

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 – Физика конденсированного состояния
 Отделение школы (НОЦ) – Отделение экспериментальной физики

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Влияние отжига на сорбцию водорода и механические свойства титанового сплава Ti-6Al-4V, полученного с помощью аддитивных технологий УДК 621.785.3:669.788:669.295.5

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
ОБМ81	Дин Цзыи		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЭФ ИЯТШ	Пушилина Н.С.	к.ф.-м.н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

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

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент	Сечин А.А.	к.т.н.		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Руководитель отделения ЭФ	Лидер А.М	д.т.н., профессор		

Томск – 2020 г.

Планируемые результаты освоения

Код	Результат обучения	Требования ФГОС ВО, СУОС, критериев АИОР, и/или заинтересованных сторон
Общие по направлению подготовки (специальности)		
P1	Понимает необходимость самостоятельного обучения и повышения квалификации в течение всего периода профессиональной деятельности.	Требования ФГОС ВО (ОПК-1, ОПК-4), СУОС ТПУ (УК-5, УК-6), Критерий 5 АИОР (п. 2.6), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P2	Способен эффективно работать самостоятельно в качестве члена команды по междисциплинарной тематике, быть лидером в команде, консультировать по вопросам проектирования научных исследований, а также быть готовым к педагогической деятельности.	Требования ФГОС ВО (ОПК-1, ОПК-2, ОПК-7, ПК-1, ПК-6), СУОС ТПУ (УК-3), <i>CDIO Syllabus</i> (4.7), Критерий 5 АИОР (п. 2.4), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i> ,
P3	Способен находить зарубежных и отечественных партнеров, владеет иностранным языком, позволяющим работать с зарубежными партнерами с учетом культурных, языковых и социально-экономических условий.	Требования ФГОС ВО (ОПК-1, ОПК-2, ОПК-7), СУОС ТПУ (УК-3, УК-4, УК-5), <i>CDIO Syllabus</i> (2.4, 3.3), Критерий 5 АИОР (п. 2.6), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i> ,
P4	Проявляет понимание используемых методов, области их применения, вопросов безопасности и здравоохранения, юридических аспектов, ответственности за профессиональную деятельность и ее влияния на окружающую среду.	Требования ФГОС ВО (ОПК-1, ОПК-2), СУОС ТПУ (УК-5, УК-6), <i>CDIO Syllabus</i> (4.1), Критерий 5 АИОР (п. 2.4), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P5	Способен обрабатывать, анализировать и обобщать научно-техническую информацию, передовой отечественный и зарубежный опыт в профессиональной деятельности, осуществлять презентацию научной деятельности.	Требования ФГОС ВО (ОПК-5, ОПК-6, ПК-1, ПК-2, ПК-4, ПК-5, ПК-7), СУОС ТПУ (УК-4, УК-5, УК-6), <i>CDIO Syllabus</i> (2.1, 2.3, 2.4), Критерий 5 АИОР (п. 4.1, 2.2., 2.6), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>

Р6	Способен планировать проведение аналитических имитационных исследований по профессиональной деятельности с применением современных достижений науки и техники, передового отечественного и зарубежного опыта в области научных исследований, умеет критически оценивать полученные теоретические и экспериментальные данные и делает выводы, знает правовые основы в области интеллектуальной собственности.	Требования ФГОС ВО (ОПК-7, ПК-2, ПК-3, ПК-4, ПК-7), СУОС ТПУ (УК- 2, УК- 6), <i>CDIO Syllabus</i> (2.4), Критерий 5 АИОР (п. 1.1, 1.4, 1.6), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
Р7	Способен применять полученные знания для решения нечетко определенных задач, в нестандартных ситуациях, использует творческий подход для разработки новых оригинальных идей и методов исследования в области физики металлов, материаловедения и термообработки.	Требования ФГОС ВО (ОПК-4, ОПК-5, ОПК-6,: ПК-2, ПК-5), СУОС ТПУ (УК- 1, УК- 4), <i>CDIO Syllabus</i> (2.1, 2.2, 2.3, 2.4), Критерий 5 АИОР (п. 1.1, 1.2, 1.3, 1.5, 1.6), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
Р8	Способен планировать и проводить фундаментальные исследования в проектах в области ядерно-физических исследований, взаимодействия излучения с веществом, а также модернизация современных и создание методов изучения механических, электрических, магнитных, тепловых свойств твердых тел и критически оценивать полученные результаты	Требования ФГОС ВО (ОПК-3, ОПК- 5, ОПК- 6, ОПК-7, ПК-2, ПК-3), СУОС ТПУ (УК- 1, УК- 2), <i>CDIO Syllabus</i> (4.4), Критерий 5 АИОР (п. 1.1., 1.2, 1.4, 1.6), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Школа – Инженерная школа ядерных технологий
Направление подготовки – Физика конденсированного состояния
Отделение школы (НОЦ) – Отделение экспериментальной физики

УТВЕРЖДАЮ:
Руководитель ООП
_____ Лидер А.М.
(Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Магистерской диссертации

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

Студенту:

Группа	ФИО
ОБМ81	Дин Цзыи

Тема работы:

**Влияние отжига на сорбцию водорода и механические свойства титанового сплава
Ti-6Al-4V, полученного с помощью аддитивных технологий**

Утверждена приказом директора (дата, номер)

Срок сдачи студентом выполненной работы:

02.06.2020 г.

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе

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

Титанового сплава Ti-6Al-4V, изготовленного методом электронно-лучевого сплавления

<p>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</p> <p><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; – Исследование влияния термической обработки на поглощение водорода и механические свойства титанового сплава Ti-6Al-4V, изготовленного методом электронно-лучевого сплавления. – Анализ полученных результатов; – Социальная ответственность; – Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение; – Заключение.
--	---

<p>Перечень графического материала</p> <p><i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> – Структура поверхности титанового сплава до и после отжига. – Зависимость напряжения от деформации сплава Ti-6Al-4V до и после отжига
--	---

Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы

(с указанием разделов)

Раздел	Консультант
Социальная ответственность	Сечин А.А.
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Кащук И.В.

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

Обзор литературы; материалы и методика исследования; экспериментальная часть; финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение; социальная ответственность; заключение

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	Пушилина Н.С.	к.ф.-м.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
ОБМ81	Дин Цзыи		

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

Студенту:

Группа	ФИО
ОБМ81	Дин Цзыи

Школа	Инженерная школа ядерных технологий	Отделение школы (НОЦ)	Отделение экспериментальной физики
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	03.04.02 Физика

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

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

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

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

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей)

1. <i>Оценка конкурентоспособности НИ</i>
2. <i>Матрица SWOT</i>
3. <i>Диаграмма Ганта</i>
4. <i>Бюджет НИ</i>
5. <i>Основные показатели эффективности НИ</i>

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

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Кашук И. В.	К.Т.Н		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
ОБМ81	Дин Цзыи		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа		ФИО	
ОБМ81		Дин Цзыи	
Школа	Инженерная школа ядерных технологий	Отделение (НОЦ)	Отделение экспериментальной физики
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	03.04.02 Физика

Тема ВКР:

Влияние отжига на сорбцию водорода и механические свойства титанового сплава Ti-6Al-4V, полученного с помощью аддитивных технологий	
Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:	
1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	Прибор: Gas Reaction Controller; Рабочая зона: лаборатория; Материал: титановый сплав ВТ6
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности: – специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; – организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.	Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности: специальные (характерные для проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства (приводится перечень ГОСТов, СНИПов и др. законодательных документов, использованных в своей работе);
2. Производственная безопасность:	– метеоусловия ; – шум производства; – Электромагнитные поля; – Освещенность.
3. Экологическая безопасность:	Экологическая безопасность: – Влияние экспериментальных отходов на окружающую среду; – Предложим решение;
4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:	– перечислить возможные ЧС при разработке и эксплуатации проектируемого решения; – указать наиболее типичную ЧС.
Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент	Сечин А.А.	К.Т.Н		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
ОБМ81	Дин Цзыи		

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
 федеральное государственное автономное образовательное учреждение
 высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
 ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Школа – Инженерная школа ядерных технологий

Уровень образования Магистратура

Направление подготовки – Физика конденсированного состояния

Отделение школы (НОЦ) – Отделение экспериментальной физики

Период выполнения _____

Форма представления работы:

Магистерская диссертация (бакалаврская работа, дипломный проект/работа, магистерская диссертация)
--

**КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН
 выполнения выпускной квалификационной работы**

Срок сдачи студентом выполненной работы:	
--	--

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
01.03.2019	Аналитический обзор литературы	15
01.09.2019	Исследование влияния отжига при 780 °С на микроструктуру титанового сплава Ti-6Al-4V, изготовленного методом электронно-лучевого сплавления.	15
30.12.2019	Исследование влияния отжига при 780 °С на твердость и прочностные характеристики титанового сплава Ti-6Al-4V, изготовленного методом электронно-лучевого сплавления.	20
01.04.2020	Анализ результатов	15
01.05.2020	Социальная ответственность	15
01.05.2020	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	15
01.05.2020	Заключение	5

Составил преподаватель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЭФ ИЯТШ ТПУ	Пушилина Н.С.	к.ф.-м.н.		

СОГЛАСОВАНО:

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Руководитель ОЭФ	Лидер А.М.	д.т.н.		

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 99 с., 17 рис., 23 табл., 70 источников.

Ключевые слова: титановый сплав, водород, отжиг, электронно-лучевое плавление.

Объектом исследования является титановый сплав Ti-6Al-4V, изготовленный методом электронно-лучевого сплавления (ЭЛС).

Цель работы – исследование влияния термической обработки на поглощение водорода и механические свойства титанового сплава Ti-6Al-4V, изготовленного методом электронно-лучевого сплавления.

В процессе исследования проводилось изучение микроструктуры отожженного сплава Ti-6Al-4V, полученного методом ЭЛС, проводились испытания на растяжение, и изучалась скорости поглощения водорода.

В результате исследования установлено, что отжиг приводит к увеличению толщины α -пластин, что приводит к уменьшению предела прочности и увеличению деформации. Отжиг образцов привел к снижению скорости сорбции водорода.

Основные конструктивные, технологические и технико-эксплуатационные характеристики: Температура отжига 780 °С Отжиг приводит к уменьшению предела прочности и увеличению деформации.

Область применения: результаты исследований могут быть использованы для разработки методов термообработки образцов аддитивного производства.

Экономическая эффективность/значимость работы заключается в разработке и создании изделий, превышающих механические свойства изделий, полученных традиционными методами.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	13
Глава 1. Аддитивные технологии производства металлических изделий	16
1.1 Классификация аддитивных технологий.....	16
1.2 Метод электронно-лучевого сплавления.....	17
1.3 Микроструктура и физико-механические свойства титановых сплавов, изготовленных аддитивными технологиями.....	23
1.4 Влияние термической обработки на свойства титановых сплавов, изготовленных аддитивными технологиями	27
Глава 2. Взаимодействие водорода с титановыми сплавами	29
2.1 Взаимодействие водорода с титановыми сплавами	29
2.2 Диффузия водорода в титановых сплавах.....	30
Глава 3. Материалы и методы исследования	34
3.1 Материал для исследований	34
3.2 Метод наводороживания титановых сплавов из газовой среды.....	34
3.3 Метод одноосного растяжения.....	35
3.4 Исследование микроструктуры и фазового состава образцов.....	37
Глава 4. Влияние отжига на структуру и механические свойства образцов титанового сплава Ti-6Al-4V, полученных методом аддитивных технологий	39
4.1 Влияние отжига на микроструктуру образцов сплава Ti-6Al-4V, изготовленных методом электронно-лучевого сплавления	39
4.2 Влияние отжига на механические свойства образцов сплава Ti-6Al-4V, изготовленных методом электронно-лучевого сплавления	43
4.3 Сорбция водорода образцами титанового сплава Ti-6Al-4V, полученных методом аддитивных технологий.....	47
Заключение	49
Глава 5. Финансовый менеджмент, ресурс эффективность и ресурсосбережение.....	51
5.1 Потенциальные потребители результатов исследования	51

5.2 SWOT-анализ.....	53
5.3 Планирование научно-исследовательских работ	54
5.4 Определение трудоемкости выполнения работ	55
5.5 Разработка графика проведения исследования.....	56
5.6 Бюджет научного исследования	58
5.7 Сырье, материалы, покупные изделия и полуфабрикаты.....	58
5.8 Специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ	59
5.8.1 Расчет амортизации специального оборудования.....	59
5.8.2 Основная заработная плата исполнителей темы	60
5.8.3 Дополнительная заработная плата	61
5.8.4 Отчисления во внебюджетные фонды.....	61
5.8.5 Накладные расходы	62
5.8.6 Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта	62
5.8.7 Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, социальной и экономической эффективности исследования.	62
Вывод.....	64
Глава 6. Социальная ответственность.....	66
6.1 Анализ вредных факторов на рабочем месте.....	66
6.1.1 Метеоусловия	66
6.1.2 Шум производства	68
6.1.3 Электромагнитные поля.....	70
6.1.4 Освещенность.....	71
6.2 Экологическая безопасность.....	72
6.3 Электробезопасность	73
6.4 Пожарная безопасность	73
6.5 Безопасность в чрезвычайных ситуациях	75
6.6 Правовые и организационные вопросы.....	76
Вывод.....	77

Список использованных источников	78
Приложение	85

Введение

Аддитивное производство (АМ) – это относительно новая технология, в которой изделия / детали производятся непосредственно из электронных данных, как правило, из программного обеспечения компьютерного проектирования (САД) [1]. Эта технологий предлагает много дизайнерских и производственных преимуществ, таких как быстрое время выполнения, сложная геометрия получаемых изделий. Подобно электронно-лучевой сварке, ЭЛС использует высокоэнергетические электронные пучки в качестве источника тепла для плавления и путем быстрого самоохладения, металлический порошок, изготовленный в слоеобразовании. Кроме того, ЭЛС является одной из нескольких технологий АМ, способных создавать функциональные металлические детали с высокой плотностью, резко расширяя применение АМ. В частности, способность прямых изготовлений металлических деталей может значительно ускорить разработку, особенно для сложных компонентов, например, тонких сетевых структур, внутренних полостей и каналов, которые трудно сделать с помощью обычных производственных средств [1, 2].

