, наибольшие расходы приходятся на порошок для печати образцов.

5.4.2 Расчет затрат на специальное оборудование для научных работ

В рамках выполнения исследования использовалось имеющееся в собственности ИФПМ СО РАН оборудование, и закупка дополнительного специального оборудования не производилась. В таком случае затраты на специальное оборудование отсутствуют. Однако в ходе эксплуатации

оборудования средства были затрачены в соответствии с амортизационными отчислениями. Расчет амортизации производится на находящееся в использовании оборудование. В итоговую стоимость проекта входят отчисления на амортизацию за время использования оборудования в статье накладных расходов.

$$H_A = \frac{1}{n} = 0,1, \quad (5.6)$$

где n – срок полезного использования в количестве лет

Амортизация:

$$A_M = \sum \frac{I \cdot H_A}{12} = 19507 \text{рублей}$$

где I – итоговая сумма, тыс. руб.; – время использования, мес. M

Таблица 5.9 - Амортизационные расходы

№	Наименование оборудования	Ст-ть, руб.	Срок полезного исп., лет	H_A , %	Время исп., мес.	Амортизационные расходы, руб
2	Дифрактометр Shimadzu XRD-7000	740000	7	14	1	8757
3	Микротвердомер KB30S	145000	10	10	2	2417
4	Оптический микроскоп Quanta 200 3D	500000	10	10	2	8333
Итого:						19507

5.4.3 Основная заработная плата исполнителей темы

Статья включает основную заработную плату работников, непосредственно занятых выполнением проекта, (включая премии, доплаты) и дополнительную заработную плату.

Основная заработная плата работников вычисляется по формуле:

$$Z_{зп} = Z_{осн} + Z_{доп} \quad (5.7)$$

где $Z_{\text{осн}}$ – основная заработная плата; $Z_{\text{доп}}$ – дополнительная заработная плата (12-20% от $Z_{\text{осн}}$).

Основная заработная плата одного работника:

$$Z_{\text{осн}} = Z_{\text{дн}} \cdot T_{\text{р}} \quad (5.8)$$

где $T_{\text{р}}$ – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, раб. дн.; $Z_{\text{дн}}$ – среднедневная заработная плата работника, руб.

Среднедневная заработная плата рассчитывалась по формуле:

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_{\text{м}} \cdot M}{F_{\text{д}}} \quad (5.9)$$

где $Z_{\text{м}}$ – месячный должностной оклад работника, руб; M – количество месяцев работы без отпуска в течение года; $F_{\text{д}}$ – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дн.

В таблице 5.10 представлен годовой баланс рабочего времени для 6-дневной рабочей недели, в таблице 5.11 представлен расчет основной заработной платы.

Таблица 5.10 - Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Дни
Календарные дни	365
Нерабочие дни (праздники/выходные)	66
Потери рабочего времени (отпуск/невыходы по болезни)	47
Действительный годовой фонд рабочего времени	252

Таблица 5.11 - Расчёт основной заработной платы

Исполнители	Оклад, руб/мес	Среднедневная ставка, руб/раб. день	Затраты времени, раб. дни	Фонд, з/платы, руб
Научный руководитель	26116	1077.8	62.2	67039.16
Сотрудник-техник	13058	538.9	10.8	5820.12
Лаборант (дипломник)	-	-	88.2	-
Итого				72859.28

По данным таблицы 5.11 получены данные по затратам на заработную плату сотрудников за весь период ВКР.

5.4.4 Дополнительная заработная плата

Расчет дополнительной заработной платы ведется по следующей формуле:

$$Z_{\text{доп}} = k_{\text{доп}} \cdot Z_{\text{осн}} \quad (5.10)$$

где, $k_{\text{доп}}$ – коэффициент дополнительной заработной платы (на стадии проектирования принимается равным 0.12-0.15).

Дополнительная заработная плата руководителя:

$$Z_{\text{доп}} = 0.13 \cdot 67039.12 = 8715.09 \text{ руб.}$$

Дополнительная заработная плата сотрудника-техника:

$$Z_{\text{доп}} = 0.13 \cdot 5820.12 = 756.62 \text{ руб.}$$

Суммарная дополнительная заработная плата равна 9471,71 рубль.

