

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

### БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Тема работы
Исследование физико-механических характеристик сетчатых материалов, полученных с использованием аддитивных технологий

УДК 620.22-023.885:539-048.27

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0Б81	Шулдякова Дарина Феликсовна		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Сурменева Мария Александровна	канд. физ.-мат. наук		

### КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Меньшикова Екатерина Валентиновна	канд. филос. наук		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Сечин Андрей Александрович	канд. техн. наук		

### ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЭФ	Склярова Елена Александровна	канд. пед. наук, доцент		

## ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОСВОЕНИЯ ООП

Код компетенции	Наименование компетенции
<b>Универсальные компетенции</b>	
<b>УК(У)-1</b>	Способен осуществлять поиск, критический анализ и синтез информации, применять системный подход для решения поставленных задач
<b>УК(У)-2</b>	Способен определять круг задач в рамках поставленной цели и выбирать оптимальные способы их решения, исходя из действующих правовых норм, имеющихся ресурсов и ограничений
<b>УК(У)-3</b>	Способен осуществлять социальное взаимодействие и реализовать свою роль в команде.
<b>УК(У) -4</b>	Способен осуществлять деловую коммуникацию в устной и письменной формах на государственном и иностранном (-ых) языке.
<b>УК(У)-5</b>	Способен воспринимать межкультурное разнообразие общества в социально-историческом, этическом и философском контекстах.
<b>УК(У)-6</b>	Способен управлять своим временем, выстраивать и реализовывать траекторию саморазвития на основе принципов образования в течение всей жизни.
<b>УК(У)-7</b>	Способен поддерживать должный уровень физической подготовленности для обеспечения полноценной социальной и профессиональной деятельности.
<b>УК(У)-8</b>	Способен создавать и поддерживать безопасные условия жизнедеятельности, в том числе при возникновении чрезвычайных ситуаций.
<b>УК(У)-9</b>	Способен проявлять предприимчивость в практической деятельности, в т.ч. в рамках разработки коммерчески перспективного продукта на основе научно-технической идеи.
<b>Общепрофессиональные компетенции</b>	
<b>ОПК(У)-1</b>	Способностью использовать в профессиональной деятельности базовые естественнонаучные знания, включая знания о предмете и объектах изучения, методах исследования, современных концепциях, достижениях и ограничениях естественных наук (прежде всего химии, биологии, экологии, наук о земле и человеке).
<b>ОПК(У)-2</b>	Способностью использовать в профессиональной деятельности базовые знания фундаментальных разделов математики, создавать математические модели типовых профессиональных задач интерпретировать полученные результаты с учетом границ применимости моделей.
<b>ОПК(У)-3</b>	Способностью использовать базовые теоретические знания фундаментальных разделов общей и теоретической физики для решения профессиональных задач.

<b>ОПК(У)-4</b>	Способностью понимать сущность и значение информации в развитии современного общества, осознавать опасность и угрозу, возникающие в этом процессе, соблюдать основные требования информационной безопасности.
<b>ОПК(У)-5</b>	Способностью использовать основные методы, способы и средства получения, хранения, переработки информации и навыки работы с компьютером как со средством управления информацией.
<b>ОПК(У)-6</b>	Способностью решать стандартные задачи профессиональной деятельности на основе информационной и библиографической культуры с применением информационно-коммуникационных технологий и с учетом основных требований информационной безопасности.
<b>ОПК(У)-7</b>	Способностью использовать в своей профессиональной деятельности знание иностранного языка.
<b>ОПК(У)-8</b>	Способностью критически переосмысливать накопленный опыт, изменять при необходимости направление своей деятельности.
<b>ОПК(У)-9</b>	Способностью получить организационно-управленческие навыки при работе в научных группах и других малых коллективах исполнителей.
<b>Профессиональные компетенции</b>	
<b>ПК(У)-1</b>	Способностью использовать специализированные знания в области физики для освоения профильных физических дисциплин.
<b>ПК(У)-2</b>	Способностью проводить научные исследования в избранной области экспериментальных и (или) теоретических физических исследований с помощью современной приборной базы (в том числе сложного физического оборудования) и информационных технологий с учетом отечественного и зарубежного опыта.
<b>ПК(У) -3</b>	Готовностью применять на практике профессиональные знания теории и методов физических исследований.
<b>ПК(У)-4</b>	Способностью применять на практике профессиональные знания и умения, полученные при освоении профильных физических дисциплин.
<b>ПК(У)-5</b>	Способностью пользоваться современными методами обработки, анализа и синтеза физической информации в избранной области физических исследований.
<b>ПК(У)-6</b>	Способностью понимать и использовать на практике теоретические основы организации и планирования физических исследований
<b>ПК(У)-7</b>	Способностью участвовать в подготовке и составлении научной документации по установленной форме.
<b>ПК(У)-8</b>	Способностью понимать и применять на практике методы управления в сфере природопользования.

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

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

УТВЕРЖДАЮ:  
 Руководитель ООП  
 \_\_\_\_\_ Склярова Е.А.  
 (Подпись) (Дата)

**ЗАДАНИЕ  
на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

бакалаврской работы
---------------------

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

Студенту:

Группа	ФИО
0Б81	Шулдяковой Дарине Феликсовне

Тема работы:

<b>Исследование физико-механических характеристик сетчатых материалов, полученных с использованием аддитивных технологий</b>	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	

Срок сдачи студентом выполненной работы:	
--	--

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

<p><b>Исходные данные к работе</b></p> <p><i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</i></p>	<p>– Сетчатая структура из порошка сплава титана Ti-6Al-4V с топологией гироид, изготовленной методом электронно-лучевого плавления</p>
<p><b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b></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"> <li>– Обзор литературных источников;</li> <li>– Исследование морфологии сетчатых структур с топологией гироид из сплава Ti-6Al-4V;</li> <li>– Определение механических свойств при испытаниях на растяжение, сжатие, при усталостных испытаниях;</li> <li>– Социальная ответственность;</li> <li>– Финансовый менеджмент,</li> <li>– Ресурсоэффективность и ресурсосбережение;</li> <li>– Заключение</li> </ul>
<p><b>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</b> <i>(с указанием разделов)</i></p>	
<p style="text-align: center;"><b>Раздел</b></p>	<p style="text-align: center;"><b>Консультант</b></p>
<p>Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение</p>	<p style="text-align: center;">Меньшикова Екатерина Валентиновна, доцент</p>
<p>Социальная ответственность</p>	<p style="text-align: center;">Сечин Андрей Александрович, доцент</p>
<p><b>Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:</b></p>	

<p><b>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</b></p>	
--	--

**Задание принял к исполнению студент:**

<p style="text-align: center;"><b>Группа</b></p>	<p style="text-align: center;"><b>ФИО</b></p>	<p style="text-align: center;"><b>Подпись</b></p>	<p style="text-align: center;"><b>Дата</b></p>
<p style="text-align: center;">0Б81</p>	<p style="text-align: center;">Шулдякова Дарина Феликсовна</p>		

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

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
ОБ81	Шулдяковой Дарине Феликсовне

<b>Школа</b>	<b>ИЯТШ</b>	<b>Отделение школы (НОЦ)</b>	<b>Отделение экспериментальной физики</b>
<b>Уровень образования</b>	Бакалавриат	<b>Направление/специальность</b>	03.03.02 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>Бюджет – 383363,5 руб. Затраты на заработную плату – 195816,3 руб. Накладные расходы – 46569,8 руб.</i>
2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	<i>– 0,3 премии – 0,2 надбавки – 0,16 накладные расходы – 1,3 районный коэффициент</i>
3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	<i>Коэффициент отчислений во внебюджетные фонды – 30,2%</i>

**Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:**

1. <i>Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения</i>	<i>Оценка потенциальных потребителей исследования, SWOT – анализ,</i>
2. <i>Планирование и формирование бюджета научных исследований</i>	<i>Планирование этапов работ, определение трудоемкости и построение календарного графика, формирование бюджета.</i>
3. <i>Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования</i>	<i>Расчет и оценка финансовой эффективности</i>

**Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):**

1. Оценка конкурентоспособности технических решений
2. Матрица SWOT
3. Альтернативы проведения НИ
4. График проведения и бюджет НИ
5. Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НИ

<b>Дата выдачи задания для раздела по линейному графику</b>	
---	--

**Задание выдал консультант:**

<b>Должность</b>	<b>ФИО</b>	<b>Ученая степень, звание</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
доцент ОСГН ШБИП ТПУ	Меньшикова Екатерина Валентиновна	к.ф.н.		