Машины ЭЛС были впервые коммерциализированы компанией Arcam АВ в Швеции в 1997 году. Поскольку ЭЛС обладает многими уникальными характеристиками, такими как высокая энергоэффективность, высокая скорость сканирования и умеренная стоимость оборудования, последние годы эта технология привлекла повышенный интерес из разных отраслей. Использование электронного пучка предлагает широкие возможности, такие как высокая скорость сборки благодаря увеличению глубины проникновения и скоростям быстрого сканирования. С тех пор многие исследовательские группы изучают технологию ЭЛС из разных аспектов и для различных приложений. Несмотря на потенциальные преимущества по сравнению с традиционными технологиями производства, ЭЛС по-прежнему имеет

несколько недостатков процесса, таких как стабильность процесса, дефекты деталей и вариации качества [3].

Несмотря на интенсивное развитие аддитивных технологий производства конструкционных металлических материалов, многие вопросы остаются нерешенными и требуют детального изучения. В частности, остаются вопросы, связанные с управлением структурой получаемых материалов, снижением дефектности материалов и т.д. Целью настоящей работы является исследование влияния термической обработки на сорбцию водорода, микроструктуру и механические свойства титанового сплава Ti-6Al-4V, изготовленного методом электронно-лучевого сплавления. Для решения поставленной цели необходимо решить следующие задачи: 1. Исследование влияния термообработки на микроструктуру титанового сплава Ti-6Al-4V, изготовленного методом электронно-лучевого сплавления. 2. Исследование влияния термообработки на твердость титанового сплава Ti-6Al-4V, изготовленного методом электронно-лучевого сплавления. 3. Исследование влияния термообработки на прочностные характеристики титанового сплава Ti-6Al-4V, изготовленного методом электронно-лучевого сплавления. 4. Исследование влияния термообработки на сорбцию водорода титановым сплавом Ti-6Al-4V, изготовленным методом электронно-лучевого сплавления.

Положения, выносимые на защиту:

1. Закономерности влияния отжига при температуре 780 °C на изменение микроструктуры и фазового состава сплава Ti-6Al-4V, изготовленного методом электронно-лучевого сплавления, заключающиеся в уменьшении доли бета фазы, микронапряжений, увеличении размеров пластин альфа-фазы.
2. Отжиг при 780 °C длительностью не менее двух часов сплав Ti-6Al-4V, изготовленный методом электронно-лучевого сплавления снижает микротвердость, прочность, при сохранении пластичности,

что обусловлено изменениями структурно-фазового состояния при термообработке.

3. Термическая обработка при 780 °C приводит к снижению сорбции водорода в 2 раза по сравнению с образцами сплава Ti-6Al-4V, изготовленными методом электронно-лучевого сплавления, что обусловлено уменьшением внутренних напряжений и уменьшением доли бета фазы.

Глава 1. Аддитивные технологии производства металлических изделий

1.1 Классификация аддитивных технологий

Аддитивное производство - это новая технология, которая произвела революцию в разработке и производстве продукции. По сравнению с традиционными процессами, деталь изготавливается с помощью аддитивных процессов путем постепенного наращивания твердого материала из порошковых слоев до требуемой формы [1]. Поскольку этот метод не требует никаких приспособлений и инструментов, достигнуто значительное снижение стоимости и времени выполнения заказа.

Первая технология аддитивного производства появилась в 1987 году и использовала лазер для обработки материалов. Совсем недавно разработанные системы начинают использовать электронный пучок [2]. Эти методы обработки называются процессами плавления лазерным лучом (LBM) или селективного лазерного плавления (SLM); или процессы электронно-лучевой плавки (EBM). Процесс LBM также обычно называют селективным лазерным плавлением (SLM). Сначала этот метод разрабатывался для изготовления промышленных деталей, теперь рассматривался как экономичный метод изготовления медицинских протезов [3,4]. Поскольку использование инертного газа и вакуума необходимо для изготовления лазера и электронного пучка, соответственно, он идеален для изготовления титановых компонентов, которые легко окисляются на воздухе.

На рисунке 1.1 и 1.2 показаны схематические представления для систем EBM и SLM. Система EBM на рисунке использует вакуумную среду, аналогичную другим электронно-оптическим системам. Электронный луч, генерируемый в электронной пушке, фокусируется и сканируется с помощью электромагнит. Порошок подается из кассет и разбивается на слои. Образец изготовлен в процессе циклом расплава слоя. Система SLM на

рисунке 1.1б использует среду чистого газа. Лазерный луч поступает в систему в одной точке, отклоняется с помощью зеркальной системы и фокусируется в линзе. Порошок распространяется системой граблей поверх платформы. Избыточный порошок используется повторно, как показано на рисунке 1.1. Основные различия между двумя системами, EBM и SLM, является толщина порошкового слоя (100 мкм и 40 мкм). Скорость построения системы SLM более высокая, чем у системы EBM. Это приводит к более быстрому охлаждению, особенно для образцов небольшого размера, изготовленных SLM.

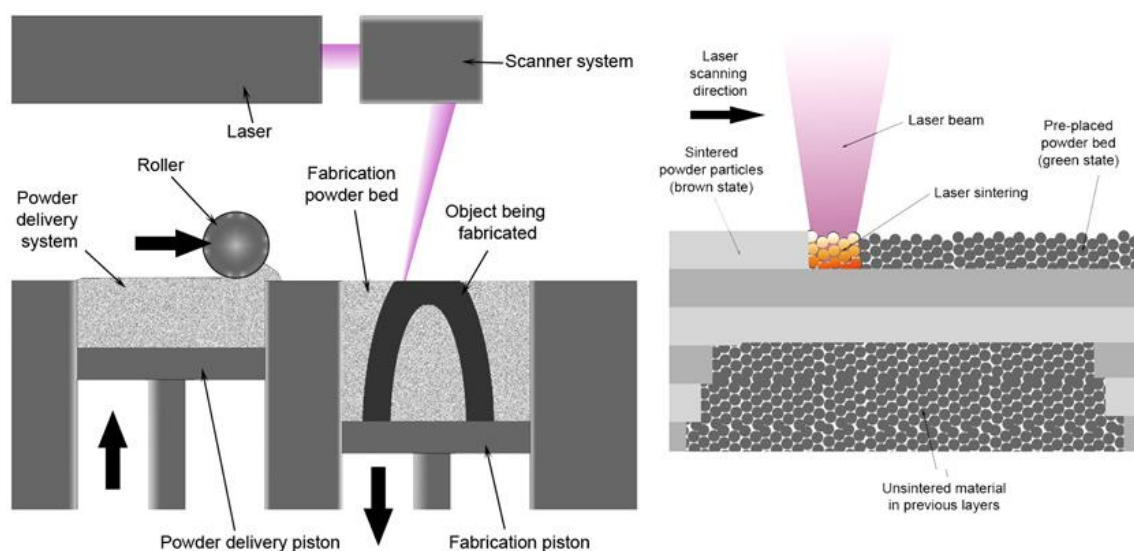


Рисунок 1.1 – Схема селективная лазерная плавильная система (SLM)

[4].

1.2 Метод электронно-лучевого сплавления

Процесс ЭЛС представляет собой аддитивный процесс, который основан на металлическом порошке и высокой энергии пучком. ЭЛС является одним из немногих процессов АМ, которые могут создавать сложные части со сложными материалами. Процесс ЭЛС может быть использован во многих различных категориях материалов, такими как нержавеющая сталь, жаропрочные сплавы на основе Ni, жаропрочные сплавы на основе Co, сплавы с низким коэффициентом расширения, интерметаллические соединения, алюминий, медь, бериллий и ниобия [2]. Использование этой

технологии в настоящее время сосредоточено на титане и различных титановых сплавах [2], [5]. Типичный титановый компонент традиционно изготавливается путемковки, экстрагирования или плавления литьем. Однако из-за высокой температуры плавления, низкой текучести и высокой аффинности с атмосферными агентами использование этих сплавов вызвало несколько проблем [6].

Технология ЭЛС работает в вакууме и высокой мощности и широко используется в медицинских имплантатах, автомобильных и аэрокосмических деталях [2]. Использование технологии ЭЛС в области медицины позволяет создавать отдельные имплантаты со сложной структурой и демонстрировать высокую биосовместимость и остеоинтеграцию [7]. Удачным примером являются две европейские компании, которые производят титановые вертлужные впадины.: Lima Lto и Ala Ortho Srl, в Италии. Промышленные успехи включают лопасти турбины, рабочие колеса турбокомпрессора и клапаны двигателя внутреннего сгорания[8]. В настоящее время технология ЭЛС используется в аэрокосмической промышленности для производства высокопроизводительных, легких и сложных функциональных материалов [2]. Применение технологии ЭЛС может значительно сократить время выхода на рынок, а порошок можно обрабатывать многократно благодаря уменьшению количества отходов[9]. Особого внимания заслуживают полностью плотные металлические детали, изготовленные из сплавов Ti-Al, поскольку эти материалы продемонстрировали интересные свойства для аэрокосмической промышленности, такие как низкая плотность, высокая удельная прочность, высокая удельная жесткость, вязкость трещин, коррозионная стойкость и стойкость к окислению[2].

Система ЭЛС считается аналогичной сварочной машине, а принцип работы аналогичен электронному микроскопу. На рисунке 1.2 показаны основные компоненты машины ЭЛС: блок электронного пучка и сборная камера. Блок электронного луча включает в себя электронную пушку,

которая генерирует электроны, и магнитную линзу, которая формирует и отклоняет луч света. Нагретая нить испускает электроны. Потенциал между катодом и анодом обычно составляет около 60 кВ. Электроны ускоряются со скоростью от 0,1 до 0,4 от скорости света [10]. Форма и отклонение электронного пучка контролируются магнитными линзами [11]. Первый набор катушек (астигматические линзы) корректирует форму пучка, а второй набор катушек (фокусный линз) управляет размером пучка. Последний набор катушек (отклоняющий линз) используется для позиционирования пучка на платформе сборки [10]. Электронная пушка фиксирована, механическая часть не используется для управления или отклонения пучка [12]. Весь процесс происходит в вакууме, чтобы молекулы воздуха не рассеивают электронную пушку [13]. Рабочее давление в обрабатывающей камере обычно составляет около 10^{-3} Па [14]. В процессе плавления добавляют инертного газа, чтобы избежать накопления электрических зарядов в порошке и обеспечить термическую стабильность процесса [15]. Кабина сборки состоит из трех основных частей: сборного резервуара, порошкового питателя и системы сгребания [13].

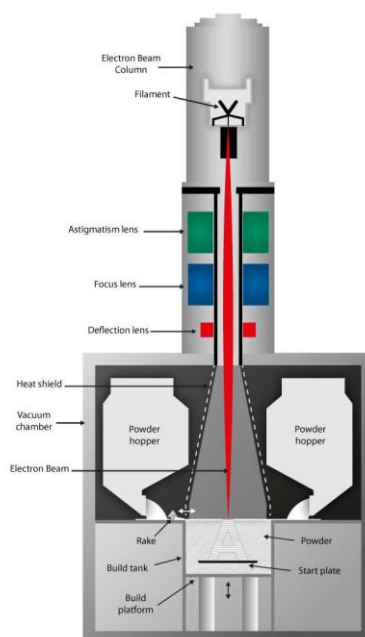


Рисунок 1.2 – Компоненты машины Arcam [17]

На рисунке 1.3 изображен процесс ЭЛС. Процесс сборки начинается с нагревания стартовой пластины. Начальная температура пластины определяется по порошковому материалу [13], и контролируется добавленной мощностью пучка. Порошок обычно получают с помощью метода распыления газа или с помощью метода плазменного вращающегося электрода [16]. Форма полученной частицы сферическая, размеры частиц составляют от 45 до 100 нм [16]. Порошок распределяется на плоскости сборки, которые собирают порошок с обеих сторон и перемещаются по поверхности. Система грабли управляет количеством распределенного порошка, чтобы толщина слоя порошка равномерно распределена [13]. Толщина слоя колеблется от 0,050 мкм до 0,200 мкм, в зависимости от материала порошков [16]. Первый слой расплавленного порошка образует фундамент детали. Эти слои могут образовывать прочный фундамент, или они могут образовывать тонкую сетевую структуру, которая становится несущей конструкцией. Порошкообразный слой нагревается через ряд расфокусированных пучков с высокой мощностью и высокой скоростью. После того как порошок расплавлен, сборочная станция опускается один слой, а дополнительный порошок доставляется из бункеров порошка. Этот процесс повторяется до завершения. После завершения производственного процесса деталь охлаждается при повышенном давлении гелия. В конце процесса, когда деталь удаляется из камеры, мягкий агломератный порошок прилипает к детали и полностью покрывает ее [17]. Этот агломерат называется отрывным порошком [15], и он можно удаляет с помощью пескоструйной обработки [19]. Неиспользуемый порошок можно перерабатывать несколько раз без какого-либо изменения химических или физических свойств.