5.4.5 Отчисления во внебюджетные фонды

Данные расходы включают обязательные отчисления по установленным законодательством Российской Федерации нормам органам государственного социального страхования (ФСС), пенсионного фонда (ПФ) и медицинского страхования (ФФОМС) от затрат на оплату труда работников. Ставка отчислений во внебюджетные фонды для учреждений, осуществляющих научную и образовательную деятельность, на 2021 год составляет 30% (ПФ – 22%, ФФОМС – 5.1%, ФСС – 2.9%)

Отчисления во внебюджетные фонды:

$$Z_{\text{внеб.}} = k_{\text{внеб.}} \cdot Z_{\text{осн.}} = 69915 \cdot 0.3 \approx 20974.5 \text{ руб} \quad (5.11)$$

где $k_{\text{внеб}}$ – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды ($k_{\text{внеб}} = 0,3$).

5.4.6 Расчет затрат на электроэнергию

Потребляемая мощность анализатора составляет 7 кВт/час. Длительность еженедельной работы на комплексной технологической установке составляет 2 часа. Стоимость электроэнергии в Томске составляет 5.748 рубля за 1 кВт/час. Стоимость электропотребления за 5 месяцев рассчитывается по формуле:

$$C_{эл.об.} = P_{об.} \cdot Ц_{э} \cdot t_{об.}, \quad (5.12)$$

где $P_{об.}$ – мощность, потребляемая оборудованием, кВт; $Ц_{э}$ – тариф на 1 кВт·час; $t_{об.}$ – время работы оборудования, час.

Затраты на электроэнергию для технологических целей приведены в таблице 5.12.

Таблица 5.12 - Затраты на электроэнергию

Наименование оборудования	Время работы оборудования	Потребляемая мощность $P_{об.}$, кВт	Затраты $C_{эл.об.}$, руб.
Персональный компьютер	646	0.3	1113,96
Комплексная технологическая установка	40	7	1609,44
Итого			2723,4

5.4.7 Расчет затрат на научные и производственные командировки и накладные расходы

Затраты на научные и производственные командировки исполнителей определяются в соответствии с планом выполнения темы и с учетом действующих норм командировочных расходов различного вида и транспортных тарифов, а также организационных взносов на конференции. Расчеты по данному пункту представлены в таблице 5.13.

Таблица 5.13 - Расчеты на научные и производственные командировки

Наименование мероприятия	Оплата, руб
Конференция «ПРФН XVIII»	1500
Итого: 1500 руб.	

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

$$Z_{\text{накл}} = \frac{\sum \text{статей} \cdot 1}{7} \cdot k = 3143,45 \text{ рубля}$$

где k – коэффициент, учитывающий накладные расходы ($k = 0,16$).

5.4.8 Формирование бюджета затрат НИИ

Расчет бюджета затрат в результате проведения НИИ представлен в таблице 5.14.

Таблица 5.14 - Бюджет затрат

Наименование статьи	Сумма, руб
Материальные затраты	10489,5
Затраты на специальное оборудование для научных работ	19507
Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	72859,28
Затраты по доп. заработной плате исполнителей темы	9471,71
Отчисления во внебюджетные фонды	20974,5
Затраты на электроэнергию	2723,4
Затраты на научные производственные командировки	1500
Накладные расходы	3143,45
Бюджет затрат	140668,42

5.5 Ресурсоэффективность

Определение эффективности происходит на основе расчёта интегрального показателя эффективности научного исследования. Его нахождение связано с определением двух величин: финансовой эффективности и ресурсоэффективности.

Интегральный показатель финансовой эффективности научного исследования получают в ходе оценки бюджета затрат трёх вариантов исполнения научного исследования. Для этого наибольший интегральный

показатель реализации технической задачи принимается за базу расчёта, с которым соотносятся финансовые значения по всем вариантам исполнения.

Интегральный финансовый показатель разработки определяется по следующей формуле:

$$I_{\text{ФИНР}}^{\text{ИСП}i} = \frac{\Phi_{Pi}}{\Phi_{\text{max}}}, \quad (5.13)$$

где Φ_{Pi} – стоимость i -го варианта исполнения; Φ_{max} – максимальная стоимость исполнения научно-исследовательского проекта.

Интегральный показатель ресурсоэффективности вариантов исполнения объекта исследования можно определить по формуле:

$$I_{pi} = \sum a_i \cdot b_i, \quad (5.14)$$

В таблице 5.15 представлена сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта. Данный проект сравнивается с методикой качественного анализа материалов, заложенной в программе как базовая.