**Задание принял к исполнению студент:**

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
ОБ81	Шулдякова Дарина Феликсовна		

## ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

<b>Группа</b>		<b>ФИО</b>	
ОБ81		Шулдяковой Дарине Феликсовне	
<b>Школа</b>	ИЯТШ	<b>Отделение (НОЦ)</b>	Отделение экспериментальной физики
<b>Уровень образования</b>	Бакалавриат	<b>Направление/специальность</b>	03.03.02 Физика

Тема ВКР:

Исследование физико-механических характеристик сетчатых материалов, полученных с использованием аддитивных технологий	
<b>Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:</b>	
<p><b>Введение</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика) и области его применения.</li> <li>– Описание рабочей зоны (рабочего места) при разработке проектного решения/при эксплуатации</li> </ul>	<p><i>Объект исследования:</i> сетчатая структура из порошка сплава титана Ti-6Al-4V с топологией гироид, изготовленной методом электронно-лучевого плавления.</p> <p><i>Область применения:</i> научные исследования в лаборатории.</p> <p><i>Рабочая зона:</i> лаборатория</p> <p><i>Количество и наименование оборудования рабочей зоны:</i> рабочая поверхность с ПЭВМ</p> <p><i>Рабочие процессы, связанные с объектом исследования, осуществляющиеся в рабочей зоне:</i> изучение источников литературы, проведение расчетов на ПЭВМ, измерение пористости объемно-весовым методом.</p>
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
<p><b>1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности при разработке проектного решения:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства;</li> <li>– организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 25.02.2022) (с изм. и доп., вступ. в силу с 01.03.2022)</li> <li>– ГОСТ 12.2.032-7 «ССБТ. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования.»</li> <li>– ПНД Ф 12.13.1-03</li> </ul>
<p><b>2. Производственная безопасность при разработке проектного решения:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Анализ выявленных вредных и опасных производственных факторов</li> </ul>	<p>Вредные производственные факторы:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Отклонение показателей микроклимата</li> <li>– Превышение уровня шума</li> <li>– Отсутствие или недостаток необходимого естественного и искусственного освещения</li> </ul> <p>Опасные производственные факторы:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Опасность поражения током</li> </ul>
<p><b>3. Экологическая безопасность при разработке проектного решения</b></p>	<p><i>Воздействие на литосферу:</i> загрязнение почвы экспериментальными отходами</p> <p><i>Воздействие на гидросферу:</i> выброс сточных вод</p> <p><i>Воздействие на атмосферу:</i> выброс химических веществ</p>
<p><b>4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях при разработке проектного решения</b></p>	<p>Возможные ЧС: сильные морозы, пожары</p> <p>Наиболее типичная ЧС: пожар</p>
Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Сечин Андрей Александрович	к.т.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
ОБ81	Шулдякова Дарина Феликсовна		

**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 Бакалавриат

Направление подготовки – Физика конденсированного состояния

Отделение школы (НОЦ) – Отделение экспериментальной физики

Период выполнения (осенний / весенний семестр 2021/2022 учебного года)

Форма представления работы:

Бакалаврская работа (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)
01.03.2022	Аналитический обзор литературы	15
20.03.2022	Анализ морфологии поверхности полученных образцов с топологией трижды периодической поверхности минимальной энергии.	15
05.04.2022	Анализ механических свойств путем испытания образца на сжатие, растяжение и определение предела текучести, прочности, модуля Юнга.	10
10.04.2022	Выполнение усталостных испытаний и анализ результатов циклических испытаний сетчатых образцов сплава Ti-6Al-4V с топологией гироид.	10
15.04.2022	Описание механизмов деформации и разрушения образцов сплава титана Ti-6Al-4V в условиях статического и циклического нагружения.	10
25.04.2022	Анализ результатов	15
14.05.2022	Социальная ответственность	10
20.05.2022	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	10
24.05.2022	Заключение	5

Составил преподаватель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Сурменева Мария Александровна	канд. физ.-мат. наук		

**СОГЛАСОВАНО:**

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЭФ	Склярова Елена Александровна	к.п.н., доцент		

## РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 100 с., 42 рисунка, 25 таблиц, 60 источников, 0 приложений.

Ключевые слова: титановые сплавы, сетчатые структуры, топология трижды периодической поверхности минимальной энергии, электронно-лучевое плавление, топология, усталость, разрушение.

Объект исследования: сетчатая структура из порошка Ti-6Al-4V с топологией гироид, изготовленной методом электронно-лучевого плавления.

Цель работы – исследование физико-механических характеристик сетчатых структур на основе сплава титана с топологией трижды периодической поверхности минимальной энергии, полученных электронно-лучевым плавлением.

В процессе исследования проводились: получение изображений сканирующей электронной микроскопии, выполнение статических испытаний на сжатие, растяжение и исследование усталостных испытаний.

В результате образцы демонстрируют пористость, сопоставимую с пористостью губчатой кости, а модуль упругости находится в диапазоне 1,2–1,41 ГПа и соответствует модулю упругости кортикальной кости. Полученные структуры позволяют уменьшить модуль Юнга относительно беспористого титанового сплава и избежать эффекта экранирования напряжения, что увеличит срок службы имплантатов. Описание механизмов деформации и разрушения образцов сплава титана Ti-6Al-4V в условиях статического и циклического нагружения позволит прогнозировать поведение импланта в реальных условиях эксплуатации.

Область применения: биосовместимые материалы, применяемые в разных областях медицины.

Экономическая эффективность/значимость работы: полученные результаты могут оказать положительное влияние на усталостные свойства скэффолдов при дальнейших механических исследованиях.

## Оглавление

Введение .....	13
1. Литературный обзор.....	14
1.1 Материалы, применяемые для изготовления сетчатых структур.....	14
1.1.1 Титан и титановые сплавы.....	15
1.1.2 Титан и титановые сплавы.....	15
1.2 Технологии аддитивного производства для изготовления металлических сетчатых структур.....	17
1.2.1 Метод селективного лазерного плавления.....	19
1.2.2 Метод электронно-лучевого плавления .....	20
1.2.3 Сравнение методов СЛП и ЭЛП .....	21
1.2.4 Оборудование электронно-лучевого плавления.....	23
1.3 Топология металлических сетчатых структур.....	23
1.3.1 Традиционные типы структур.....	23
1.3.2 Трижды периодическая поверхность с минимальной энергией (ТППМЭ).....	28
1.4 Механические свойства металлических конструкций.....	34
1.4.1 Усталостные свойства сетчатых конструкций, полученных методами аддитивных технологий.....	34
Глава 2. Материалы и методика эксперимента .....	46
2.1 Изготовление сетчатых структур из сплава Ti-6Al-4V.....	46
2.2 Определение пористости образца.....	47
2.3 Исследование морфологии образца.....	47
2.4 Методика испытаний на растяжение .....	49
2.3 Методика проведения испытаний на сжатие .....	50
2.4 Методика проведения усталостных испытаний .....	51
Глава 3. Экспериментальная часть .....	52
3.1 Исследование пористости образца .....	52
3.2 Исследование морфологии поверхности.....	52
3.3 Определение механических свойств при испытаниях на растяжение .....	54
3.4 Определение механических свойств при испытаниях на сжатие.....	57

3.5	Определение механических свойств при усталостных испытаниях .....	58
Глава 4.	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение .....	63
4.1.1	Потенциальные потребители результатов работы .....	64
4.1.2	Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения .....	64
4.2	SWOT – анализ .....	66
4.3	Планирование научно-исследовательских работ .....	68
4.3.1	Определение трудоемкости выполнения работ .....	68
4.3.2	Разработка графика проведения научного исследования .....	71
4.4	Бюджет научно-технического исследования .....	72
4.4.1	Расчет материальных затрат научно-технического исследования .....	72
4.4.2	Расчет затрат на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ .....	72
4.4.3	Основная заработная плата исполнителей темы .....	73
4.4.4	Дополнительная заработная плата .....	74
4.4.5	Отчисления во внебюджетные фонды .....	74
4.4.6	Накладные расходы .....	75
4.4.7	Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта .....	75
4.5	Оценка эффективности проекта .....	76
	Заключение по разделу .....	78
Глава 5.	Социальная ответственность .....	79
	Введение .....	79
5.1	Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности. ....	79
5.1.2	Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны исследователя .....	80
5.2	Производственная безопасность .....	80
5.2.1.	Анализ вредных и опасных факторов, которые могут возникнуть на рабочем месте при проведении исследований. ....	80
5.2.2	Отклонение показателей микроклимата. ....	81
5.2.3	Превышение уровня шума .....	83

4.2.4 Недостаточная освещенность рабочей зоны.....	84
5.2.5 Электробезопасность и пожаробезопасность. ....	86
5.3. Экологическая безопасность. ....	88
5.3.1. Анализ влияния процесса исследования на окружающую среду. ....	88
5.4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. ....	90
5.4.1. Анализ вероятных ЧС, которые могут возникнуть на рабочем месте при проведении исследований.....	90
5.4.2. Обоснование мероприятий по предотвращению ЧС и разработка порядка действия в случае возникновения ЧС. ....	90
Выводы по разделу.....	91
Заключение.....	92
Литература .....	94

## **Введение**

Металлические пористые структуры получили широкое распространение и часто применяются в изготовлении медицинских изделий. С помощью аддитивных технологий стало возможным получение идентичных по топологии крупным костным дефектам трехмерных конструкций. Однако, массовое внедрение подобных структур связано с проблемой несоответствия механических характеристик пористых структур характеристикам костной ткани.