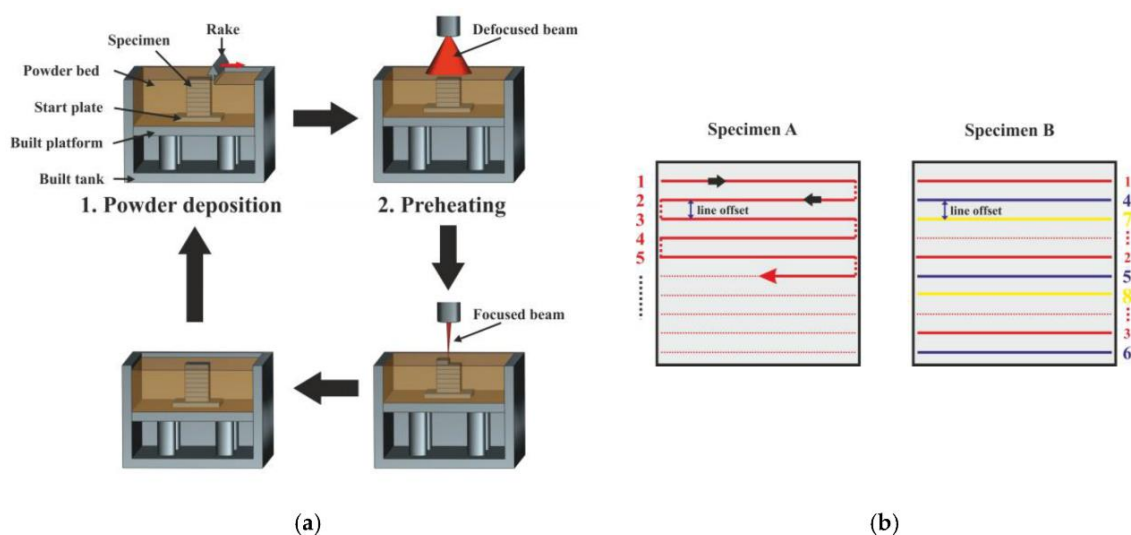


Рисунок 1.3 – процесс ЭЛС[18].

Процесс ЭЛС включает в себя несколько физических механизмов. Эти механизмы сложны, и основным механизмом является взаимодействие между электронным и порошковым слоями. Поскольку скорость сканирования очень высокая, изменение фазы происходит за короткий промежуток времени [20]. Когда электроны ударяют частицы порошка, большая часть их кинетической энергии выделяется в виде тепловой энергии, которая плавится, нагревает и испаряет материал [20]. Остальная кинетическая энергия преобразуется в излучение и вторичные электроны.

Cline и Anthony [21] описывали тепловой поток для электронного пучка.

$$\frac{\partial T}{\partial t} - D_t \nabla^2 T = \frac{Q}{c_p} \quad (1.1)$$

где T – распределение температуры в материале по толщине и связанное с плотностью мощности Q . D – Коэффициент термодиффузии с постоянной скоростью сканирования. c_p – удельной теплоемкости на единицу объема. Частичная дифференциальная форма в уравнении (1) также может представлять скорость охлаждения

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -v \frac{\partial T}{\partial x} \quad (1.2)$$

где плоскость x - y нормальна к оси пучка (ось z), как показано на рис.3 (а). Плотность мощности Q связана с мощностью, поглощенной на поверхностном (P).

$$Q = \frac{P(f)}{2\pi r^2 \lambda} \quad (1.3)$$

где f - функция распределения гауссова пучка, Идеальная ситуация показана в крайнем правом углу на рис.3 (b), r - размер пятна пучка (рис 1.3 (b)), λ - длина поглощения.

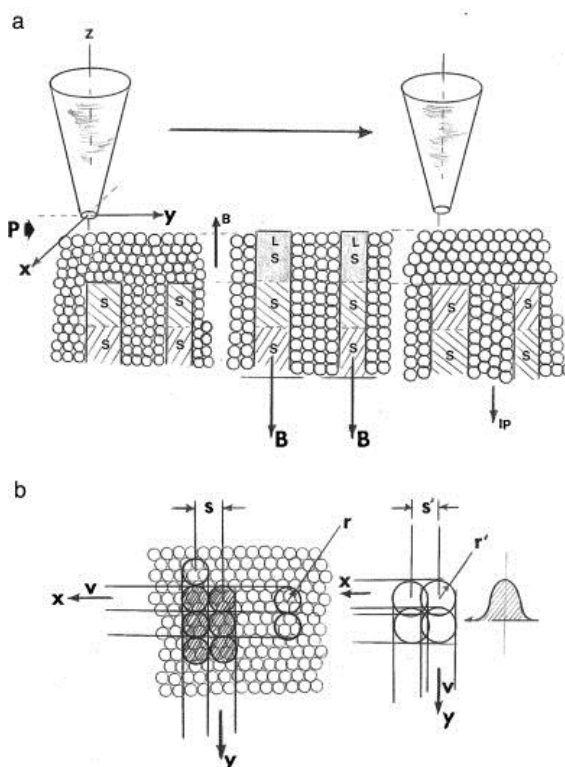


Рисунок 1.4 – Схема сканирования луча[22].

В случае использования электронного пучка, часть падающих электронов испытывает столкновения с ядрами и обратно рассеивается из твердого тела, а затем теряет значительную энергию. Поэтому коэффициент отражения энергии принимает форму

$$T \sim \frac{Q(1-R)}{\rho C_p t} \quad (1.4)$$

где T - локальная температура, Q - плотность мощности, R - коэффициент отражения, ρ - плотность материала, который увеличивается по мере формирования и расплавления порошкового слоя, как показано на рис 1.3 (a).

При электронно-лучевом плавлении существует много параметров и стратегий сканирования, которые могут изменены или оптимизированы для изменения микроструктур порошкового слоя [21]. Они включают напряжение, ток луча, фокус, частоту сканирования и последовательность сканирования. Например, последовательность сканирования пучка включает в себе порядок сканирования, ток пучка и скорость сканирования. Толщина и плотность слоя в какой-то степени зависят от распределения частиц по размерам порошка и параметров, показанных в уравнениях (2) и (4). Однако скорость охлаждения в уравнении (2) также зависит от размера и объема компонента и быстрее для маленьких компонентов [22]. Соответственно, скорость охлаждения можно существенно влиять на микроструктуру, особенно те, которые связаны с фазовым преобразованием. Нагревание вызывает отжиг сформированного слоя, и это имеет влияние на остаточные микроструктуры и свойства, особенно механические свойства [22].

1.3 Микроструктура и физико-механические свойства титановых сплавов, изготовленных аддитивными технологиями

Производственные процессы, связанные с изделиями из Ti, включают литье, ковку и новые методы обработки цифровым производством, таким как ЭЛС. По сравнению с компонентами, изготовленными традиционными методами, технике АМ может быть улучшено свойство материала. Механические свойства, в частности свойства на растяжение и усталость, являются наиболее часто используемыми свойствами для оценки эксплуатационных характеристик материалов титановых сплавов.

Испытания на растяжение широко использовались для характеристики механических свойств образцов. Некоторые исследователи [23] обнаружили, что конечная прочность на растяжение образцов на основе ЭЛС выше, чем у литых образцов, а пластичность ниже. Однако другие представили, что пластичность литых образцов выше, чем образца на основе ЭЛС [24].

Причину разницы можно объяснить изменением параметров, которые приводят к различным структурам, таким как состав, структуры, форма детали и распределение пористости и т. д.

N. Hrabe и T. Quinn изучали влияние ввода энергии электронного пучка на механические свойства встроенных деталей ЭЛС [25]. Результаты показывают, что конечная прочность на растяжение, предел текучести уменьшался с увеличением энергии. M. Koike и др исследовали и сообщили, что конечная прочность на растяжение и предел текучести образцов ЭЛС аналогичны значениям литых образцов. Различия вызваны рифленой поверхностью шероховатого образца и высокой содержания кислорода в образцах ЭЛС.

Таблица 1.1 – Свойства при растяжении для деталей Ti6Al4V, изготовленных методом SLM и ЭЛС по сравнению со свойствами традиционно изготовленных изделий.

Метод производства	Предел текучести, МПа	Предел прочности, МПа	Относительное удлинение, %
ЭЛС[26]	984	1033	9
ЭЛС[26]	961	1008	7.1
ЭЛС[27]	845	972	14.2
ЭЛС[28]	970	1045	10.9
ЭЛС[29]	1026	1095	13.5
SLM [27]	1150	1246	1.4
SLM[28]	961	1032	2.7
Ковка[27]	836	942	12.5
Литье[30]	865	980	13.5

Сжатие испытания также было использовано для оценки образцов ЭЛС. X. Li и др [31] использовали ЭЛС для изготовления пористых деталей Ti-6Al-4V. Испытание на сжатие показало линейное изменение упругой деформации, за которой следует плавный этап, наконец структура разрушаются из-за

потери устойчивости и пластичности. Авторы сообщили, что частиц Ti-6Al-4V с 66% пористости имеют прочность на сжатие 116 МПа и модуль Юнга 2,5 ГПа, близкий к губчатой кости человека. Кроме того, авторы сообщили, что жесткость и прочность уменьшаются с увеличением пористости.

Предел усталости до распространения трещины (пороговое напряжение, $\Delta\sigma_w$) является типичным параметром, характеризующим микроскопическое зарождение трещины, которые являются макроскопическими характеристиками усталостных характеристик.

Таблица 1.2 – Усталостные свойства для деталей Ti6Al4V, изготовленных методом SLM и ЭЛС по сравнению со свойствами традиционно изготовленных изделий.

Метод производства	$\Delta\sigma_w$, МПа
ЭЛС[33]	340
ЭЛС[34]	200-250
SLM[33]	550
SLM[34]	500
Ковка[33]	600
Литье[35]	150-270

Наличие остаточных напряжений в металлической структуре является прямой причиной возникновения трещины. Следует отметить, что остаточные напряжения состоят из растягивающих и сжимающих напряжений. Остаточные напряжения при сжатии благоприятны для усталостных свойств, в то время как остаточные напряжения при растяжении функционируют вредно [32]. Из-за высоких температурных градиентов лазерные АМ-процессы подвержены большому количеству остаточных напряжений, когда растягивающие напряжения распределены на поверхности. В отличие от SLM, образцы ЭЛС практически не имеют остаточных напряжений из-за высокой температуры.

Во многих сплавах существует сильная корреляция между пределом растяжимости и твердостью [36], но корреляция не ясна для данных, доступных в литературе для АМ. Gu и др [37] обнаружили, что износостойкость коммерчески чистого титана, полученного аддитивным производством, была лучше, чем у аналогичного материала, получаемого методом порошковой металлургии. Образцы титана, изготовленных методом АМ имеют наивысшую твердость и износостойкость, а образцы с растрескиванием или внутренней пористостью имели меньшую твердость и износостойкость.

Таблица 1.3 – Твердость для деталей Ti6Al4V, изготовленных методом SLM и ЭЛС.

Метод производства	Твердость, HV
ЭЛС[38]	421
ЭЛС[23]	330
ЭЛС[39]	423
SLM[38]	507
SLM [23]	410

Шероховатость поверхности в АМ сильно варьируется и зависит от местоположения детали, параметров процесса и характеристик сырья [47]. В таблице 1.4 приведены некоторые примерные значения, где показаны значения как обращенные вверх и вниз. Как правило, шероховатости, обращенные вниз, больше, так как расплавленный материал находится в верхней части слоя порошка и может погрузиться в него.

Таблица 1.4 – Шероховатости для материалов Ti-6Al-4V изготовленных методом ЭЛС.

Литература	Шероховатость поверхности(Ra) [мкм]	
	Вверх	Вниз
Рука и др[40].	7	12
Соорер и др[41].	3.96	17.5

1.4 Влияние термической обработки на свойства титановых сплавов, изготовленных аддитивными технологиями

Сплав ВТ6 является типичным двухфазным титановым сплавом [42]. Крутой скорость нагрева и охлаждения в процессе ЭЛС привели к типичной внутренней микроструктуре детали ВТ6. Таким образом, титановый сплав ВС6, изготовленный с помощью ЭЛС, обычно демонстрирует высокий предел текучести, но ограниченную пластичность и низкое сопротивление усталости [42]. Термическая обработка оказывает существенное влияние на свойства сплава ВТ6, сформированного из ЭЛС.

S. Bruschi и др исследованы влияние термообработки на износостойкости сплава Ti6Al4V, полученного методом ЭЛС [43]. Результаты показали, что термообработанные образцы имели более низкий коэффициент трения, меньшую степень износа и более высокую степень износа адгезива. Затем было продемонстрировано, что механическая обработка муфты и термическая обработка имеют синергетический эффект, который можно использовать в качестве эффективной стратегии для повышения износостойкости ЭЛС Ti6Al4V [43]. На термообработанном образце показал очень тонкий слой шаровидной микроструктуры чуть ниже обработанной поверхности, за которым следовала мартенситная структура, которая простиралась до нескольких десятков микрон под поверхностью. Изменение микроструктуры как следствие термической обработки привело к значительному увеличению твердости поверхности [43].

B. Vrancken и др изучается влияние нескольких термических обработок на микроструктуру и механические свойства Ti6Al4V, изготовлены SLM [44]. Для деталей, изготовленных по технологии SLM, когда температура термообработки ниже температура β -перехода (995°C), исходная мартенситная α -фаза преобразуется в пластинчатую смесь α и β , но характеристики исходной микроструктуры сохраняются [44]. При температуре обработки выше β -перехода происходит обширный рост зерен и

образуются большие β -зерна, которые превращаются в пластинчатые $\alpha + \beta$ после охлаждения. Механические свойства очень сильно зависят от максимальной температуры термообработки. С повышением максимальной температуры деформация разрушения увеличивается из-за превращения α в грубую смесь α и β [44].

R. Wauthle и др исследовали влияние две параметра обработки, а именно ориентация сборки и термическая обработка на Ti6Al4V [45]. Эффект термообработки одинакова для всех ориентаций сборки. Применение термической обработки для снятия напряжений приводит к решетчатой структуре с немного более сильными, но более хрупкими механическими свойствами [45]. После обработки горячим изостатическим прессованием микроструктура изменяется на пластинчатую $\alpha + \beta$ -фазу, и это приводит к низкой максимальной прочности, высокой пластичности [45].