Таблица 5.15 - Сравнительная оценка характеристик

Критерии	Весовой коэффициент параметра	Данный проект	Базовая методика качественного анализа материалов
Способствует росту производительности труда	0.25	5	5
Соответствует требованиям потребителей	0.15	4	4
Энергосбережение	0.2	4	3
Надежность	0.2	4	4
Материалоемкость	0.2	5	4
Интегральный показатель ресурсоэффективности		4.45	4.25

Характеристики имеют схожие критерии, так как методики реализованы для одного прибора. Каждая из представленных методик реализована для определённой задачи.

Пример расчёта интегрального показателя ресурсоэффективности:

$$I_p = 0.25 \cdot 5 + 0.15 \cdot 4 + 0.2 \cdot 4 + 0.2 \cdot 4 + 0.2 \cdot 5 = 4.45$$

Интегральный показатель эффективности вариантов исполнения разработки определяется на основании интегрального показателя ресурсоэффективности и интегрального финансового показателя по следующей формуле:

$$I_{исп} = \frac{I_{pi}}{I_{финр}}, \quad (5.15)$$

Сравнительная эффективность проекта определяется по следующей формуле:

$$\mathcal{E}_{ср} = \frac{I_{д.п.}}{I_{исп}}, \quad (5.16)$$

В таблице 5.16 представлена сравнительная эффективность данного проекта с базовой методикой качественного анализа материалов.

Таблица 5.16 - Сравнительная эффективность

Показатели	Данный проект	Базовая методика качественного анализа материалов
Интегральный финансовый показатель	1	1
Интегральный показатель ресурсоэффективности	4.45	4.25
Интегральный показатель эффективности	4.45	4.25
Сравнительная эффективность вариантов исполнения	1.05	0.95

Анализируя данные таблицы 14, разработанная методика эффективнее стандартной. Традиционная оценка экономической эффективности полученных результатов невозможны, т.к. они носят чисто научный характер.

5.6 Выводы по разделу

В ходе выполнения раздела «Финансовый менеджмент» был выполнен анализ конкурентоспособности. Проведён SWOT-анализ проекта, в ходе которого были выявлены потенциальные внутренние и внешние сильные и слабые стороны, возможности и угрозы. Из анализа выяснили, что потенциальных сильных сторон у проекта больше, чем слабостей, что свидетельствует о перспективности исследования. Сильными сторонами можно назвать то, что технология является экономичной, энергоэффективной и экологичной, имеет маленький срок готовых результатов при проведении научного исследования и имеет квалифицированный персонал. К слабым сторонам можно отнести отсутствие прототипа научной разработки, Недостаток финансовых средств, большой срок поставок материалов и комплектующих, используемых при проведении научного исследования.

При планировании научно-исследовательской работы был произведен подсчет бюджета исследования по материальным затратам (10489,5 руб.), затратам на специальное оборудование для научной работы (19507 руб.), затратам по основной заработной плате исполнителей тем (72859,28 руб.), затратам по дополнительной заработной плате (9471,71 руб.), затратам на научные и производственные командировки (1500 руб.), отчислениям во внебюджетные фонды (20974,5), затратам на электроэнергию (2723,4 руб.) и накладным расходам (3143,45 руб.). Всего бюджет составил 140668,42 руб.

Проведена оценка результатов ресурсоэффективности, которая составила 4,45 из 5, что говорит о хорошей эффективности реализации технического проекта.

Проведение такого рода оценки коммерческой ценности необходимо, чтобы оценить состояние и перспективы проводимых научных исследований.