Для ускоренного остеогенеза в медицине ранее использовались литые металлические импланты. Однако, они не могут заменить костную ткань наилучшим образом. Литые импланты менее эффективны из-за большого веса, низкой способности к пролиферации клеток. Также модуль Юнга у литых имплантов в сотни раз больше по сравнению с костью. В результате снятия напряжения с кости возникает эффект экранирования напряжений, вследствие которого кость станет менее плотной и слабой. Для предотвращения резорбции кости следует добиваться понижения модуля Юнга. Использование пористых структур помогает контролировать значение модуля Юнга, уменьшает вес импланта и позволяет приблизить пористую структуру к структуре кости. Однако усталостные свойства пористых структур снижаются, по сравнению с литым металлом. Актуальной задачей современной медицины становится исследование влияния пористости, топологии и материала на физико-механические свойства металлических структур, изготовленных аддитивным способом.

Целью данной работы является исследование физико-механических характеристик сетчатых структур на основе сплава титана с топологией трижды периодической поверхности минимальной энергии, полученных электронно-лучевым плавлением.

Достижение цели потребовало решения следующих задач:

- анализ морфологии поверхности полученных образцов с топологией трижды периодической поверхности минимальной энергии.

- анализ механических свойств путем испытания образца на сжатие, растяжение и определение предела текучести, прочности, модуля Юнга.
- выполнение усталостных испытаний и анализ результатов циклических испытаний сетчатых образцов сплава Ti-6Al-4V с топологией гироид.
- описание механизмов деформации и разрушения образцов сплава титана Ti-6Al-4V в условиях статического и циклического нагружения.

## **1. Литературный обзор**

### **1.1 Материалы, применяемые для изготовления сетчатых структур**

Мета-биоматериалы – класс метаматериалов с необычными или новыми комбинациями механических, физических и биологических свойств. Топологически сложные мета-биоматериалы улучшают регенерацию кости и остеоинтеграцию [1]. Механические свойства таких материалов связаны с их топологией и типом материала.

Материал для изготовления имплантов должен соответствовать ряду требований. Он должен оставаться биосовместимым и не изменять свойств в процессе эксплуатации. Материал импланта не должен идти в химическую реакцию с окружающими его тканями и жидкостями. Он должен быть прочным и износостойким. При этом должны отсутствовать реакции иммунной системы на металл [2].

Различные металлы и их сплавы могут использоваться в качестве мета-биоматериала. В работе [3] изучали металлические сетчатые структуры, изготовленные из алюминиевого сплава AlSi10Mg. Он обладает превосходными характеристиками поглощения энергии, имеет малый вес, отличные теплоизоляционные свойства и высокое соотношение прочности и веса. Однако при этом порошок этого сплава обладает плохой сыпучестью, высокой лазерной отражательной способностью и теплопроводностью.

В статье [4] говорится об использовании сплавов на основе кобальта из-за хорошей биосовместимости, удовлетворительной механической прочности и превосходной коррозионной стойкости. Однако данный материал жестче, чем натуральные кости, что приводит к резорбции кости. Поэтому необходимо регулировать модуль Юнга и предел текучести. Также в статье обсуждается биосовместимость различных металлов. Ванадий (V) может вызывать стерильный абсцесс – локализованное образование в мягких тканях, а алюминий (Al) может вызывать рубцовую ткань, тогда как титан (Ti), цирконий (Zr), ниобий (Nb) и тантал (Ta) демонстрируют отличную биосовместимость.

Важным направлением в разработке биосовместимых титановых сплавов является уменьшение модуля упругости титана за счет добавления  $\beta$ -стабилизирующих биосовместимых элементов. Одним из примеров является Ti13Nb13Zr [5], который показал высокую биосовместимость и модуль упругости 79 ГПа. Твердый NiTi имеет модуль 48 ГПа, что намного ниже, чем у других сплавов Ti. Кроме того, NiTi допускает относительно большую упругую деформацию до 8%. Однако Ni может вызывать аллергию.

Магниево-титановые сплавы изучаются в медицине как резорбируемый материал. Магний и его сплавы постепенно разлагаются в организме человека в течение определенного периода времени. Однако пористые сплавы Mg разлагаются *in vivo* слишком быстро, что может привести к образованию подкожных газовых полостей [6].

### **1.1.2 Титан и титановые сплавы**

Титановые сплавы являются наиболее привлекательными металлическими материалами для биомедицинских применений. Титановые сплавы имеют отличную удельную прочность и коррозионную стойкость, не вызывают аллергию, имеют наилучшую биосовместимость среди металлических биоматериалов. Чистый титан и Ti-6Al-4V – по-прежнему наиболее широко используемые металлы для биомедицинских применений

среди титановых сплавов. Они занимают почти весь рынок титановых биоматериалов [2, 7-11].

К материалам, применяемым в медицине, предъявляются особые требования по уровню прочностных и, в особенности, усталостных свойств, поскольку во многих случаях предполагается их длительное использование, и преждевременное разрушение в этом случае недопустимо. С этой точки зрения оптимальным из рассмотренных материалов является сплав Ti-6Al-4V. Увеличение прочности в этом сплаве достигнуто за счет введения в его состав алюминия и ванадия. Основными физическими свойствами титана и сплава Ti-6Al-4V, способствующими их биосовместимости являются: низкий уровень электронной проводимости, высокая коррозионная стойкость, низкая способность к образованию ионов в водных средах [2].

Тем не менее титановый сплав Ti-6Al-4V для биомедицинских целей, имеют значимый недостаток. Модуль упругости цельных беспористых титановых сплавов составляет 100–115 ГПа, когда значения для разного вида костей составляют от 0,5–20 ГПа [12]. При сильных механических нагрузках напряжение становится больше предельного и кость начинает разрушаться, становится менее плотной и слабой. Возникает эффект экранирования напряжений. Поэтому модуль Юнга имплантата должен быть приближен к модулю Юнга кости. Для решения данной проблемы существует два подхода:

- 1) Использование низкомодульных сплавов.
- 2) Изменение пористости материала. Пористость – доля объема пор в общем объеме пористого тела. Увеличение пористости сетчатой структуры снижает ее модуль упругости [5, 13].

Примеры применения титана и его сплавов включают искусственные тазобедренные суставы, искусственные коленные суставы, костные пластины, винты для фиксации перелома, протезы клапанов сердца и кардиостимуляторы [13-14].

## **1.2 Технологии аддитивного производства для изготовления металлических сетчатых структур**

Методы аддитивного производства позволяют воспроизводить структуры с контролируемой топологией, пористостью, формой и размером. При этом получается пористый биоматериал с оптимально распределенной микроструктурой, который достигает желаемые механические свойства.

В статье [15] обсудили современные методы изготовления металлических сетчатых структур. Описаны такие методы, как селективное лазерное плавление/спекание (СЛП/СЛС), электронно-лучевая плавка (ЭЛП), лазерное напыление металла (ЛНМ). Рассмотрим более подробно эти методы.

В методе СЛП/СЛС для спекания используются лазеры высокой мощности для создания трехмерных физических объектов за счет плавки металлических порошков. Данный метод является самым распространенным методом 3D-печати металлом. С помощью этой технологии можно быстро изготавливать сложные по геометрии металлические изделия, которые по своим качествам превосходят изделия, полученные с помощью литейного и прокатного производства.

Следующим методом, который используется для изготовления металлических структур является электронно-лучевая плавка. ЭЛП – это разновидность аддитивного производства металлических структур. Металлический порошок сплавляется в вакууме от нагрева электронным лучом.

В статье [16] добавляется описание еще одного метода аддитивного производства. В лазерном напылении металла деталь создается путем плавления поверхности и одновременного нанесения металлического порошка. Ванна расплава, которую обычно защищают от окисления путем подачи аргона или гелия, создается за счет подводимой энергии, посредством лазера, при этом металлический порошок подается через коаксиальное или многоструйное сопло. ЛНМ обеспечивает высокую скорость наращивания и позволяет создавать большие объемы. Чаще всего деталь остается

неподвижной, в то время как головка для осаждения перемещается для каждого слоя.

Метод послойной наплавки [17] также используется для создания металлических структур. Это направление аддитивных технологий основывается не на порошковых технологиях, а на экструдировании. Экструзия – технология получения изделий путём продавливания вязкого расплава материала или густой пасты через формующее отверстие. Рассмотрим принцип работы этого метода.

Полимерная нить из нагретой головки в расплавленном состоянии подается на плоскость, где она осаждается и застывает, формируя очередной слой. В качестве материалов используются термопластики, легкоплавкие металлы и сплавы, поставляемые в виде катушек.