Вследствие трансформации $\beta \rightarrow \alpha$ при высоких скоростях охлаждения ВТ6 обычно приводит к экстенсивному образованию хрупких мартенситных микроструктур [42]. Соответствующий процесс термообработки может снять остаточное напряжение в процессе аддитивного производства; контролировать $\alpha - \beta$ фазовое превращение; настроить форму, размер и содержание фазы; и оптимизировать микроструктуру и механические свойства.

Глава 2. Взаимодействие водорода с титановыми сплавами

2.1 Взаимодействие водорода с титановыми сплавами

Изучению диаграммы состояния системы титан – водород посвящено довольно много работ. Диаграмма состояния Ti-H приведена на рисунке 2.1. [47]. Согласно диаграмме состояния титан-водород, внедрение водорода вызывает увеличение области β -фазы и уменьшение области α -фазы. Водород является стабилизатором бета фазы. В системе Ti-H происходит эвтектоидный распад β -фазы на α - и γ -фазы. На рисунке 2.1 отмечены две линии эвтектоидного распада β -фазы, отвечающие ее положению при нагреве и охлаждении. Эвтектоидная точка лежит при 36,6 – 38,0 % (ат.) H_2 [1,21 – 1,26 масс. %]. Фазы альфа и бета представляют собой твердые растворы внедрения водорода в α - и β - титане, фаза гамма является твердым раствором водорода на основе гидрида титана TiH_2 . Растворимость водорода в α -титане при эвтектоидной температуре составляет 0,18 масс. %. Растворимость водорода в α -титане при комнатной температуре мала 0,002 – 0,005 масс.% [46,47]. Растворимость водорода в любой аллотропической форме титана увеличивается с повышением температуры; в то время как для общего количества водорода, которое может содержаться в γ -фазе, наблюдается обратная зависимость, поскольку формирование гидрида является экзотермическим процессом.

Во всех трех основных кристаллических решетках металлов можно найти октаэдрические и тетраэдрические интерстициальные узлы. В разных материалах предпочтение отдается различным наборам узлов. Кроме того, в случае решетки ГПУ, каждый атом металла окружен 6 октаэдрическими сайтами и 8 тетраэдрическими сайтами. Так как число всех атомов существуют в решетке, число октаэдрических узлов одинаково. Существуют два кристаллографических эквивалентных тетраэдрических узла, расположенных в направлении [001] выше и ниже каждого атома. Остальные

6 тетраэдрических участков расположены на несколько большем расстоянии от атома.

Атомы Ti образуют тетраэдр вокруг тетраэдрического участка и октаэдр вокруг октаэдрического участка, представлены на рис. 2.1. Когда решетка не имеет идеального отношения $c/a = 1,633$ [48], то деформируются тетраэдры и октаэдры. В случае титана отношение c/a составляет 1,588 и поэтому немного меньше идеального. Отношение c/a действительно сильно влияет на свойства материала. В материалах с отношением c/a ниже идеального значения пирамидальное скольжение становится более важным [49].

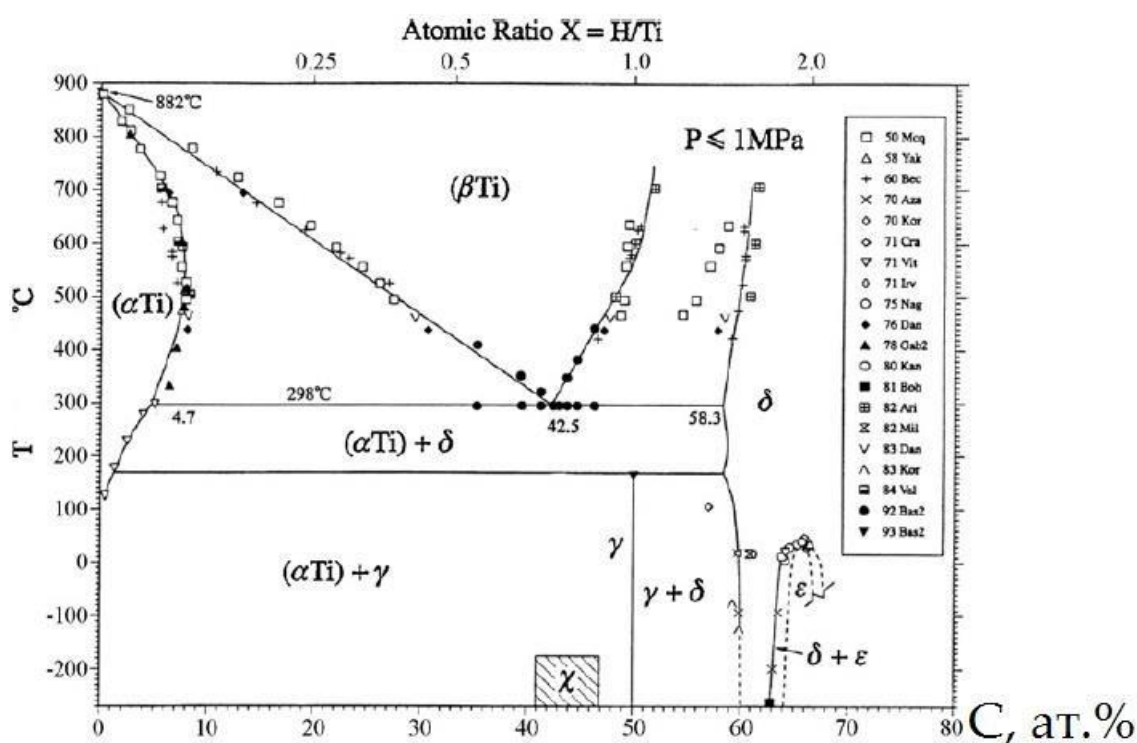


Рисунок 2.1 – Диаграмма система Ti –H [47]

2.2 Диффузия водорода в титановых сплавах

Поглощаясь титановыми сплавами, водород вызывает существенные изменения их физико-химических и механических свойств. При этом воздействие водорода на металлы зачастую приводит к тяжелым последствиям, возникают такие явления как водородная хрупкость и замедленное разрушение [46,50]. Когда содержание водорода в сплавах на

основе титана превышает предел растворимости, образуются хрупкие продукты – гидриды. В двухфазных $\alpha+\beta$ титановых сплавах основным механизмом водородного охрупчивания является осаждение и разложение хрупких гидридных фаз. При низких температурах гидрид титана становится хрупким, и может произойти серьезное ухудшение механических свойств титановых сплавов [51].

В титане основным видом водородной хрупкости является гидридная хрупкость [49,50]. При наводороживании титановых сплавов образуются выделения гидрида в виде пластинок, число гидридов увеличивается с увеличением содержания водорода. Выделения гидридов могут быть и в виде компактных выделений той или иной формы внутри зерна, по границам зерен. Характер выделения гидридов зависит от многих факторов: содержания водорода, величины зерна, температуры наводороживания, предшествующей термической обработки титана, напряженного состояния металла в момент выделения гидридов, примесей и т. п. С увеличением общего содержания гидридов в титане увеличивается их тенденция к выделению в виде компактных выделений по границам зерен.

Под воздействием внешней водородной среды, из-за неоднократного образования и разрыва хрупких гидридных фаз на границе газа, микроструктура α -фазового титанового сплава деградирует при комнатной температуре [52]. Когда присутствует только α -фаза, деградация нечувствительна к внешнему давлению водорода, поскольку образование гидрида в α -фазе может происходить практически при любом разумном парциальном давлении водорода. В α - β сплавах, когда присутствует значительное количество β -фазы, водород может быть предпочтительно транспортирован внутри β -решетки и будет реагировать с α -фазой вдоль границ $\alpha - \beta$. В этих условиях ухудшение будет более серьезной, в зависимости переноса водорода в β -фазе [53].

Авторами [55] было установлено, что микроструктура сплава играет очень важную роль в его поведении под воздействием водородсодержащего

окружающей среды. В Ti-6Al-4V основной механизм водородного растрескивания является формирование и разрушение хрупкой фазы гидроксида титана.

Испытание негидрированных, гидрированных, дегидрированных сплавов Ti-6Al-4V на прочность при изломе проведено при комнатной температуре. Распределение давления и напряжения, близкого к образованию трещин образца при растяжении, вычислено методом конечных элементов. Результаты исследования показывают, что важное влияние на прочность сплава Ti-6Al-4V имеет водород. Место начального трещинообразования в каждом образце разное, зависимо от интенсивности воздействия разной нагрузки на образцы. Механизм образования трещин в ненаводороженном образце происходит за счет создания и объединения вакансий. В наводороженном образце проявляются межкристаллитные и транскристаллитные трещины. Дегидрированный образец характеризуется смесью межкристаллитных и транскристаллитных трещин. Перемещение трещин объясняется наличием гидридов и атомами водорода в твердом теле.

В работе [56] подробно рассматриваются явления растрескивания титановых сплавов и формирование β -фазы вследствие внедрения атомов водорода. Переходы осуществляются к трем видам сплавов: $\alpha+\beta$ Ti-6Al-4V, метастабильному β -21S и тугоплавкому Ti-20Nb. Исходная микроструктура сплава играет очень важную роль в его поведении при воздействии водородосодержащей среды. В сплаве Ti-6Al-4V основным механизмом растрескивания является формирование и разрыв хрупких фаз гидроксида титана. Жесткость водородного разложения в сплаве Ti-6Al-4V зависит от количества и распределения β -фазы в микроструктуре вследствие более быстрой диффузии водорода в ОЦК β -фазе. С другой стороны, сплав Timetal Beta-21S β , подвергнутый электрохимической обработке в кислой среде при комнатной температуре, обладает сопротивляемостью к водороду. В сплаве Ti-20 wt.%Nb под действием водорода фазовые переходы и образование

гидридов сопровождались явлениями размягчения, независимо от процесса разряда.

Глава 3. Материалы и методы исследования

3.1 Материал для исследований

В качестве материала для исследований в данной работе использовался титановый сплав Ti-6Al-4V. Образцы изготавливаются методом электронно-лучевого сплавления, в котором ток электронного пучка установлен на 15 мА. Затем образец был отожжен при 780 °С до концентрации 0,3 масс.%. Образцы были приготовлены в виде прямоугольных пластин, размерами 20x20x1 мм. Образец подвергается механическому шлифованию, чтобы удалить поверхностный слой, так как поверхностный слой влияет на процесс инфильтрации. После завершения шлифования образцы тщательно промывались в спирте для очистки поверхности.

3.2 Метод наводороживания титановых сплавов из газовой среды

Насыщение водородом образцов проводили из газовой среды на комплексе Gas Reaction Controller. Автоматизированный комплекс предназначен для исследования сорбции водорода материалами методом Сиверта, в котором насыщение водорода образцами происходит из газовой атмосферы. Комплекс состоит из высокотемпературной печи или криостата, камеры с низким и высоким давлением и контроллер. Контроллер состоит из электронной контрольной системы управления и вакуумная система. Вакуумная часть состоит из контрольного система, резервуара давления, резервуара высокого давления, клапанов с пневматическим управлением и ручных клапанов, игольчатых клапанов, манометров, регулирующих клапанов и фильтров. Система аварийного удаления водорода, через которую водород удаляется при превышении максимально допустимого давления, была установлена для обеспечения безопасности между резервуарами (низкое и высокое давление). Вакуумный узел, состоящий из переднего вакуумного мембранного насоса и турбомолекулярного насоса, используется

для создания. Водород подают в вакуумную систему из цилиндра или генератора. Система охлаждения устанавливается между печью и контроллером для предотвращения повреждения соединительных проводов от нагрева. Управляется комплекс с помощью программного обеспечения на базе LabVIEW [57].

Насыщение водородом образцов проводилось при следующих параметрах: Насыщение осуществлялось при температуре 600 °С при давлении водорода 2 атм. После внедрения газа в твердое тело реакция завершается и система вычисляет общее молярное количество газа в камере с образцом и в резервуаре. Количество поглощенного твердым телом газа определяется как разность начального и конечного количества газа в реакционной камере.

3.3 Метод одноосного растяжения

В инженерном анализе необходимо установить зависимость напряжения от деформации для проверки характеристик нагрузки технического компонента. Из испытаний на растяжение, проведенных для оценки материалов, получены различные механические свойства, такие как предел текучести, модуль Юнга, коэффициент Пуассона и т. Д.[58]. Одноосное испытание на растяжение является основным методом оценки материала и получения параметров. Испытание на одноосное растяжение также является основным методом испытаний, используемым для контроля качества и сертификации практически всех видов металлических материалов. Стандарты испытаний на растяжение является одними из первых опубликованных, и до сих пор разработка таких стандартов продолжается через организации ASTM и ISO[58].