Заключение

Методы аддитивного производства титановых сплавов не только увеличивают практичность и удобность изготовления изделий за счет увеличения мобильности, но еще и снижают количество компонентов и комплектующих деталей для изготовления деталей. Механические свойства сплавов, полученных традиционными методами уже подробно исследованы, в то время как о сплавах, полученных методами АП известно значительно меньше. В ходе работы была рассмотрена микроструктура титанового сплава Ti-6Al-4V, а также закономерности ее изменения при повышении температуры в интервале от комнатной до 600°C. Было изучено структурно-фазовое состояние и механические свойства титанового сплава Ti-6Al-4V, полученного различными методами. Были рассчитаны значения параметров решетки и объемные доли фаз сплава. За счет преобладающей в сплаве α -фазы сплав имеет повышенные прочностные характеристики. Получены кривые «напряжение – деформация» образцов титанового сплава Ti-6Al-4V, полученных различными методами. В результате сравнительного анализа было определено, что во всем исследованном диапазоне температур прочностные характеристики ЭЛС сплава Ti-6Al-4V превышают соответствующие значения для литых образцов в 1,11 раза, 1,07 раза, 1,2 раза, соответственно. В то же время, для ЭЛС образцов величины пластических характеристик меньше аналогичных величин для образцов, полученных традиционным образом в 5,3 раза, 1,6 раза, 2,5 раза, соответственно. Сравнительный анализ микроструктуры показал, что по всей площади поверхности разрушения, как при комнатной, так и при повышенных температурах наблюдаются области вязкого разрушения, характеризуемого наличием ямочек, микроуглублений на поверхности излома. При повышении температуры у ЭЛС образцов на поверхности разрушения наблюдаются единичные поры размером 20-30 мкм, а также цепочки более мелких пор размером порядка 5-10 мкм. Наличие пор является одной из

основных причин ухудшения пластических характеристик образцов, полученных методом ЭЛС по сравнению с литыми образцами.

Список литературы

1. Александров В.М. Материаловедение и технология конструкционных. Учебное пособие. Часть 1 / Александров В.М. – Архангельск: Северный (Арктический) федеральный университет, 2015. – 327 с.
2. Илларионова А. А. Титан и его применение в строительных и архитектурных сооружениях // XVIII международная научно-техническая Уральская школа-семинар металловедов-молодых ученых. — Екатеринбург, 2017. – 2017. – №. 18. – С. 306-309.
3. Насакина Е. О. и др. Биосовместимость наноструктурного нитинола с поверхностными композиционными слоями из титана или тантала, сформированными методом магнетронного напыления // Доклады академии наук. – Федеральное государственное бюджетное учреждение " Российская академия наук", 2015. – Т. 461. – №. 1. – С. 49-49.
4. Илларионов А.Г. Технологические и эксплуатационные свойства титановых сплавов: учебное пособие / Попов А.А. – Екатеринбург.: Урал. ун-та, 2014. – 137 с.
5. Юрасёв Н. И. О возможностях развития аддитивных технологий в России // Современная экономика: проблемы и решения. – 2015. – Т. 9. – С. 72-79.
6. Szymczyk-Ziółkowska P. et al. The Impact of EBM-Manufactured Ti6Al4V ELI Alloy Surface Modifications on Cytotoxicity toward Eukaryotic Cells and Microbial Biofilm Formation //Materials. – 2020. – Т. 13. – №. 12. – С. 2822.
7. Zhang L. C., Chen L. Y. A review on biomedical titanium alloys: recent progress and prospect //Advanced engineering materials. – 2019. – Т. 21. – №. 4. – С. 1801215.
8. Костыгова Л. А., Ракова Н. Н., Хотинский А. А. Перспективы развития производства и потребления металлопродукции из титана //Экономика в промышленности. – 2015. – №. 2. – С. 17-21.

9. Neikter M. Microstructure and texture of additive manufactured Ti-6Al-4V: дис. – Luleå University of Technology, 2017.
10. Campbell I. et al. Wohlers report 2018: 3D printing and additive manufacturing state of the industry: annual worldwide progress report. – Wohlers Associates, 2018.
11. Attaran M. The rise of 3-D printing: The advantages of additive manufacturing over traditional manufacturing //Business Horizons. – 2017. – Т. 60. – №. 5. – С. 677-688.
12. Bandyopadhyay A., Gualtieri T. P., Bose S. Global engineering and additive manufacturing //Additive Manufacturing. – 2015. – Т. 1. – С. 9-11..
13. Джуган А.А., Ольшанецкий В.Е., Овчинников А.В., Степанова Л.П., Михайлютенко А.О. Использование титановых порошков в методах 3D печати изделий. – Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2016. – №2. – С. 77-81.
14. Сироткин О.С. Современное состояние и перспективы развития аддитивных технологий //Авиационная промышленность. – 2015. – №2. – С. 22-25.
15. Белов С. В. и др. Перспективы применения аддитивных технологий в производстве сложных деталей газотурбинных двигателей из металлических материалов //Аддитивные технологии в российской промышленности. – 2015. – С. 21-21.
16. Жеманюк П. Д. и др. Применение титановых порошков нового поколения (HDH2) в аддитивных технологиях //Авиационно-космическая техника и технология. – 2016. – №. 8. – С. 139–144.
17. Алишин М. И., Князев А. Е. Производство металлопорошковых композиций высокой чистоты титановых сплавов методом индукционной газовой атомизации для аддитивных технологий //Труды ВИАМ. – 2017. – №. 11 (59). – С. 37-45.