Стереолитография (СЛГ) [18, 19] также используется для создания металлических структур. Это направление аддитивных технологий основывается на фотополимеризации. Фотополимеризация – образование полимеров под действием света. Принтеры, работающие по данному принципу, имеют платформу, которую погружают в бак с жидким фотополимером. Лазер проходит по поверхности, в результате чего слой фотополимера затвердевает. Затем платформа опускается на глубину одного слоя и процесс повторяется до тех пор, пока объект полностью не построится. Материал, использующийся в СЛГ-технологиях – фотополимерная смола. Если нужно получить металлическую деталь, можно сделать следующее: СЛГ-модель заливается формовочной смесью, прокаливается при высоких температурах (до 1000 °С). При этом происходит полное выгорание пластика, на его место в образовавшуюся форму под вакуумом заливается металл. После его застывания форма разрушается, деталь извлекается.

Технология PolyJet [19] является наименее популярной среди аддитивных технологий. Нанесение материала в технологии PolyJet происходит с помощью струйных головок. Жидкий фотополимер отвердевает под действием светового излучения. После окончания нанесения всего слоя

зону печати подвергают мощному ультрафиолетовому излучению для полного отвердевания материала, после чего наносится следующий слой.

### 1.2.1 Метод селективного лазерного плавления

Рассмотрим более детально селективное лазерное спекание/плавление и перечислим свойства характерные для образцов, которые были получены данным методом.

Принцип процесса СЛП основан на том, что металлический порошок очень тонкими слоями наносится на платформу, который позже полностью расплавляется с использованием тепловой энергии, индуцированной лазерным лучом (рисунок 1). Площадь поперечного сечения детали создается путем плавления и повторного затвердевания металлического порошка в каждом слое, затем осаждается новый слой порошка и выравнивается после опускания платформы. Этот процесс повторяется до получения готового продукта. Лазерный луч может быть перенаправлен и сфокусирован поперек слоя порошка по образцу, созданному компьютером с помощью сканера, таким образом, чтобы частицы порошка можно было выборочно расплавить там, где это необходимо. В зависимости от поставленных задач регулируются температура, глубина и время воздействия.

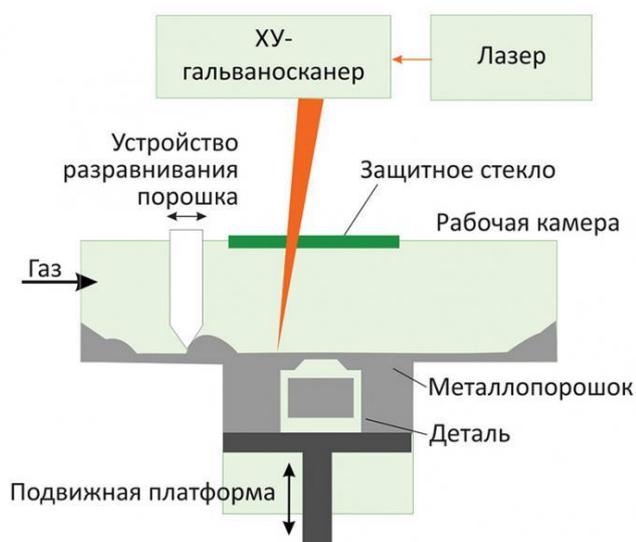


Рисунок 1 – Схема процесса СЛП/СЛС [20]

Когда лазер контактирует с металлическим порошком во время процессов быстрого плавления и затвердевания, происходит ряд сложных

физических и химических явлений, таких как поглощение и рассеяние энергии, теплопередача, фазовый переход [21].

В исследованиях [21-26] отмечается несоответствие геометрии образцов, полученных с помощью СЛП заданной при составлении файла для печати. Поэтому, по мере развития технологий, спрос на продукты последующей обработки, производимые на принтерах СЛС/СЛП, становится все меньше и меньше.

### 1.2.2 Метод электронно-лучевого плавления

ЭЛП – процесс, аналогичный СЛП, но вместо использования лазера в качестве источника энергии используется электронный луч. Схема ЭЛП процесса представлена на рисунке 2. В основе технологии лежит использование электронных пучков высокой мощности для сплавления металлического порошка в вакуумной камере с образованием последовательных слоев, повторяющих контуры цифровой модели. Вольфрамовая нить нагревается для генерации электронного луча, электроны ускоряются к столу с металлическим порошком с ускоряющим напряжением 60 кВ. Электромагнитные катушки фокусируют и отклоняют электронный луч. ЭЛП печатает слой за слоем, пока структура не будет завершена.

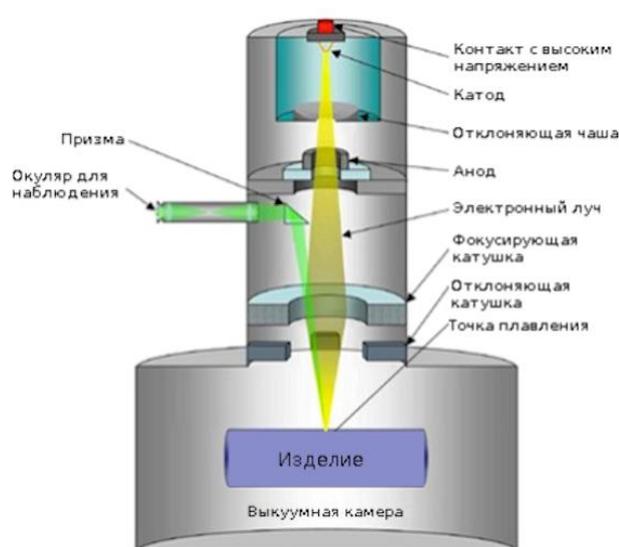


Рисунок 2 – Схема ЭЛП процесса [27]

В исследованиях [28-31] отмечается, что ЭЛП метод позволяет создавать металлические модели высокой плотности из металлического порошка. Устройство считывает данные с файла, содержащего трехмерную цифровую модель, и наносит последовательные слои порошкового материала. Контуры слоев модели печатаются электронным пучком, плавящим порошок в местах соприкосновения.

Электронно-лучевая плавка проводится при температуре подложки 700-1000°C, что позволяет создавать детали без остаточного механического напряжения, которое вызвано градиентом температур между уже охлажденными и еще горячими слоями. Кроме того, полная плавка расходного порошка позволяет производить монолитные изделия – отсюда максимальная прочность и отсутствие необходимости обжига. Также преимуществом метода является исключение взаимодействия кислорода и азота со сплавами, чувствительными к газам за счет работы системы под вакуумом. Структуры, произведенные методом ЭЛП, имеют более высокую шероховатость внешней поверхности из-за специфики настроек процесса, более высокой энергии луча и дисперсии порошка.

### **1.2.3 Сравнение методов СЛП и ЭЛП**

Материалы, полученные разными методами, показывают различные свойства из-за различных условий изготовления. При селективном лазерном плавлении материал сплавляется лазерным пучком мощностью 120–170 Вт при атмосферном давлении [32]. При электронно-лучевой плавке спекание материала осуществляется электронным пучком мощностью 50–3000 Вт. Плавка осуществляется в специальных вакуумных камерах, благодаря чему полученный материал не будет содержать примесей. Материал нагревается до 700° С, что уменьшает количество концентраторов напряжений в образцах.

В статье [32] сравнивают влияние дефектов на сплав Ti-6Al-4V, изготовленный методом селективного лазерного плавления и электронно-лучевого плавления.

Исследование СЛП метода показало, что при спекании в образцах образуются небольшие поры в количестве до 1 об.%, которые возникают из-за увеличения плотности энергии выше оптимального уровня. Это не существенно влияет на механические свойства. Но при увеличении плотности энергии поры увеличиваются и механические свойства материала ухудшаются. С другой стороны, низкое значение плотности энергии приводит к дефектам до 1 об.%, что сильно влияет на прочность и усталость материала.

Исследование особенностей ЭЛП метода показало, что недостаточный подвод энергии приводит к большим макроскопическим пустотам, что вызывает серьезное ухудшение всех механических свойств.

Образцы СЛП и ЭЛП демонстрируют сопоставимые пластичность при растяжении, усталостную прочность и твердость. В образцах, полученных СЛП методом, дефекты, вызванные чрезмерным подводом энергии, менее вредны для механических свойств детали, чем дефекты, вызванные недостаточным подводом энергии. В образцах, полученных ЭЛП методом, отклонение от оптимальных параметров процесса приводит к относительно большим дефектам и плохим механическим свойствам.

Исследование [33] направлено на изучение сжатия и микроструктурных характеристик Ti-6Al-4V различных размеров, полученных методами ЭЛП и СЛП. Для исследований изготовлены плотные цилиндры из Ti-6Al-4V четырех различных размеров и решетчатые структуры ромбического додекаэдра Ti-6Al-4V с открытыми ячейками.