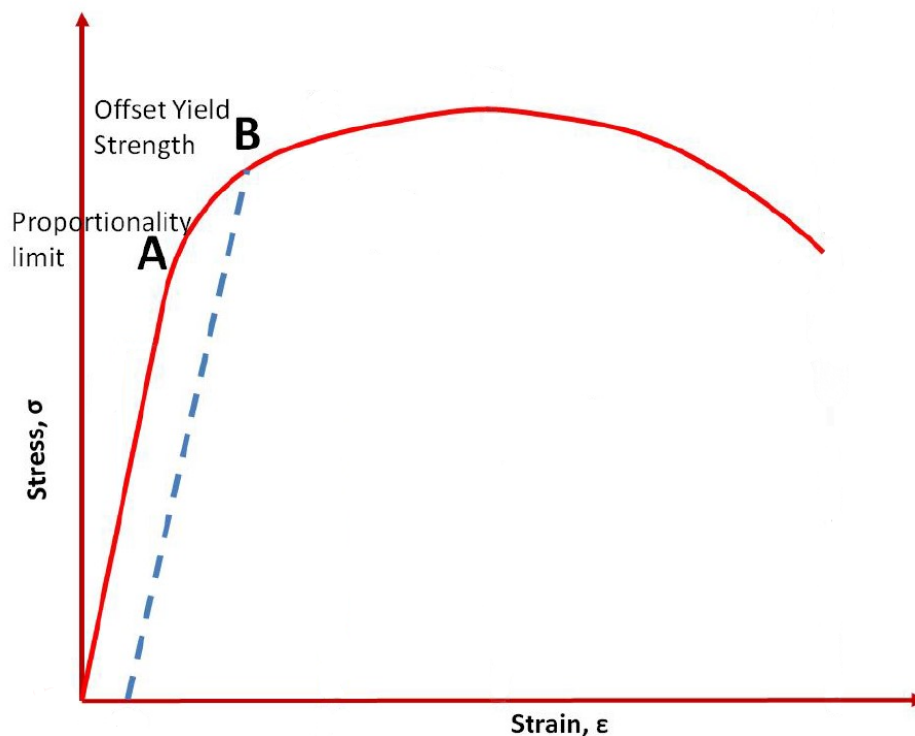


Рисунок 3.1 – Кривая одноосного напряжения-деформации[59]

На рисунке 3.1 показаны результаты одноосных напряженно-деформированных испытаний металлического образца. Ось X отображает деформацией, а ось Y - напряжение. Напряжение (σ) рассчитывается по следующей формуле[58];

$$\sigma = \text{нагрузка} / \text{площадь образца материала} \quad (3.1)$$

Деформация (ϵ) рассчитывается по следующей формуле[58];

$$\epsilon = \delta l / l_0 \quad (3.2)$$

где δl - изменение длины, l_0 - начальная длина.

Наклон начальной линейной части кривой (E) является модулем Юнга и определяется как[58];

$$E = (\sigma_2 - \sigma_1) / (\epsilon_2 - \epsilon_1) \quad (3.3)$$

Точка A на рисунке 3.1 показывает предел текучести материала, после которого в материале образца начинают происходить необратимые изменения. Если точка не четко видна или неразборчива, Предел текучести может быть выражен напряжением при пластической деформации 0,2%. Область между точками A и B на графике также является упругой, деформация металла

полностью восстановится после снятия нагрузки, но изменение не является линейным.

На рисунке 3.1 показана кривая напряжения-деформации, где значения напряжения не дают истинной напряжения в образце, поскольку площадь поперечного сечения образца считается постоянной. Значения напряжения-деформации могут быть преобразованы в истинные напряжения-деформации с помощью следующего соотношения[58];

$$\sigma_t = \sigma_e (1 + \varepsilon_e) = \sigma_e \lambda, \quad (3.4)$$

$$\varepsilon_t = \ln (1 + \varepsilon_e) = \ln \lambda, \quad (3.5)$$

где λ = начальная длина / конечная длина.

3.4 Исследование микроструктуры и фазового состава образцов

Структура поверхности образцов изучалось использованием инвертированных металлографических микроскопов ЛОМО МЕТАМ ЛВ-41. Инвертированные металлографические микроскопы Метам ЛВ-41 предназначены для исследования микроструктуры металлов. Микроскоп может представлять изображения в отраженном свете в светлом поле или в поляризованном свете в темном поле зрения. Кроме того, микроскоп также может наблюдать изображения по методу дифференциально-интерференционного контраста(ДИК).

Структурно-фазовое состояние образцов изучалось использованием системы с электронным и сфокусированными пучками Quanta 200 3D. Электронный микроскоп использует сфокусированный электронный пучок для взаимодействия с атомами в образце. Одним из явлений, происходящих в этом взаимодействии, является генерирование характерных рентгеновских лучей. Когда элемент подвергается бомбардировке пучком частиц, в данном случае электронным пучком, образец выделяет часть поглощенной энергии в виде рентгеновских лучей. Большую часть времени энергия является результатом изменения скорости электрона, который является случайным;

Однако, когда это взаимодействие удаляет электрон из атома образца, часто появляется вакансия во внутренней электронной оболочке. Чтобы вернуть атом в его нормальное состояние, электрон из внешней атомной оболочки «падает» в вакансию во внутренней оболочке. Это падение приводит к потере определенного количества энергии, а именно к разнице в энергии между вакантной оболочкой и оболочкой, вносящей электрон. Эта энергия отдана в виде рентгеновского излучения электромагнитного излучения. Так как энергетические уровни во всех элементах различны, они специфичны к элементам или характеристикам, генерируются рентгеновские лучи.

Дисперсионный рентгеновский микроанализ с энергопотреблением использует детекторное оборудование для измерения значений энергии характеристического рентгеновского излучения, генерируемого в электронном микроскопе. Используя полупроводниковый материал (обычно монокристалл Si / Li) для детектирования рентгеновских лучей и многоканального анализатора, система рентгеновского микроанализа преобразует энергию рентгеновского излучения в электронный счетчик. Накопление этих подсчетов энергии создает спектр, представляющий химический анализ образца. Поэтому, в то время как электронный микроскоп создает изображение топографии образца, энергодисперсионный рентгеновский микроанализ сообщает микроскописту, какие элементы присутствуют в образце [60].

Структурно-фазовое состояние образцов исследовалось методом рентгеноструктурного анализа. В работе использовался дифрактометр XRD-6000 Shimadzu, съемка проводилась на углах от 30° до 80° со скоростью 10.0°/мин. Фазовый состав, размер области когерентного рассеяния и внутреннее упругое напряжение были проанализированы с использованием баз данных PCPDFWIN и PDF4 + и программы полного профиля POWERDERCELL 2.4.

Заключение

Исследователи полностью поняли традиционный процесс производства титанового сплава Ti-6Al-4V, и характеристики полученных продуктов были полностью охарактеризованы. В настоящее время нет достаточных исследований и описания материалов, полученных с помощью технологий аддитивного производства, поэтому нет квалифицированных поставщиков. Отсутствие зрелости в процедурах проектирования, квалификации и закупок является основным препятствием для внедрения аддитивного производства. Различные исследователи изучали механические свойства титановых сплавов, полученных при аддитивном производстве, такие как усталостные свойства, свойства при растяжении, шероховатость и так далее. Однако исследования процесса отжига для титановых сплавов недостаточно.

В данной работе изучена микроструктура отожженного сплава Ti-6Al-4V, полученных методом ЭЛС. Отжиг приводит к увеличению толщины α -пластин. Структура образцов после отжига состоит из пластин с шириной преимущественно 0,8-1,2 мкм. Термообработка уменьшает объемную долю β -фазы, последующее старение разлагает нестабильный β , получены более мелкие ($\alpha + \beta$) фазы, что приводит к уменьшению микронапряжений. Отжиг при температуре 780°C приводит к уменьшению микротвердости поверхности титанового сплава на ~ 7%. Твердость наводороженных исходных образцов ниже на ~ 35 % твердости ненасыщенных образцов. А твердость наводороженных образцов после отжига при 780°C ниже на ~ 25 % твердости ненасыщенных образцов. Отжиг при температуре 780°C приводит к уменьшению предела прочности титанового сплава на ~ 9% и деформации увеличилась на ~ 0,34%. Исследование взаимодействия образцов с водородом изучали при наводороживании из газовой среды. Отжиг образцов привел к снижению скорости сорбции водорода до $2.5 \cdot 10^{-3} \text{ см}^3 [\text{H}_2] / (\text{с} \cdot \text{см}^2)$

). На кинетику поглощения титановыми сплавами водорода существенно влияет величина зерна и форма микрозерен, доля и распределение бета фазы.

Глава 5. Финансовый менеджмент, ресурс эффективность и ресурсосбережение

Основной задачей данного раздела является оценка перспективности разработки и планирование финансовой и коммерческой ценности конечного продукта, предлагаемого в рамках НИ. При этом разработчики должны представить настоящее состояние и перспективы проводимых ими научных исследований.

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

Детальный анализ конструктивного исполнения необходим. Данный анализ производится с применением оценочной карты, приведенной в таблице 5.1. 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.

Вар. 1 – метод, использовавшийся в данной работе электронно-лучевое сплавление

Вар. 2 – изготовление деталей методом селективного лазерного спекания

Вар. 3 – изготовление деталей методом прокатки

Таблица 5.1 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		Вар. 1	Вар. 2	Вар. 3	Вар. 1	Вар. 2	Вар. 3
1	2	3	4	5	6	7	8
Технические критерии оценки ресурсоэффективности							
Классы материалов для использования	0,2	5	3	5	1	0,6	0,6
Удобство в эксплуатации	0,1	5	5	3	0,5	0,5	0,3
Качество изделий	0,25	5	4	3	1,25	1	0,75
Простота в эксплуатации	0,1	4	4	2	0,4	0,4	0,2
Эффективность работы	0,25	3	5	4	0,75	1,25	0,75
Экономические критерии оценки эффективности							
Цена изготавливаемой продукции	0,1	3	4	3	0,3	0,4	0,3
Итого	1	25	25	20	4,2	4,15	2,9

Расчет конкурентоспособности, на примере стабильности срабатывания, определяется по формуле:

$$K = \sum B_i \cdot B_i = 0,1 \cdot 3 = 0,3 \quad (5.1)$$

где K – конкурентоспособность проекта; B_i – вес показателя (в долях единицы); B_i – балл показателя.

Как видно из приведенных расчетов, наиболее конкурентоспособен метод, использовавшийся в данной работе электронно-лучевое сплавление.

5.2 SWOT-анализ

SWOT анализ применяют для исследования внешней и внутренней среды проекта. Итогом данного анализа является матрица SWOT, в которой приведены все составляющие данного проекта.

Таблица 5.2 – SWOT-анализ

	Сильные стороны научно-исследовательского проекта: С1. Процесс работы на установке автоматизирован С2.Высокоточная производство С3. Легкий интерфейс управления. С4.Безопасность проведения исследований.	Слабые стороны научно исследовательского проекта: Сл1. Низкая эффективность работы Сл2. Изготовление деталей исключительно в вакууме Сл3. Низкий уровень проникновения на рынок. Сл4. Большие затраты на приобретение расходного материала
Возможности: В1. Возможность использовать расходный материал в виде проволоки и порошка В2. Технология может применяться в любом масштабов производства. В3. Появление дополнительного спроса на новый продукт.	Прибыль проекта, хорошая точность обработки и безопасность помогли создать спрос на продукт.	Медленная эффективность работы увеличивает стоимость конкурентного развития.
Угрозы: У1. Несвоевременное финансирование научного исследования при дальнейшем	По сравнению с другими технологиями, широкий спектр приложений приведет к изменению	Низкая степень проникновения на рынок помогает обеспечить своевременное

<p>развитии проекта. У2. Недостаток квалифицированных специалистов У3. Неумышленное совершение НСД. У4. Несвоевременное финансирование научного исследования при дальнейшем развитии проекта У5. Периодическая неисправность электронной пушки</p>	<p>спецификаций и стандартов для поставки экспериментальных образцов металла.</p>	<p>финансирование научных исследований в дальнейшей разработке проекта.</p>
--	---	---

5.3 Планирование научно-исследовательских работ

Для достижения конкретных целей при проведении научных исследований в окончательной работе необходимо создать рабочую группу. Для каждого запланированного вида работы будет создано отдельное задание для каждого работника.

Таблица 5.3 – Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№ работы	Основные этапы	№ работы
Разработка задания на НИР	1	Составление и утверждение задания НИР	Научный руководитель
Выбор направления исследования	2	Подбор и изучение материалов по теме	Научный руководитель , Инженер
	3	Выбор направления исследований	Научный руководитель , Инженер
	4	Календарное планирование работ по теме	Научный руководитель , Инженер
Теоретические и экспериментальные исследования	5	Поиск литературы	Инженер
	6	Метод выбора	Инженер
	7	Проектирование	Научный

		экспериментальных процессов	руководитель , Инженер
Обобщение и оценка результатов	8	Анализ результатов данных	Инженер
	9	Определить достоверность результатов	Инженер
Оформление отчета по НИР	10	Составление пояснительной записки	Инженер

5.4 Определение трудоемкости выполнения работ

Основная часть стоимости разработки проекта составляется из трудовых затрат, поэтому важно определить трудоемкость работ всех участников разработки проекта.

Несмотря на то, что трудоемкость зависит от трудно учитываемых параметров, т.е. носит вероятностный характер, ее можно определить экспертным путем, в «человеко-днях». Ожидаемое (среднее) значение трудоемкости $t_{ожі}$ определяется по формуле:

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

де $t_{\min i}$ – минимально возможное время выполнения поставленной задачи исполнителем;

$t_{\max i}$ – максимально возможное время выполнения поставленной задачи исполнителем.

На основании расчетов ожидаемой трудоемкости работ, необходимо определить продолжительность каждой работы в рабочих днях T_p :

$$T_{pi} = \frac{t_{ожі}}{C_i} \quad (5.3)$$

Где C_i – количество исполнителей, одновременно выполняющих поставленную задачу, чел.

По всем работам результаты расчета продолжительности в рабочих днях представлены в таблице 5.4.

5.5 Разработка графика проведения исследования

Диаграмма Ганта является наиболее удобным и наглядным способом представления графика проведения работ. Чтобы установить расписание, для каждого исполнителя расчеты производятся индивидуально:

$$T_{ki,рук} = T_{pi} \cdot k_{кал} \quad (5.4)$$

Где $k_{кал}$ – календарный коэффициент.

Календарный коэффициент определяется по формуле:

$$k_{кал,рук} = \frac{T_{кал}}{T_{кал} - T_{вых} - T_{пр}} \quad (5.5)$$

Где $T_{кал}$ – общее количество календарных дней в году;

$T_{вых}$ – общее количество выходных дней в году;

$T_{пр}$ – общее количество праздничных дней в году.