18. Зленко, М.А. Аддитивные технологии в машиностроении: пособие для инженеров / М.А. Зленко, М.В. Нагайцев, В.М. Довбыш. – М.: ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ». – 2015. – 220 с.
19. Байтимеров Р. М. и др. Определение оптимальных параметров селективного лазерного сплавления титанового сплава TiAl6V4 углекислотным лазером //Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение. – 2017. – Т. 17. – №. 3.. – С. 36-40.
20. Ахонин С. В. и др. Электронно-лучевая плавка нового высокопрочного титанового сплава Т120 //Современная электрометаллургия. – 2017. – №. 1. – С. 15-21.
21. Azam F. I. et al. An in-depth review on direct additive manufacturing of metals //IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2018. – Т. 328. – №. 1. – С. 9-9.
22. Сомонов В. В. Прямое лазерное выращивание из титановых сплавов: сравнение методов получения изделий из порошка и проволоки //Технические науки: проблемы и перспективы. – 2018. – С. 44-50.
23. Панин П. В., Ширяев А. А., Дзунович Д. А. Построение температурно-концентрационной диаграммы фазового состава титанового сплава ВТ6, дополнительно легированного водородом //Технология машиностроения. – 2014. – №. 3. – С. 5-9.
24. Анохин С.В., Селин Р.В., Березос В.А., Пикулин А.Н., Северин А.Ю., Ерохин А.Г. Разработка нового высокопрочного титанового сплава. – Современная электрометаллургия. – 2016. – № 4 (125). – С. 22-27.
25. Rafi H. K. et al. Microstructures and mechanical properties of Ti6Al4V parts fabricated by selective laser melting and electron beam melting //Journal of materials engineering and performance. – 2013. – Т. 22. – №. 12. – С. 3872-3883.
26. Xu W. et al. In situ tailoring microstructure in additively manufactured Ti-6Al-4V for superior mechanical performance //Acta Materialia. – 2017. – Т. 125. – С. 390-400.

27. Zhang W. et al. Superior wear resistance in EBM-Processed TC4 alloy compared with SLM and forged samples //Materials. – 2019. – Т. 12. – №. 5. – С. 782.
28. Курзина И. А., Годымчук А. Ю., Качаев А. А. Рентгенофазовый анализ нанопорошков //Томск: Изд-во Томского политехнического университета. – 2010. – 14 с.
29. Ларина, Т.В. Сборник описаний лабораторных работ по дисциплине «материаловедение и технология конструкционных материалов». – СГГА. – 2013. – 127 с.
30. Panin A. V. et al. Multiscale deformation of commercial titanium and Ti – 6Al-4V alloy subjected to electron beam surface treatment //Physical Mesomechanics. – 2018. – Т. 21. – №. 5. – С. 441-451.
31. Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. От. 30.04.2021).
32. ГОСТ 12.2.032-78 ССБТ. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования.
33. ГОСТ 12.0.003-2015. Опасные и вредные производственные факторы, и их классификация.
34. СанПиН 2.2.4.548–96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений.
35. ГОСТ 12.1.003-2014 ССБТ. Шум. Общие требования безопасности.
36. СН 2.2.4/2.1.8.562–96. Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории застройки.
37. СанПиН 2.1.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания.
38. СП 52.13330.2016. Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95*.
39. ГОСТ 12.1.019-2017. Система стандартов безопасности труда. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты.

40. ГОСТ Р 54149-2010. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.

41. СНиП 21-01-97*. Пожарная безопасность зданий и сооружений.