Напечатанные СЛП детали демонстрируют более высокую прочность, образцы демонстрируют упругопластическую деформацию. Детали, полученные ЭЛП, проявляют явную чувствительность к размеру, поскольку механические характеристики значительно снижаются, когда размер образца меньше 4 мм. Кроме того, было обнаружено, что материал, изготовленный методом СЛП, более чувствителен к скорости деформации, чем детали ЭЛП.

## 1.2.4 Оборудование электронно-лучевого плавления

Оборудование, используемое для электронно-лучевого плавления, принципиально важно для изготовления металлической сетчатой структуры. Шведская компания Arcam AB изготавливает системы электронно-лучевой плавки, которые создают твердые детали из металлических порошков. Рассмотрим подробнее одну из установок.

ARCAM A2 EBM (Arcam AB, Mölndal, Sweden) – это промышленное устройство для печати металлических моделей методом электронно-лучевой плавки. Аппарат спроектирован специально для печати изделий из титановых сплавов (рисунок 3).



Рисунок 3 – Установка Arcam A2 EBM [30]

Мощность электронного пучка составляет от 50 до 3500 Вт. Скорость сканирования до 8000 м/с. Базовое вакуумное давление  $< 1 * 10^{-4}$  мбар. Поперечное сечение пучка от 0,2 мм до 1,0 мм [34].

## 1.3 Топология металлических сетчатых структур

### 1.3.1 Традиционные типы структур

Топология пористых структур во многом определяет механические свойства импланта. Большое разнообразие различных типов структур позволяет получать требуемые характеристики. Традиционно для создания

пористых структур используются ячейки ОЦК [36], кубическая [35, 37-38], алмазная [30], примитивная ячейка Шварца [29]. Рассмотрим данные типы структур более подробно.

В работе [36] были исследованы пористые титановые структуры на сжатие и кручение. Для изучения были выбраны три различные элементарные ячейки: ОЦК, кубическая и кубическая под углом  $45^\circ$ . Все пористые структуры были изготовлены с использованием ЭЛП. Для каждой топологии были достигнуты три разные степени пористости: 70%, 80% и 90%. Для всех случаев средняя толщина подкосов были изготовлены примерно на 0,65 мм.

Изучено влияние ориентации нагрузки на испытания на сжатие. Проведен конечно-элементный анализ кубических структур. Прежде всего, сжимающие нагрузки применялись в вертикальном направлении. Впоследствии типом разрушения кубических структур было послойное схлопывание, в то время как ОЦК и поперечные структуры разрушались с образованием полос до  $45^\circ$ .

При испытаниях на сжатие первый разрушенный слой имел случайное положение, которое иногда располагалось в центре конструкции (рисунок 4). Это связано с тем, что страты имеют неправильную форму, что приводит к обрушению страт с большим количеством дефектов.

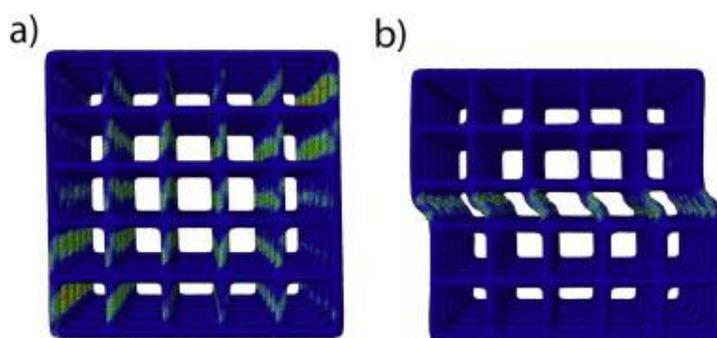


Рисунок 4 – Механизм деформации перед и после начала обрушения при нагрузках, а)  $45^\circ$ ; б)  $90^\circ$  [36]

Кубические конструкции показали значения прочности и жесткости выше, чем ОЦК и поперечные конструкции, когда нагрузка действовала вертикально. Механические свойства на кручение лучше в поперечных

структурах, чем в кубических структурах, что противоречит наблюдениям испытаний на сжатие. Расчетный анализ показал, что кубические конструкции эволюционировали от потери устойчивости к деформации изгиба с уменьшением наклона нагрузок относительно их горизонтальной оси.

Целью исследования [32] было изучение влияния пористости на характеристики усталости при сжатии и механизм разрушения ячеистого материала Ti-6Al-4V, изготовленного SLM методом, на основе элементарной ячейки кубооктаэдра (рисунок 5).

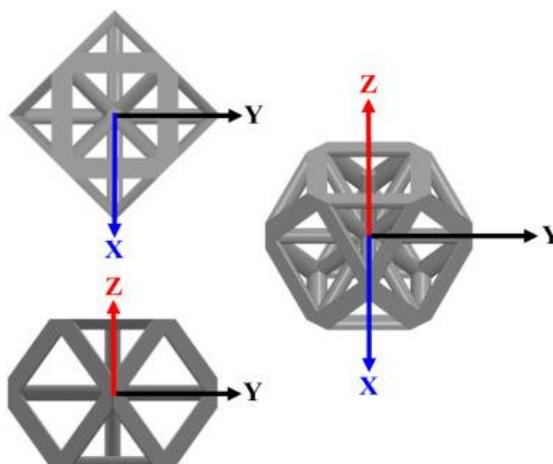


Рисунок 5 – Кубооктаэдрическая элементарная ячейка [32]

С помощью метода СЛП были созданы ячейки с пористостью 33%, 50% и 84%. Размеры структуры составляли 2 мм, 2 мм и 1,44 мм. Диаметр и высота цилиндра составляли 13 мм и 25 мм, соответственно. Высота сплошной верхней секции, ячеистой средней секции и сплошной нижней секции составляла 5 мм, 15 мм и 5 мм соответственно. Ширина страта была отрегулирована для создания ячеистых материалов Ti-6Al-4V с тремя различными пористостями.

На основе проведенных исследований, ученые сделали вывод о том, что микроструктура материала Ti-6Al-4V, изготовленного СЛП методом, представляет собой  $\alpha'$ -мартенсит. Коэффициент усталостной прочности Ti-6Al-4V с кубооктаэдрическими элементарными ячейками и пористостью 33% составил 0,5. Коэффициент усталостной прочности характеризует степень близости рабочих условий к предельным для данного материала

Однако увеличение пористости с 33 до 84% снизило коэффициент усталостной прочности с 0,5 до 0,15. Это явление можно объяснить низкой пластичностью  $\alpha'$ -мартенсита.

В исследовании [33] изучали влияние формы ячеек на механические свойства образцов. Сравнивались структуры с кубическими ячейками, с ячейками типа G7 и ячейками типа ромбического додекаэдра (рисунки 6-8). Также исследователи адаптировали модель Гибсона-Эшби для каждого случая.

Кубическая структура имеет самый высокий модуль упругости, кубическая структура также обладает самой высокой прочностью. Кубическая структура демонстрирует поведение хрупкой деформации при сжатии.



Рисунок 6 – Кубическая ячейка [33]

Формула Гибсона-Эшби для ячейки кубической формы:

$$\frac{E}{E_s} = C_1 \frac{\rho}{\rho_s}$$

Сетка G7 имеет самый низкий модуль упругости и прочность. Кривые напряжение – деформация ячеистой структуры G7 проявляют пластичный характер при сжатии.



Рисунок 7 – Ячейка G7 [33]

Формула Гибсона-Эшби для ячейки G7 выглядит следующим образом:

$$\frac{E}{E_s} = C_2 \left( \frac{\rho}{\rho_s} \right)^2$$

Сетка ячеек ромбического додекаэдра демонстрирует поведение хрупкой деформации при сжатии. Эта структура имеет средний модуль Юнга и среднюю прочность.

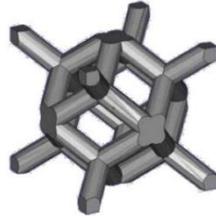


Рисунок 8 – Ячейка ромбического додекаэдра [33]

Формула Гибсона-Эшби для ячейки ромбического додекаэдра:

$$\frac{E}{E_s} = C_3 \left( \frac{\rho}{\rho_s} \right)^2$$

$C_1, C_2, C_3$  – постоянные значения, относящиеся к материалу страт ячеек.

Изгиб при сжатии уменьшается в порядке от кубической ячейки к ячейке ромбического додекаэдра и далее к ячейке G7. Продольный изгиб в этом порядке увеличивается. Это объясняет пластичный характер деформации ячейки G7 и хрупкий характер деформации кубической ячейки. Чтобы охарактеризовать их вклад, нагрузку  $P$ , приложенную к стратам, разделили на две составляющие  $P_1$  и  $P_2$  вдоль направлений деформации продольного изгиба и изгиба при сжатии, соответственно (рисунок 9).