Таблица 5.4 – Временные показатели проведения научного исследования

№ раб.	Трудоёмкость работ						Длительность работ в рабочих днях T_{pi}	Длительность работ в календарных днях T_{ki}		
	t_{min} , чел-дни		t_{max} , чел-дни		$t_{ожи}$, чел-дни					
	Руководитель	Инженер	Руководитель	Инженер	Руководитель	Инженер				
1	3	-	7	-	4,6	-	4,6	-	5,6	-
2	6	10	8	11	6,8	10,4	3,4	5,2	4,1	6,3
3	2	3	4	4	2,8	3,4	1,4	1,7	1,7	2,1
4	2	1	6	3	3,6	1,8	1,8	0,9	2,2	1,1
5	-	9	-	14	-	11	-	11	-	13,4
6	-	6	-	10	-	7,6	-	7,6	-	9,3
7	4	4	5	6	4,4	4,8	2,2	2,4	2,7	2,9

8	-	5	-	10	-	7	-	7	-	8,5
9	-	5	-	9	-	6,6	-	6,6	-	8,1
10	-	6	-	12	-	8,4	-	8,4	-	10,2

После расчета и сведения в таблицу временных показателей проектирования, на основе полученной таблицы строится диаграмма Ганта.

Таблица 5.5 – Календарный план проведения

Этап	Вид работы	Исполнители	t _к	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь
1	Составление и утверждение задания НИР	Научный руководитель	8	■				
2	Подбор и изучение материалов 14 в по теме	Научный руководитель Инженер	13		■			
3	Выбор направления исследований	Научный руководитель Инженер	8		■			
4	Календарное планирование работ по теме	Научный руководитель Инженер	8		■			
5	Поиск литературы	Инженер	10		■			
6	Метод выбора	Инженер	12		■			
7	Проектирование экспериментальных процессов	Научный руководитель Инженер	15			■		
8	Анализ результатов в данных	Инженер	12			■		
9	Определить достоверность результатов	Инженер	8				■	

10	Составление пояснительной записки	Инженер	13						
----	-----------------------------------	---------	----	--	--	--	--	--	--

5.6 Бюджет научного исследования

При планировании бюджета научного исследования должно быть обеспечено полное и достоверное отражение всех видов планируемых затрат (расходов), необходимых для его выполнения:

- материальные затраты ;
- затраты на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ;
- основная заработная плата исполнителей темы;
- дополнительная заработная плата исполнителей темы;
- отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления);
- накладные расходы.

В процессе формирования бюджета, планируемые затраты группируются по статьям, представленным в таблице.

5.7 Сырье, материалы, покупные изделия и полуфабрикаты

Расчет стоимости материалов включает в себя стоимость всех материалов, использованных в процессе разработки проекта:

- Сырье, закупаемое извне;
- Закупка материалов, используемых для производства продукции;
- Купленные детали и полуфабрикаты;
- Обслуживание и ремонт исследовательских помещений

Таблица 5.6 – Материальные затраты

Наименование	Единица измерения	Количество	Цена за ед., руб.	Затраты на материалы, (Зм), руб.
Проволока	Кг	1	6000	6000
Порошок	Кг	2	5000	10000
Канцелярские товары	шт.			2000
Итого				18000

5.8 Специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ

5.8.1 Расчет амортизации специального оборудования

В эту статью включены все связанные с этим затраты на покупку и использование конкретного оборудования, которое используется для выполнения конкретных задач.

В данной работе использовалось уже имеющееся оборудование, и закупка специального оборудования не производилась. В таком случае затраты на специальное оборудование отсутствуют.

Таблица 5.7 - Амортизационные расходы

№	Наименование оборудования	Стоимость, руб.	Срок полезного использования, лет	Норма амортизации, %	Срок эксплуатации, дней	Общая стоимость оборудования, руб.
1	ЭЛУ 5	4500000	10	10	30	53784
2	Дифрактометр Shimadzu XRD-7000	740000	8	15	15	6191
3	Оптический микроскоп ZEISS AXIOVERT 25	500000	10	10	10	1992
Итого:						61967 руб.

5.8.2 Основная заработная плата исполнителей темы

Для расчета базовой заработной платы необходимо учитывать научный и инженерный персонал, персонал магазина и производственные мощности, участвующие в окончательной работе. Чтобы рассчитать базовую зарплату, необходимо создать баланс рабочего времени.

Основная заработная плата руководителя от предприятия рассчитывается по следующей формуле:

$$Z_{осн} = Z_{дн} \cdot T_p \quad (5.6)$$

где $Z_{дн}$ – среднедневная заработная плата, руб.;

T_p – продолжительность работ, выполняемых работником, раб.дн.

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{дн} = \frac{Z_m \cdot M}{F_d} \quad (5.7)$$

где Z_m – должностной оклад работника за месяц;

F_d – действительный годовой фонд рабочего времени исполнителей, раб.дн.;

Должностной оклад работника за месяц:

$$Z_m = Z_{тс} \cdot (1 + k_{пр} + k_d) k_p \quad (5.8)$$

где $Z_{тс}$ – заработная плата по тарифной ставке, руб.; $k_{пр}$ – премиальный коэффициент, равный 0,3; k_d – коэффициент доплат и надбавок составляет примерно 0,2 – 0,5; k_p – районный коэффициент, равный 1,3 (для Томска).

Таблица 5.8 – Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель	Инженер
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней	62	62
- выходные дни		
- праздничные дни		
Потери рабочего времени	38	38
- отпуск		
- невыходы по болезни		
Действительный годовой фонд рабочего времени	265	265

Таблица 5.9 – Расчет основной заработной платы.

Исполнители НИ	$Z_{мс}, руб$	$k_{пр}$	$k_{д}$	$k_{р}$	$Z_{м}, руб$	$Z_{дн}, руб$	$T_{р}, раб.дн.$	$Z_{осн}, руб$
Руководитель	38200	0,3	0,2	1,3	74490	3373	20	67460
Инженер	9850	0,3	0,2	1,3	19207	870	55	47838
Итого:								115298

5.8.3 Дополнительная заработная плата

Дополнительная заработная плата определяется по формуле:

$$Z_{доп} = k_{доп} \cdot Z_{осн}, \quad (5.9)$$

где $k_{доп}$ – коэффициент дополнительной заработной платы, равный 0,14.

Таблица 5.10 – Расчёт дополнительной заработной платы

Исполнители	$Z_{осн}, руб.$	$Z_{доп}, руб.$
Научный руководитель	67460	10119
Инженер	47838	7176
Итого	115298	17295

5.8.4 Отчисления во внебюджетные фонды

Дополнительная заработная плата определяется по формуле:

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

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

Таблица 5.11 – Отчисления во внебюджетные фонды

Исполнители	$Z_{осн}, руб.$	$Z_{доп}, руб.$	$Z_{внеб}, руб.$
Научный руководитель	67460	10119	23274
Инженер	47838	7176	16504

5.8.5 Накладные расходы

Количество накладных расходов определяется следующей формулой:

$$Z_{\text{накл}} = (\Sigma \text{статей}) \cdot k_{\text{нр}} = 17024 \text{ руб} \quad (5.11)$$

где $k_{\text{нр}}$ - факторы, учитывающие затраты на управление.

Стоимость накладных расходов может быть принята за 16%.

5.8.6 Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта

Формирование бюджета научно-исследовательского проекта приведены в таблице 5.12.

Таблица 5.12 – Расчет бюджета затрат НИИ

Наименование статьи	Сумма, руб.	
	Руководитель	Студент
Материальные затраты НИИ	68000	
Затраты на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ	61967	
Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	67460	47838
Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы	10119	7176
Отчисления во внебюджетные фонды	23274	16504
Накладные расходы	17024	
Итого	319362	

5.8.7 Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, социальной и экономической эффективности исследования.

Эффективность является расчет общих показателей, основанных на достоверности научных исследований. Это связано с определением двух

средневзвешенных значений: финансовой эффективности и эффективности использования ресурсов.

Общий финансовый показатель определяется как:

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп.}i} = \frac{\Phi_{\text{pi}}}{\Phi_{\text{max}}}, \quad (5.12)$$

где $I_{\text{финр}}^{\text{исп.}i}$ – комплексный финансовый показатель развития;

Φ_{pi} – стоимость i -й версии;

Φ_{max} – максимальная стоимость выполнения исследовательского проекта.

Общий индикатор ресурсной эффективности варианта реализации объекта исследования можно определить следующим образом:

$$I_{\text{pi}} = \sum a^i \cdot b^i, \quad (5.13)$$

где I_{pi} – интегральный показатель эффективности использования ресурсов i -й версии;

a^i – весовой коэффициент i -й версии разработки;

n – количество параметров сравнения. Общий индекс эффективности ресурсов вычисляется в табличной форме.

Таблица 5.13 – Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта.

Критерии	Весовой коэффициент параметра	Исп.1	Исп.2
Надежность	0.2	4	5
Объем работ	0.3	5	5
Потребление	0.1	5	5
Многосторонность	0.2	4	4
Эффективность работы	0.2	5	3
ИТОГО	1	4.6	4.4

Комплексный показатель ($I_{\text{исп}i}$) эффективности планов развития определяется по следующей формуле, основанной на общих показателях эффективности ресурсов и общих финансовых показателях:

$$I_{\text{исп}i} = \frac{I_{p-\text{исп}i}}{I_{\text{финр}}}, \quad (5.14)$$

$$I_{\text{исп}1}=4.6/1=4.6; I_{\text{исп}2}=4.4/0.996=4.42;$$

Сравнение общих показателей эффективности плана развития поможет определить относительную эффективность проекта и выбрать наиболее подходящий вариант из предлагаемого плана. Сравнительная эффективность проекта (Esr):

$$Э_{\text{ср}} = \frac{I_{\text{исп}i}}{I_{\text{исп} \text{max}}}, \quad (5.15)$$

Таблица 5.14 – Сравнительная эффективность разработки

№ п/п	Показатели	Исп.1	Исп.2
1	Интегральный финансовый показатель разработки	1	0.882
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	4.6	4.4
3	Интегральный показатель эффективности	4.6	4.42
4	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	1	0.961

Вывод

Бюджет исследований был рассчитан при планировании исследовательской работы. Материальных затрат (68000 руб), базовых окладов (115298 руб), дополнительных расходов на заработную плату (17295 руб), расходов на специальное оборудование (61967 руб) и косвенных расходы (17024 руб). Общий бюджет составляет 319362 рублей. Эта оценка

стоимости бизнеса необходима для финансового состояния и перспектив текущих научных исследований.

Глава 6. Социальная ответственность

В работе используется контроллер газовой реакции для гидрирования образцов металла в лаборатории. На основе реализации необходимых функций трудового процесса рабочее место проектируется на горизонтальной и вертикальной плоскостях. При проектировании рабочего места при организации рабочего места следует учитывать освещение, температуру, влажность, давление, шум, опасные вещества, электромагнитные поля и другие требования к здоровью и гигиене. При разработке лабораторий необходимо проявлять осторожность, чтобы защитить окружающую среду, особенно в производстве отходов. Также необходимо рассмотреть возможность возникновения чрезвычайной ситуации.

6.1 Анализ вредных факторов на рабочем месте

В лаборатории, где существуют различные электроустановки, магнетрон, элементы из тяжелых металлов, могут быть следующие вредные факторы: наличие - а) метеоусловия ; б) шум производства; в) Электромагнитные поля; г) Освещенность.

6.1.1 Метеоусловия

Значительное влияние на состояние тела работника, его производительность имеет климат (метеорологические условия) в помещениях, что относится к условиям внутренней среды этих пространств, которые влияют на теплообмен с рабочей средой. В соответствии с СанПиНом 2.2.4.548-96 [64] показатели микроклимата: температура воздуха; относительная влажность; скорость его движения.

Для полноценной работы сотрудников необходимо соблюдение нормальных физиологических процессов в организме человека. Это

возможно при соблюдении условия, если тепло выделяемое в помещении выделялось в окружающую среду. При соблюдении этого условия у сотрудника не возникает каких-либо ощущений термического дискомфорта - холода или перегрева.

Нормальный ход физиологических процессов и, следовательно, хорошее здоровье возможны только тогда, когда тепло, генерируемое человеческим организмом, играет в окружающей среде. Когда температура воздуха находится в диапазоне 15-25 ° С, тепловыделение тела почти не меняется (зона безразличия). При более низкой температуре воздуха увеличивается тепловыделение, главным образом из-за мышечной активности (тряски) и увеличения обмена веществ. С увеличением температуры воздуха усиливается процесс теплообмена. Количество тепла, выделяемого в организме человека, во многом зависит от физической активности и уровня тепла - от микроклиматических условий, главным образом от температуры воздуха.

Для создания оптимальных параметров микроклимата в производственных помещениях используются системы кондиционирования, а обеспечение допустимых параметров – обычными системами вентиляции и отопления. В лаборатории осуществляется естественная и искусственная вентиляция. Воздух поступает и удаляется через щели, окна, двери, а также через специальную систему контроля микроклимата. При такой системе вентиляции приточный воздух, поступающий в помещение через систему контроля микроклимата, проходит предварительную очистку и нагревание.

Таблице 6.1 – Оптимальные величины показателей микроклимата на рабочих местах производственных помещений

Период года	Категория работ по уровню энергозатрат, Вт	Температура воздуха, °С	Температура поверхностей, °С	Относительная влажность воздуха, %	Скорость движения воздуха, м/с
Холодный	Ia (до 139)	22-24	21-25	60-40	0,1

Теплый	Ia (до 139)	23-25	22-26	60-40	0,1
--------	-------------	-------	-------	-------	-----

6.1.2 Шум производства

Воздействие шума на работе может нанести вред здоровью работников. Наиболее известным эффектом шума на работе является потеря слуха, он также может усугубить стресс и увеличить риск несчастных случаев.