Приложение А

Таблица 5.6 – Временные показатели проведения научного исследования

Название работы	Трудоемкость работ									Длит. работ в раб. дни Т _{рД}			Длит. работ в кален. дни Т _{кД}		
	t _{min} , чел.-дн			t _{max} , чел.-дн			t _{ож} , чел.-дн			НР	СТ	ЛАБ	НР	СТ	ЛАБ
	НР	СТ	ЛАБ	НР	СТ	ЛАБ	НР	СТ	ЛАБ						
Составление и утверждение технического задания	2	-	-	4	-	-	2.8	-	-	2.8	-	-	3.4	-	-
Подбор и изучение материалов по теме	10	-	10	21	-	30	14.4	-	18	14.4	-	18	17.6	-	21.96
Проведение патентных исследований	5	-	7	8	-	15	6.2	-	10.2	6.2	-	10.2	7.6	-	12.4
Выбор направления исследований	3	-	5	4	-	7	3.4	-	5.8	3.4	-	5.8	4.2	-	7.1
Календарное планирование работ по теме	2	-	3	3	-	4	2.4	-	3.4	2.4	-	3.4	2.9	-	4.2
Проведение теоретических расчетов и обоснований	4	-	7	6	-	10	4.8	-	8.2	4.8	-	8.2	5.9	-	10
Составление порядка эксперимента, выбор технических режимов	1	1	2	3	3	4	1.8	1.8	2.8	1.8	1.8	2.8	2.2	2.2	3.4
Изготовление исследуемых образцов	-	-	2	-	-	3	-	-	2.4	-	-	2.4	-	-	2.9
Подготовка образцов к проведению экспериментов	-	-	7	-	-	12	-	-	9	-	-	9	-	-	11
Проведение экспериментов	5	5	5	15	15	15	9	9	9	9	9	9	11	11	11
Сопоставление результатов экспериментов с теоретическими исследованиями; подготовка к конференции*	5	-	7	10	-	12	7	-	9	7	-	9	8.5	-	11
Оценка эффективности полученных результатов; участие в конференции**	3	-	3	10	-	10	5.8	-	5.8	5.8	-	5.8	7.1	-	7.1
Определение целесообразности проведения ОКР	3	-	3	7	-	7	4.6	-	4.6	4.6	-	4.6	5.6	-	5.6
Итого	43	6	61	91	18	129	62.2	10.8	88.2	62.2	10.8	88.2	75.9	13.2	107.6

Приложение Б

Таблица 5.7 – Календарный план-график (график Ганта) проведения НИОКР

№ работ	Вид работ	Исполнители	Т _{кi} , кал. дн.	Продолжительность выполнения работ														
				январь	февраль			март			апрель			май			июнь	
				3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2
1	Составление и утверждение технического задания	Руководитель темы	4.88															
2	Подбор и изучение материалов по теме	Руководитель	25.6															
		Лаборант (дипломник)	36.6															
3	Проведение патентных исследований	Руководитель	9.8															
		Лаборант (дипломник)	18.3															
4	Выбор направления исследований	Руководитель	4.9															
		Лаборант (дипломник)	8.5															
5	Календарное планирование работ по теме	Руководитель	3.7															
		Лаборант (дипломник)	4.9															
6	Проведение теоретических расчетов и обоснований	Руководитель	7.3															
		Лаборант (дипломник)	12.2															

- Руководитель темы
 - Лаборант (дипломник)
 - Сотрудник-техник

Продолжение таблицы 5.7

№ работ	Вид работ	Исполнители	Т _{кi} , кал. дн.	Продолжительность выполнения работ																
				январь	февраль			март			апрель			май			июнь			
				3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2		
7	Составление порядка эксперимента, выбор технических режимов	Руководитель	3.7																	
		Лаборант (дипломник)	4.9																	
		Сотрудник-техник	3.7																	
8	Изготовление исследуемых образцов	Лаборант (дипломник)	3.7																	
9	Построение 3D моделей	Лаборант (дипломник)	14.6																	
10	Проведение экспериментов	Руководитель	18.3																	
		Лаборант (дипломник)	18.3																	
		Сотрудник-техник	18.3																	
11	Сопоставление результатов экспериментов с теоретическими исследованиями;*	Руководитель	12.2																	
		Лаборант (дипломник)	14.6																	
12	Оценка эффективности полученных результатов;**	Руководитель	12.2																	
		Лаборант (дипломник)	12.2																	
13	Определение целесообразности проведения ОКР	Руководитель	8.5																	
		Лаборант (дипломник)	8.5																	

- Руководитель темы
 - Лаборант (дипломник)
 - Сотрудник-техник