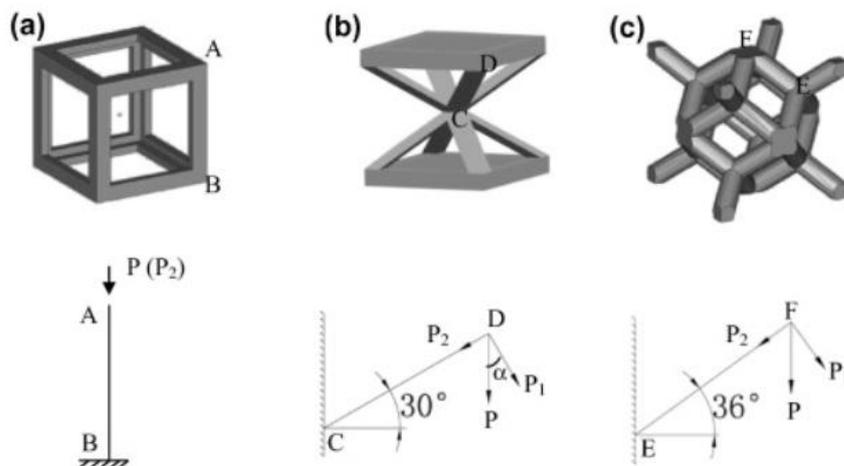


Рисунок 9 – Схема для изображения векторов продольного изгиба и изгиба при сжатии, приложенной к (а) кубической ячейке, (б) ячейке G7 и (в) ячейке ромбического додекаэдра [32]

Изменения компонентов  $P_1$  и  $P_2$  влияют на прочность и модуль Юнга структуры. Более высокое значение  $P_1$  и более низкое значение  $P_2$  соответствуют более низкой прочности и низкому модулю упругости.

В геометрическом представлении модуль упругости сетки  $E$  можно уменьшить путем уменьшения пропорциональной ему компоненты  $\frac{\alpha}{\cos\alpha}$ . Где  $\alpha$  – угол между  $P_1$  и  $P_2$ .

### **1.3.2 Трижды периодическая поверхность с минимальной энергией (ТППМЭ)**

Встречаются нетрадиционные структуры, которые обладают уникальными свойствами. Это структуры с трехмерной поверхностью минимальной энергии. Они имеют высокую проницаемость, высокие эффективные модули сдвига и сжатия, позволяют однородно распределять напряжения структуры. Рассмотрим более подробно такие структуры.

В данной работе [34] исследовались преимущества пористых структур на основе примитивной ячейки Шварца. Данная ячейка отличается наибольшей проницаемостью среди трижды периодических минимальных поверхностей. Было обнаружено, что проницаемость ТППМЭ сопоставима с проницаемостью губчатых костей, что считается благоприятным для биоинтеграции. Еще одно преимущество структуры Шварца заключается в том, что она демонстрирует более однородное и стабильное распределение напряжений по фон Мизесу.

Результаты испытаний на одноосное сжатие сравнивались с результатами, рассчитанными с использованием моделирования методом конечных элементов. Результаты механических испытаний образцов с пористостью 64% соответствуют свойствам кортикальной кости, с жесткостью 22,3 ГПа и пределом текучести 160 МПа [34].

В статье [33] проводится анализ связи анизотропного упругого поведения каркасов с топологиями ТППМЭ с использованием метода численной гомогенизации и аналитического подхода.

Были исследованы пять широко используемых топологий каркасов ТППМЭ: алмаз, гироид, S-топологиз Фишера-Коха, Шварц П и F-RD (рисунок 10). Размеры ячеек составляли 2,5 мм × 2,5 мм × 2,5 мм. Для твердого каркаса был выбран материал на основе Ti-6Al-4V, который имеет модуль Юнга 110,0 ГПа и коэффициент Пуассона 0,34. Модуль Юнга 1,0 МПа и коэффициент Пуассона 0,45 были определены для «пустотной» области. Было выбрано семь значений пористости каркаса, чтобы максимально перекрыть диапазон пористости и в то же время обеспечить связность структур.

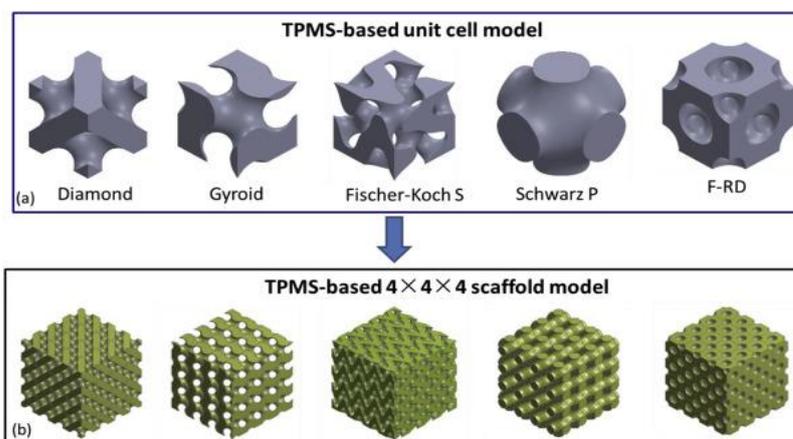


Рисунок 10 – а) пять топологий элементарных ячеек на основе ТППМЭ, проанализированных в настоящем исследовании; (б) соответствующие модели каркасов 4 × 4 × 4 [33]

Анизотропия каркаса измерялась с использованием коэффициента анизотропии Зенера ( $\alpha_r$ ), который является параметром для количественной оценки того, насколько эластичное поведение каркаса отличается от изотропного:

$$\alpha_r = \frac{2C_{44}}{C_{11} - C_{12}}$$

где,  $C_{ij}$  относится к упругим постоянным и подразумевает изотропный материал.  $C_{11}, C_{12}, C_{44}$  – это три независимых константы упругого материала, которые определяются из тензора упругости для топологии каркаса с кубической симметрией. Константа  $C_{44}$  представляет сопротивление деформации сдвига в плоскости (100) в направлении [010], тогда как  $\frac{(C_{11}-C_{12})}{2}$  представляет сопротивление деформации сдвига в плоскости (110) в

направлении [110]. Следовательно, чем больше абсолютная разница между коэффициентом анизотропии Зенера и единицей, тем более анизотропным является материал.

В результате во всех каркасах постоянные  $C_{11}, C_{12}, C_{44}$  увеличивались с увеличением отношения объемов каркасов. Во всех пяти топологиях каркаса квадратичное соотношение оказалось наилучшим для описания связи между тремя ненулевыми независимыми упругими константами (рисунки 11-12).

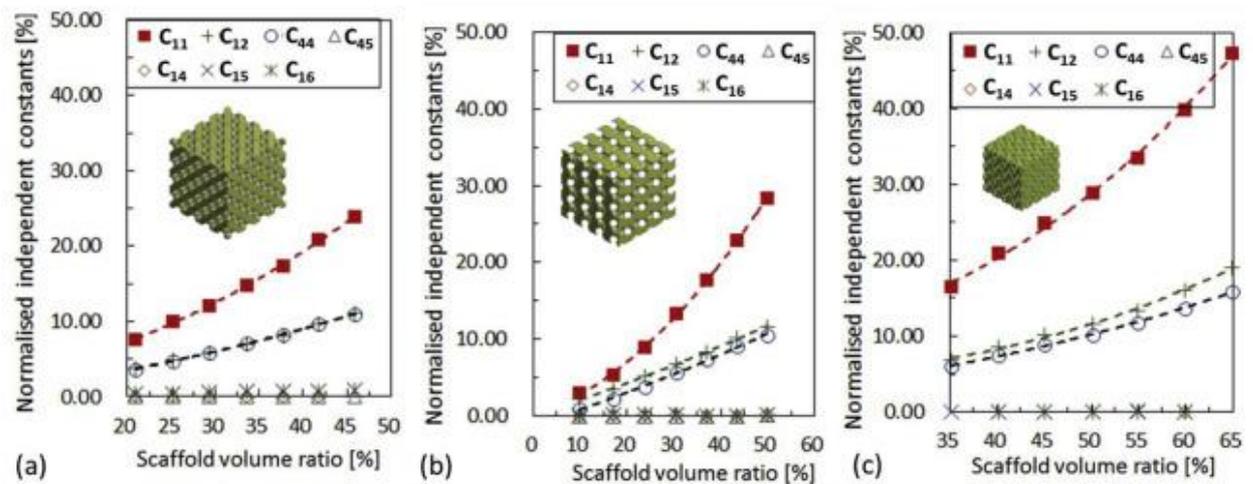


Рисунок 11 – Связь между нормализованными независимыми упругими константами и соотношением объемов каркасов для (а) алмазных, (б) гироидных и (в) каркасов на основе S-топологии Фишера-Коха (точки на рисунке – значения, рассчитанные для различных соотношений объемов) [33]