Нарушение слуха может быть связано с механическим блокированием при передаче звука во внутреннее ухо или повреждением волосковых клеток в улитке, части внутреннего уха. Редко, нарушение слуха также может быть вызвано нарушениями центральной слуховой обработки.

Потеря слуха, вызванная шумом, является наиболее распространенным профессиональным заболеванием в Европе, на которое приходится около одной трети всех связанных с работой заболеваний, опережая проблемы с кожей и респираторными заболеваниями. НИХЛ обычно вызван длительным воздействием громкого шума. Первым симптомом, как правило, является невозможность услышать высокие звуки. Если проблема чрезмерного шума не будет устранена, слух человека будет еще более ухудшаться, включая трудности с обнаружением более низких звуков. Обычно это происходит в обоих ушах. Ущерб, вызванный шумом, является постоянным. Потери слуха могут возникать без долгосрочных воздействий. Кратковременное воздействие импульсных шумов (даже одного сильного импульса), таких как выстрелы или гвоздь или заклепочные пушки, может иметь постоянные последствия, включая потерю слуха и непрерывный шум в ушах. Импульсы могут также разделять мембрану барабанной перепонки. Это болезненно, но урон исцеляем.

Чтобы контролировать требования к уровням шума и обеспечить безопасное рабочее место в лаборатории, понимать различные источники шума в лаборатории очень важно.

а) Шум от оборудования - почти все оборудование, которое используется для непосредственного выполнения функций лаборатории,

производит шум. Лабораторное оборудование включает вытяжные шкафы, холодильники, газогенераторы водорода, компрессоры и масс-спектрометр. Временной уровень шума различных систем генерации шума также следует учитывать. Некоторые системы генерируют постоянный шум (например, вытяжной шкаф), другие работают на периодической основе (например, холодильник), а другие работают на частичной основе (например, контроллер газовой реакции), а общий мгновенный уровень шума представляет собой сумму все устройства на объекте.

б) Посторонний шум - В дополнение к шуму, генерируемому различными устройствами в лаборатории, дополнительный шум генерируется устройствами в лаборатории, которые не имеют прямого отношения к функции лаборатории. Шум от радио, музыки и телефонов присутствует во лабораториях.

с) Внешний шум - уровень шума в лаборатории может значительно зависеть от шума в окружающей среде. Здание, в котором размещается лаборатория, находится на главной дороге, и будет слышен шум от автомобильного движения. В то время как нормальный разговор составляет приблизительно 50 дБ, если в лаборатории есть шумные системы, общий уровень шума будет чрезмерным. Это может создать опасные ситуации или привести к неправильному пониманию информации.

Способы определяют, как уменьшить влияние шума на рабочем месте:

а) При определении способов производства или процессов следует учитывать необходимость управления шумом.

б) Административный контроль следует использовать, когда невозможно снизить уровень шума посредством технических мер контроля шума.

в) Снабжены личными защитниками слуха правильной оценки и подходят для условий работы.

Уровни шума на рабочих местах пользователей персональных компьютеров не должны превышать значений, установленных СанПиН

2.2.2/2.4.1340-03 [65] и СН 2.2.4/2.1.8.562-96 [66]. Рабочая зона соотносится с категорией «Высококвалифицированная работа, требующая сосредоточенности, административно-управленческая деятельность, измерительные и аналитические работы в лаборатории; рабочие места в помещениях цехового управленческого аппарата, в рабочих комнатах конторских помещений, в лабораториях». Предельно допустимые уровни звукового давления, уровни звука и эквивалентные уровни звука для этой категории приведены в таблице 6.1.

Таблица 6.1 – Предельно допустимые уровни звукового давления, уровни звука и эквивалентные уровни звука

Уровни звукового давления в октавных полосах со среднегеометрическими частотами [Гц]									Уровни звука в [дБ]
31.5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	60
93	79	70	68	58	55	52	52	49	

6.1.3 Электромагнитные поля

Основные опасности, как правило, связаны с длительным воздействием колебаний электрических и магнитных полей, которые могут влиять на ткань тела. Электрические поля заставляют клетки тела вибрировать и нагреваться на высоких частотах и в колебательных магнитных полях, генерируются электрические токи в ткани тела, Действует как проводник. В сочетании электрические изменения в клетках и тканях организма заставляют частицы пыли, а также молекулы заряженных газов привлекаться к этим частям.

Длительное высокое воздействие электромагнитных полей может повредить тело белых кровяных телец его тела, чтобы убить опухоли и бороться с болезнями, и это может также оказывать неблагоприятное воздействие на вашу центральную нервную систему, железы и Мозг, который связан не только с определенными видами рака, но также может вызывать другие проблемы как физически, так и психологически.

Необходимо оградить рабочих от воздействия ЭДС настолько, насколько это возможно. Это может достигнуто за счет использования более низкого напряжения и экранированного оборудования, ограничивающего расстояние между оборудованием и рабочим, эксплуатирующим его, и отключением тока и отсоединением любого оборудования, когда оно не используется.

6.1.4 Освещенность

Освещение может показаться простой частью рабочей среды, но если это не сделано правильно, это может привести к жалобам, таким как глазное раздражение, раздражение глаз, сухость глаз, помутнение зрения и головные боли. Кроме того, плохое освещение может создавать проблемы безопасности и снижать производительность, поскольку сотрудники могут становиться неудобными или оказаться не в состоянии идти в ногу с темпом своей работы, потому что они не могут видеть очень хорошо.

Хорошее освещение, с другой стороны, может сделать сотрудников более комфортными и повысить производительность. Пространство, которое хорошо освещено и не имеет слишком большого количества теней или слишком большого количества бликов, позволяет работникам сосредоточиться на задачах под рукой, не прибегая к косоглазиям, использовать неудобные позы или искать дополнительные источники света.

На рабочем месте требуются три основных типа освещения: общая, локализованная и локальная задача. Общее освещение, такое как потолочные светильники, освещает большие площади, в то время как локализованное общее освещение немного ближе к рабочим станциям. Эти потолочные светильники помогают освещать места, где будут выполняться задачи. Местное освещение или освещение задач становятся еще ближе к работникам. Например, настольные лампы и торшеры могут быть скорректированы сотрудниками, чтобы помочь им увидеть материалы, с

которыми они работают. При использовании вместе эти типы освещения могут уменьшить напряжение глаз для работников.

6.2 Экологическая безопасность.

При разработке лабораторий необходимо проявлять осторожность, чтобы защитить окружающую среду, особенно в производстве отходов.

Все отходы, подходящие для сбора отходов местного самоуправления, называются «контролируемыми отходами». Элементы этой категории, которые включают грязную бумагу, пластик, резину и древесину, обычно помещают в мусорные ведра, имеющиеся в каждой лаборатории, и собираются чистящими средствами. Тем не менее, каждая лаборатория также должна иметь контейнер для определенных предметов, которые не могут быть помещены в обычные мусорные контейнеры.

При работе на газоанализаторе возможно поражение химическими веществами, которые при попадании в атмосферу могут воздействовать на работников, а также заражать воздух, разные предметы и материалы. Для защиты от поражения химических веществ следует выполнять комплекс мероприятий, проводимых с целью предотвращения или ослабления воздействия на сотрудников химической обстановки, а также точное соблюдение правил технической эксплуатации.

При утечке газа из баллона возможно удушье, отравление, а также возгорание и взрыв, поэтому необходимо знать и неукоснительно соблюдать правила пользования газовыми приборами. Проверить целостность газового баллона и прочность его закрепления, наличие видимых повреждений. Вентиль газового баллона и резьба должны находиться в исправленном состоянии, редуктор должен соответствовать газу в баллоне.

6.3 Электробезопасность

Согласно требованиям электробезопасности ГОСТ 12.1.019-79 [67]. Всё электрооборудование и приборы должны находиться на специально отведенных местах, и заземлены. Сопротивление заземления должно быть не более 4 Ом.

В настоящее время большая доля внимания уделена электробезопасности, так как использование в повседневной жизни различного вида электроустановок неуклонно растет. Безопасной для человека является величина переменного тока – 10мА, постоянного – 50мА, безопасное напряжение 12В.

В используемом помещении применяются установки напряжением до 1 кВ. Заземление металлических нетоковедущих частей обеспечивается присоединением вилки прибора к специальной розетке с заземляющим контактом. Имеется устройство защитного отключения. Защита от прямого прикосновения не требуется, поскольку отсутствуют электроустановки, а электрооборудование находится в зоне системы уравнивания потенциалов, и наибольшее рабочее напряжение не превышает 25 В переменного или 60 В постоянного тока.

СИЗ от поражения электротоком:

- изолирующие и электроизмерительные клещи;
- переносные заземления;
- диэлектрические галоши, изолирующие боты и перчатки, каски защитные диэлектрические, изолирующие подставки, ковры.

6.4 Пожарная безопасность

Одним из наиболее распространенных и опасных видов техногенных ЧС является пожар. Пожаром называется неконтролируемое горение вне специального очага. Пожары причиняют значительный материальный ущерб, в ряде случаев вызывают тяжелые травмы и гибель людей.

Согласно НПБ 105-03 [68], используемая комната классифицируется как категория опасности В4, то есть в которой содержатся легковоспламеняющиеся и трудно воспламеняющиеся жидкости, вещества и материалы, но конкретная огневая нагрузка на участке находится в диапазоне 1-180 МДж / м².

В соответствии с НПБ 105-03 [68] и СНиП 21-01-97 [69] работникам разрешается работать только после того, как они были проинструктированы о мерах пожарной безопасности во всех комнатах размещенных таблиц с указанием номера телефона, противопожарной защиты и таблиц с указанием направления эвакуационный маршрут и план эвакуации.

Согласно ППБ 01-03 [70] в здании, где проводятся работы, предусмотрены технические решения, обеспечивающие эвакуацию людей (аварийные выходы), оборудование для тушения пожара в очаг пожара в случае пожара, имеется сигнализация и предупреждение срабатывает при пожаре.

Основными видами защиты различных объектов от пожаров, являются средства сигнализации и пожаротушения. В рассматриваемом здании предусмотрена электрическая пожарная сигнализация, позволяющая быстро и точно указать место возникновения пожара. Сигнализация обеспечивает автоматический ввод в действие предусмотренных на объекте средств пожаротушения и дымоудаления.

В здании существуют пожарные краны. В качестве первичных средств пожаротушения используются углекислотные огнетушители ОУ-5. Преимущества углекислотных огнетушителей: эффективность тушения жидких и газообразных веществ и электроустановок под напряжением до 1000 В; отсутствие следов тушения; диапазон рабочих температур от -40 °С до 50 °С.

6.5 Безопасность в чрезвычайных ситуациях

Если обнаружена неисправность Gas Reaction Controller, необходимо остановить работу, выйти из программы, выключить питание компьютера, выключить насос, отключить Gas Reaction Controller от основного источника питания и уведомить супервизора.

Если в цилиндре протекает утечка газа, подача газа должна быть немедленно остановлена, и аварийная ситуация должна быть сообщена непосредственному руководителю.

В случае пожара немедленно прекратите работу, закройте газовые баллоны, выключите электрооборудование, вызовите пожарный отдел на 01 или 010, уведомите об этом начальника и используйте основные методы пожаротушения для тушения пожара.

Во избежание риска возгорания и взрыва необходимо принять следующие меры:

- 1) Планирование защиты жизни и имущества на уровне предприятия от пожаров и взрыва;
- 2) Эвакуация работников;
- 3) Создайте инвентарь личного защитного снаряжения и сохраните его;
- 4) Проектирование, размещение, строительство и эксплуатация инфраструктуры, включая потенциально опасную инфраструктуру;

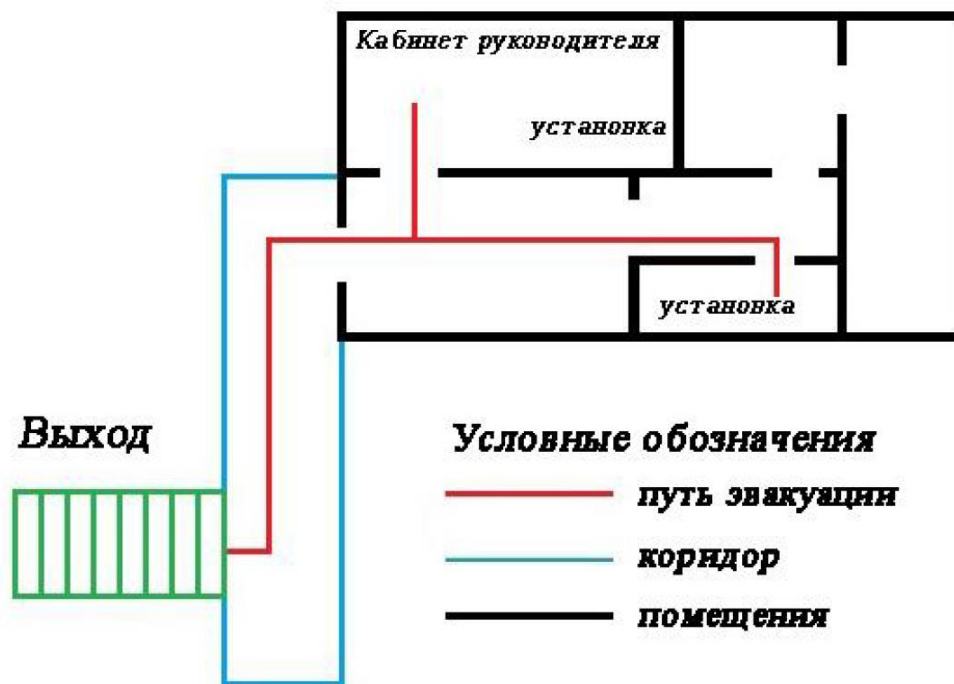


Рисунок 6.1 – План эвакуации из лаборатории

6.6 Правовые и организационные вопросы

СанПиН 2.4.2.576-96. Гигиенические требования к условиям обучения школьников в различных видах современных общеобразовательных учреждений.

СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03. Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы.

СН 2.2.4/2.1.8.562-96. Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки. Санитарные нормы.

ГОСТ 12.1.019-79. ССБТ. Электробезопасности. Общие требования и номенклатура видов защиты.

НПБ 105-03. Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности.

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

ППБ 01-03. Правила пожарной безопасности в Российской Федерации.

Вывод

Во время проверки безопасности путем внедрения контроллеров газовой реакции, вредных и опасных факторов были определены меры защиты на рабочем месте и рассмотрены чрезвычайные ситуации.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Terner M. et al. Electron beam melting of high niobium containing TiAl alloy: feasibility investigation //steel research international. – 2012. – Т. 83. – №. 10. – С. 943-949.
2. Biamino S. et al. Electron beam melting of Ti–48Al–2Cr–2Nb alloy: Microstructure and mechanical properties investigation //Intermetallics. – 2011. – Т. 19. – №. 6. – С. 776-781.
3. Zäh M. F., Lutzmann S. Modelling and simulation of electron beam melting //Production Engineering. – 2010. – Т. 4. – №. 1. – С. 15-23.
4. Murr L. E. et al. Microstructural architecture, microstructures, and mechanical properties for a nickel-base superalloy fabricated by electron beam melting //Metallurgical and Materials Transactions A. – 2011. – Т. 42. – №. 11. – С. 3491-3508.
5. Fager Franzén S., Karlsson J. Titanium Aluminide Manufactured by Electron Beam Melting. – 2010.
6. Mitchell A. Melting, casting and forging problems in titanium alloys //Materials Science and Engineering: A. – 1998. – Т. 243. – №. 1-2. – С. 257-262.
7. Murr L. E. et al. Characterization of titanium aluminide alloy components fabricated by additive manufacturing using electron beam melting //Acta materialia. – 2010. – Т. 58. – №. 5. – С. 1887-1894.
8. Clemens H., Kestler H. Processing and applications of intermetallic γ -TiAl- based alloys //Advanced Engineering Materials. – 2000. – Т. 2. – №. 9. – С. 551-570.
9. Antonysamy A. A., Meyer J., Prangnell P. B. Effect of build geometry on the β -grain structure and texture in additive manufacture of Ti6Al4V by selective electron beam melting //Materials characterization. – 2013. – Т. 84. – С. 153-168.

10. Körner C., Attar E., Heintl P. Mesoscopic simulation of selective beam melting processes //Journal of Materials Processing Technology. – 2011. – Т. 211. – №. 6. – С. 978-987.
11. Milberg J., Sigl M. Electron beam sintering of metal powder //Production Engineering. – 2008. – Т. 2. – №. 2. – С. 117-122.
12. Gong X., Anderson T., Chou K. Review on powder-based electron beam additive manufacturing technology //ASME/ISCIE 2012 international symposium on flexible automation. – American Society of Mechanical Engineers, 2012. – С. 507-515.
13. Mahale T. R. Electron beam melting of advanced materials and structures. – North Carolina State University, 2009.
14. Biamino S. et al. Electron beam melting of Ti–48Al–2Cr–2Nb alloy: Microstructure and mechanical properties investigation //Intermetallics. – 2011. – Т. 19. – №. 6. – С. 776-781.
15. Gaytan S. M. et al. Advanced metal powder based manufacturing of complex components by electron beam melting //Materials Technology. – 2009. – Т. 24. – №. 3. – С. 180-190.
16. Arcam A. B. Grade 2 Titanium //Retrieved Dec. – 2015. – Т. 7.
17. Электронный ресурс. Режим доступа: <http://www.arcam.com/wp-content/uploads/schematic-ЭЛС-setup.jpg>
18. Parsa A. B. et al. Transmission Electron Microscopy of a CMSX-4 Ni-Base Superalloy Produced by Selective Electron Beam Melting //Metals. – 2016. – Т. 6. – №. 11. – С. 258.
19. Heintl P. et al. Cellular titanium by selective electron beam melting //Advanced Engineering Materials. – 2007. – Т. 9. – №. 5. – С. 360-364.
20. Attar E. Simulation of selective electron beam melting processes. – 2011.
21. Cline H. E., Anthony T. R. Heat treating and melting material with a scanning laser or electron beam //Journal of Applied Physics. – 1977. – Т. 48. – №. 9. – С. 3895-3900.

22. Murr L. E. Metallurgy of additive manufacturing: Examples from electron beam melting //Additive Manufacturing. – 2015. – T. 5. – C. 40-53.
23. Facchini L. et al. Microstructure and mechanical properties of Ti-6Al-4V produced by electron beam melting of pre-alloyed powders //Rapid Prototyping Journal. – 2009. – T. 15. – №. 3. – C. 171-178.
24. Koike M. et al. Evaluation of titanium alloy fabricated using electron beam melting system for dental applications //Journal of Materials Processing Technology. – 2011. – T. 211. – №. 8. – C. 1400-1408.
25. Hrabe N., Quinn T. Effects of processing on microstructure and mechanical properties of a titanium alloy (Ti-6Al-4V) fabricated using electron beam melting, Part 2: Energy input, orientation, and location //Materials Science and Engineering: A. – 2013. – T. 573. – C. 271-277.
26. Hrabe N., Quinn T. Effects of processing on microstructure and mechanical properties of a titanium alloy (Ti-6Al-4V) fabricated using electron beam melting (EBM), part 1: Distance from build plate and part size //Materials Science and Engineering: A. – 2013. – T. 573. – C. 264-270.
27. Wysocki B. et al. Laser and electron beam additive manufacturing methods of fabricating titanium bone implants //Applied Sciences. – 2017. – T. 7. – №. 7. – C. 657.
28. Chastand V. et al. Comparative study of fatigue properties of Ti-6Al-4V specimens built by electron beam melting (EBM) and selective laser melting (SLM) //Materials Characterization. – 2018. – T. 143. – C. 76-81.
29. Zhai Y., Galarraga H., Lados D. A. Microstructure, static properties, and fatigue crack growth mechanisms in Ti-6Al-4V fabricated by additive manufacturing: LENS and EBM //Engineering failure analysis. – 2016. – T. 69. – C. 3-14.
30. Koike M. et al. Evaluation of titanium alloys fabricated using rapid prototyping technologies—electron beam melting and laser beam

- melting //Materials. – 2011. – T. 4. – №. 10. – C. 1776-1792.
31. Li X. et al. Fabrication and characterization of porous Ti6Al4V parts for biomedical applications using electron beam melting process //Materials Letters. – 2009. – T. 63. – №. 3-4. – C. 403-405.
 32. Golden P. J., John R., Porter III W. J. Investigation of variability in fatigue crack nucleation and propagation in alpha+ beta Ti-6Al-4V //Procedia Engineering. – 2010. – T. 2. – №. 1. – C. 1839-1847.
 33. 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. – T. 22. – №. 12. – C. 3872-3883.
 34. Beretta S., Romano S. A comparison of fatigue strength sensitivity to defects for materials manufactured by AM or traditional processes //International Journal of Fatigue. – 2017. – T. 94. – C. 178-191.
 35. Léopold G. et al. Influence of artificial and casting defects on fatigue strength of moulded components in Ti- 6Al- 4V alloy //Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures. – 2015. – T. 38. – №. 9. – C. 1026-1041.
 36. Tong J. et al. Mechanical properties of titanium-based Ti–6Al–4V alloys manufactured by powder bed additive manufacture //Materials Science and Technology. – 2017. – T. 33. – №. 2. – C. 138-148.
 37. Gu D. et al. Densification behavior, microstructure evolution, and wear performance of selective laser melting processed commercially pure titanium //Acta Materialia. – 2012. – T. 60. – №. 9. – C. 3849-3860.
 38. Murr L. E. et al. Microstructure and mechanical behavior of Ti–6Al–4V produced by rapid-layer manufacturing, for biomedical applications //Journal of the mechanical behavior of biomedical materials. – 2009. – T. 2. – №. 1. – C. 20-32.
 39. Koike M. et al. Evaluation of titanium alloys fabricated using rapid prototyping technologies—electron beam melting and laser beam

- melting //Materials. – 2011. – Т. 4. – №. 10. – С. 1776-1792.
40. Pyka G. et al. Surface modification of Ti6Al4V open porous structures produced by additive manufacturing //Advanced Engineering Materials. – 2012. – Т. 14. – №. 6. – С. 363-370.
41. Cooper D. E. et al. Additive manufacturing for product improvement at Red Bull Technology //Materials & Design. – 2012. – Т. 41. – С. 226-230.
42. Zhao Z Y, Li L, Bai P K, et al. The Heat treatment influence on the microstructure and hardness of TC4 titanium alloy manufactured via selective laser melting[J]. Materials, 2018, 11(8): 1318.
43. Bruschi S, Bertolini R, Ghiotti A. Coupling machining and heat treatment to enhance the wear behaviour of an Additive Manufactured Ti6Al4V titanium alloy[J]. Tribology International, 2017, 116: 58-68.
44. Vrancken B, Thijs L, Kruth J P, et al. Heat treatment of Ti6Al4V produced by Selective Laser Melting: Microstructure and mechanical properties[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2012, 541: 177-185.
45. Wauthle R, Vrancken B, Beynaerts B, et al. Effects of build orientation and heat treatment on the microstructure and mechanical properties of selective laser melted Ti6Al4V lattice structures[J]. Additive Manufacturing, 2015, 5: 77-84.
46. Колачев Б. А. Водородная хрупкость металлов / Б. А. Колачев. – М. : Металлургия, 1985. – 217 с
47. Zhu T., Li M. Effect of 0.770 wt%Н addition on the microstructure of Ti–6Al– 4V alloy and mechanism of hydride formation // Journal of Alloys and Compounds. – 2009. – 481. – P. 480–485.
48. Ильющенко А. Ф., Купченко Г. В., Лученок А. Р. Литейно – Импульсный Метод Получения Изделий Из Сплава На Основе Титан – Алюминий // Литьё и металлургия. – 2012, (68) . – С. 130-134.
49. Погребняк А.Д., Рузимов Ш.М., Кульментьева О.П., Русаков В.С.,

- Алонцева Д.Л., Дядюра К.А., Понарядов В.В. Характеристики И Свойства Защитных Покровов На Основе Ni-Cr И Co-Cr После Обработки Концентрированными Потоками Энергии // ФИП. – 2005. – №3-4, vol. 3. – С. 158 – 189.
50. E. Tal-Gutelmacher, Eliezer D. Hydrogen cracking in titanium-based alloys // Journal of Alloys and Compounds. – 2005. –404–406. – P. 621–625.
51. Тюрин Ю. И. Аккумулирующие свойства водорода в твердом теле / Ю. И. Тюрин, И. П. Чернов. – М. :Энергоатомиздат, 2000. – 285 с
52. Агеев В. Н., Афанасьева Е. Ю., Потехина Н. Д. Кинетика окисления тонких пленок титана, выращенных на поверхности вольфрама //Физика твердого тела. – 2004. – Т. 46. – №. 8. – С. 45-52.
53. Гельд П.В., Рябов Р.А., Мохрачева Л.П. Водород и физические свойства металлов и сплавов. – М.: Наука. –1985. –232 с
54. Ливанов В. А. Водород в титане / В. А. Ливанов, А. А. Буханова, Б. А. Колачев. –М. :Металлургиздат, 1962. –246 с
55. Мороз Л. С. Водородная хрупкость металлов / Л. С. Мороз, Б. Б. Чечулин.–М. : Металлургия, 1967. –256 с 47
56. Морозов А. Н., Михайличенко А. И. Получение Наноструктурированных Высокоупорядоченных Пленок Диоксида Титана // Успехи в химии и химической технологии. – 2012. – (140) . – С. 3030-3422.
57. Kudiiarov V. N. et al. Application of automated complex Gas Reaction Controller for hydrogen storage materials investigation //Advanced Materials Research. – Trans Tech Publications, 2013. – Т. 740. – С. 690-693.
58. Gedney R. Tensile testing basics, tips and trends //Admet Quality Test & Inspection. – 2005.
59. Электронный ресурс. Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/321790927_UNIAXIAL_TEN

SION_TEST_THE_MOTHER_OF_ALL_MECHANICAL_TESTS

60. Электронный ресурс. Режим доступа: <http://matved2010.narod.ru/glava523.html>.
61. Kudiiarov V. N., Pushilina N. S., Harchenko S. Y. Development of Stand for Testing Electrochemical Permeation (STEP) of Hydrogen through Metal Foils //Advanced Materials Research. – Trans Tech Publications, 2015. – Т. 1085. – С. 224-228.
62. Liu Q., Atrens A. A critical review of the influence of hydrogen on the mechanical properties of medium-strength steels //Corrosion Reviews. – 2013. – Т. 31. – №. 3-6. – С. 85-103.
63. Galarraga H , Lados D A , Dehoff R R , et al. Effects of the microstructure and porosity on properties of Ti-6Al-4V ELI alloy fabricated by electron beam melting (EBM)[J] // Additive Manufacturing. – 2016. – №.10. – С.47-57.
64. СанПиН 2.4.2.576-96. «Гигиенические требования к условиям обучения школьников в различных видах современных общеобразовательных учреждений»
65. СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 «Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы»
66. СН 2.2.4/2.1.8.562-96 «Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки. Санитарные нормы»
67. ГОСТ 12.1.019-79 «ССБТ. Электробезопасности. Общие требования и номенклатура видов защиты»
68. НПБ 105-03 «Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности»
69. СНиП 21-01-97 «Пожарная безопасность зданий и сооружений»
70. ППБ 01-03 «Правила пожарной безопасности в Российской Федерации»