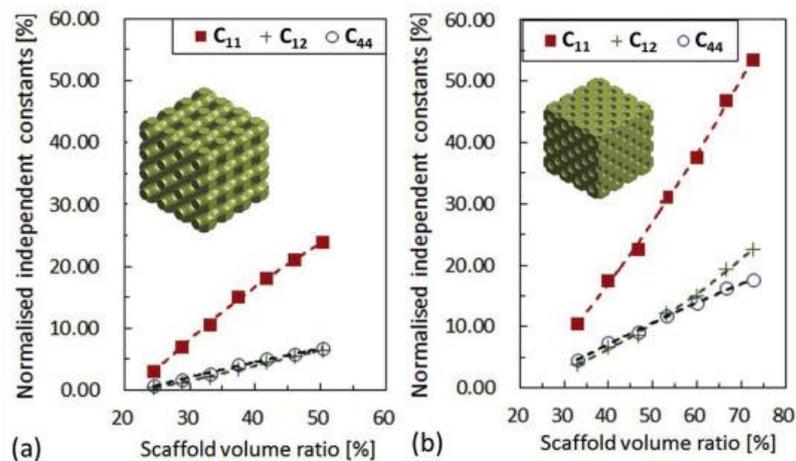


Рисунок 12 – Связь между нормализованными независимыми упругими константами и соотношением объемов каркасов для (а) каркасов Шварц П и (б) каркасов на основе топологии F-RD [33]

Напряженно-деформированное состояние структур также было исследовано. Когда пористость увеличивалась, контур напряжения фон

Мизеса в каркасе на основе гироида изменялся под действием одноосных и сдвигающих нагрузок. В каркасах на основе Шварца П напряжение фон Мизеса перемещалось к концам, когда пористость каркаса увеличивалась. В каркасах на основе S-топологии Фишера-Коха похожие контуры были обнаружены в каркасах с низкой и высокой пористостью при одноосных, сдвиговых и гидростатических нагрузках (рисунок 13).

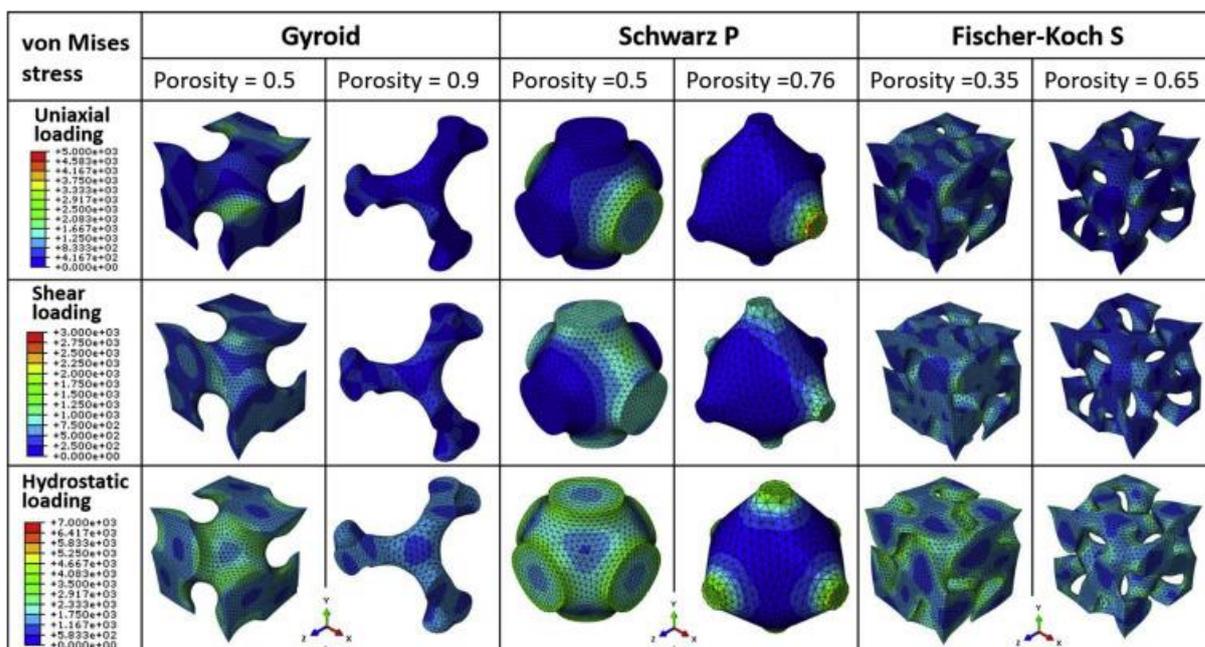


Рисунок 13 – Распределение напряжения по Мизесу для каркасов гироид, Шварц П и S-топологии Фишера-Коха при низкой и высокой пористости при одноосных, сдвиговых и гидростатических нагрузках [33]

Анализ фактора анизотропии Зенера также показал, что анизотропия каркаса на основе гироида больше всего увеличивалась с увеличением пористости каркаса. Причина этого явления в том, что гироидная структура имеет меньшую  $\frac{C_{11}-C_{12}}{2}$  по сравнению с другими каркасами, что указывает на то, что их сопротивление деформации сдвига в плоскости (110) в направлении [110] меньше. В конструкции Шварц П, поскольку жесткие страты выровнены в направлениях, нормальных к поверхностям, и, следовательно, ее сопротивление деформации сдвига в плоскости (100) в направлении [010] слабее, она имеет меньшую  $C_{44}$  чем другие. Следовательно, фактор анизотропии Зенера каркаса Шварц П меньше, чем у других каркасов. Анизотропия каркаса на основе Фишера-Коха S увеличилась в наименьшей

степени и всегда близка к единице, что подразумевает, что упругие свойства каркаса на основе Фишера-Коха всегда близки к изотропии.

В работе [34] были созданы модели пяти ТППМЭ и трех традиционных каркасов размером элементарной ячейки  $2,5 \times 2,5 \times 2,5$  мм (рисунок 14). Один образец был сформирован из  $4 \times 4 \times 4$  элементарных ячеек. Рассчитаны эффективные модули сжатия и сдвига каркасов с использованием моделей элементарной ячейки с периодическим граничным условием.

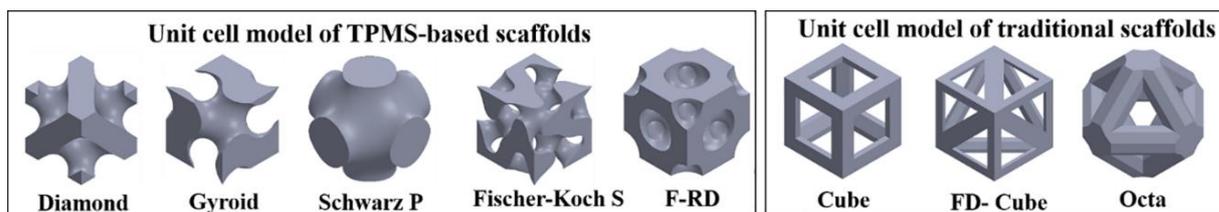


Рисунок 14 – Модели элементарных ячеек пяти основанных на ТППМЭ и трех традиционных каркасов, проанализированных в исследовании [34]

При оценке эффективных модулей упругости в качестве основы был выбран материал Ti-6Al-4V – модуль Юнга 110,0 ГПа, коэффициент Пуассона 0,34. Для пустот эти параметры были определены как 1,0 МПа и 0,45 соответственно. Эффективные модули сжатия ( $E_e$ ) и сдвига ( $G_e$ ) каркаса были рассчитаны на основе тензоров упругости. Чтобы исключить влияние основного материала, эффективные модули сжатия ( $E_e$ ) и сдвига ( $G_e$ ) были нормированы на модули сжатия и сдвига Ti-6Al-4V соответственно. Эффективные модули сжатия ( $E_c$ ) и сдвига ( $G_s$ ) были сформулированы следующим образом:

$$E_c = \frac{E_e}{E_{Ti}}$$

$$G_s = \frac{G_e}{G_{Ti}}$$

где,  $E_e$  и  $G_e$  – эффективные модули сжатия и сдвига каркаса;  $E_{Ti}$  (110,0 ГПа) и  $G_{Ti}$  (41,05 ГПа) – модули упругости и сдвига Ti-6Al-4V.

Были исследованы взаимосвязи между механическими свойствами каркаса и пористостью каркаса, а также между проницаемостью и пористостью каркаса (рисунок 15).

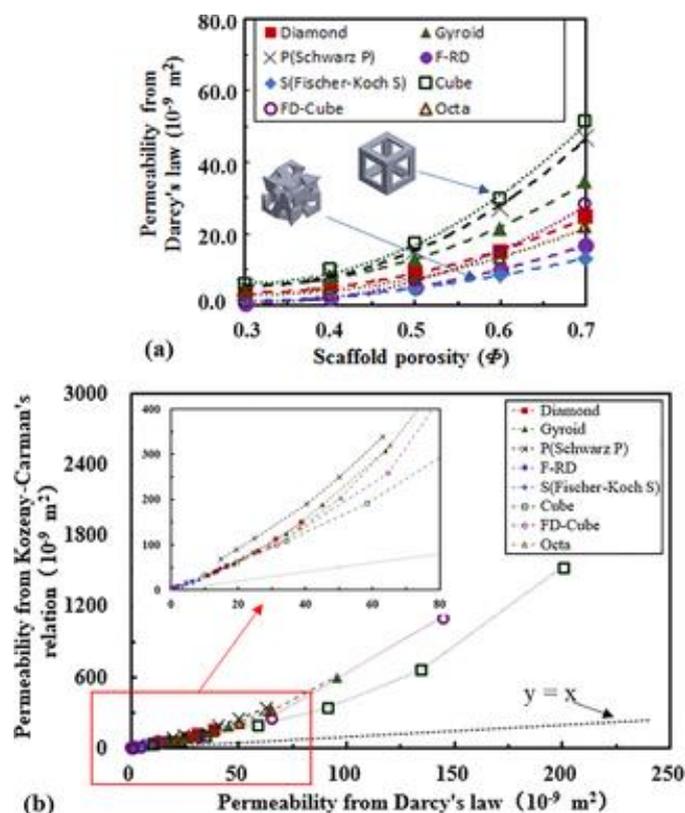


Рисунок 15 – (а) взаимосвязь между проницаемостью каркаса и пористостью и (б) взаимосвязь между проницаемостью [34]

Взаимосвязь между относительным модулем упругости при сжатии и объемной долей каркаса была описана функцией Гибсона и Эшби:

$$E^* = C_1 \rho^n + E_0$$

где  $\rho$  – относительная объемная доля каркаса,  $E_0$  – сдвиг модуля упругости,  $C_1$  и  $n$  – постоянные материала. Значения  $C_1$ ,  $n$  и  $E_0$  были получены путем подгонки уравнения Гибсона-Эшби к кривой зависимости модуля упругости каркаса и объемной доли (Таблица 1).

Таблица 11 – Сравнение эффективных модулей сжатия каркасов на основе ТППМЭ, предсказанных на основе анализа методом конечных элементов, с данными экспериментальных испытаний [34]

Тип сетчатой структуры	$C_1$	$n$	$E_0$
Алмаз	0.743	2.081	0.0021
Гироид	0.919	2.131	-0.0011
Шварц П	0.950	0.863	-0.2193
F-RD	0.955	1.920	-0.0472
Фишера-Коха S	0.918	2.322	0.0242

Механический анализ показал, что структуры, в которых преобладает деформация изгиба (алмаз, гироид, Шварц П), имеют более высокие эффективные модули сдвига. Структуры с преобладанием деформации растяжения (Шварц П) имеют высокие эффективные модули сжатия.

## **1.4 Механические свойства металлических конструкций**

### **1.4.1 Усталостные свойства сетчатых конструкций, полученных методами аддитивных технологий**

Испытания на усталостные свойства играют важную роль в исследовании физико-механических характеристик металлических структур. Проведение испытаний на усталость позволяет выбрать оптимальную топологию и получить необходимые эксплуатационные свойства изделия. Усталостные испытания – это испытания, при которых определяют количественные характеристики сопротивления усталости. Усталость материала – процесс постепенного накопления повреждений под воздействием переменных напряжений, приводящий к изменению свойств, образованию трещин, их развитию и разрушению. Усталость материала вызывает циклическое нагружение, применяемое с определенной частотой. Разрушение в процессе усталостного испытания происходит зачастую гораздо ниже статических пределов прочности.

Усталостные испытания могут быть:

1) Многоцикловыми (число циклов более  $5 * 10^4$ ). При испытаниях на многоцикловую усталость материал деформируется упруго. Его свойства описываются законом Гука. Большинство материалов имеют сложную многокомпонентную структуру – зерна, поры, межзеренные прослойки, неметаллические включения в стали. При упругом деформировании в отдельных слабых зернах, вблизи дефектов происходит локальное знакопеременное пластическое деформирование, которое называют микропластическим. Его многократное повторение приводит к зарождению

микроскопических трещин. Постепенное их развитие и слияние в магистральную трещину приводит к внезапному разлому деталей.

2) Малоцикловыми (число циклов менее  $5 \cdot 10^4$ ) возникает при максимальных напряжениях, превышающих предел текучести материала, и сопровождается знакопеременным пластическим деформированием объема материала. Число циклов до образования трещины зависит в основном от величины пластической деформации детали в каждом цикле и от способности материала сопротивляться малоцикловому разрушению.

На рисунке 30 показана лабораторная установка для усталостных испытаний, которые проводят в соответствии с ГОСТ 25.502-79 и ISO 7206-4. Испытания проходят непрерывно до образования трещины заданного размера, полного разрушения или до базового числа циклов.

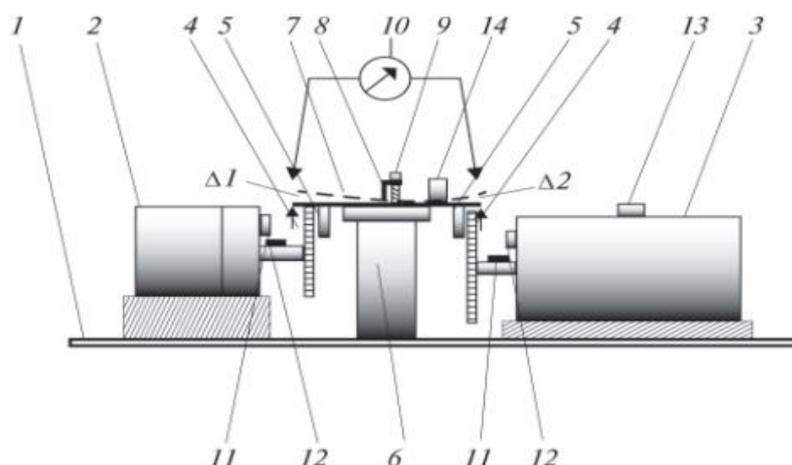


Рисунок 30 – Схема лабораторной установки для испытаний образцов на усталость. 1 – станина; 2 – двигатель с редуктором с низкой частотой вращения вала; 3 – двигатель с высокой частотой вращения; 4 – диски; 5 – подшипники качения; 6 – основание; 7 – образец; 8 – пластина; 9 – болты; 10 – индикатор прогиба; 11 – постоянные магниты; 12 – герконы; 13 – счетчик оборотов; 14 – преобразователь Баркгаузена [42]

Сначала проводят испытания на разрыв и на сжатие. Первый образец нагружают до наибольших возможных напряжений. Это нужно для определения наименьшего значения циклической долговечности. Каждый

следующий образец нагружают до меньшего напряжения. Циклическая долговечность при этом увеличивается. Далее строят график усталости.

При испытаниях на усталость определяют следующие характеристики:

1. Кривая усталости – это график зависимости напряжений, при котором происходит разрушение материала при данном числе циклов нагружения, от числа этих циклов. Кривая усталости, является результатом проведения испытания.

2. Предел выносливости – это одна из прочностных характеристик материала, характеризующих его выносливость, то есть способность воспринимать нагрузки, вызывающие циклические напряжения в материале.

3. Эксплуатационная прочность описывает способность материалов и готовых изделий без ущерба выдерживать циклические нагружения в рамках рассчитанного срока службы и с учетом существенных окружающих условий.

4. Усталостная прочность – это свойство материала не разрушаться с течением времени под действием изменяющихся рабочих нагрузок.

Результаты испытаний часто представляют в виде диаграмм напряжения/циклов. По результатам испытаний на усталость проводят:

1. Построение кривой усталости и определение предела выносливости;

2. Построение диаграмм предельных напряжений и предельных амплитуд;

3. Построение кривой усталости в малоцикловой области;

4. Построение диаграмм упругопластического деформирования и определение их параметров;

5. Построение кривых усталости по параметру вероятности разрушения: определение предела выносливости для заданного уровня вероятности разрушения;

6. Определение среднего значения и среднеквадратического отклонения логарифма долговечности на заданном уровне напряжений или деформаций;

7. Определение среднего значения и среднеквадратического отклонения предела выносливости.

Сначала проводят испытания на разрыв и на сжатие. Первый образец нагружают до наибольших возможных напряжений. Это нужно для того, чтобы определить наименьшее значение циклической долговечности. Каждый следующий образец нагружают до меньшего напряжения. Циклическая долговечность при этом увеличивается. Далее строят график усталости.

Наиболее часто для исследований используют сервогидравлические испытательные машины. Рассмотрим принцип работы на примере машины Biss Nano (рисунок 17).



Рисунок 17 – Лабораторная установка Biss Nano [35]

Установка имеет максимальную динамическую нагрузку 25 кН. Позволяет проводить статические испытания, испытания на многоцикловую и малоцикловую усталость компактных образцов металлов и композиционных материалов со знакопеременным нагружением.

#### **1.4.2 Испытания на усталостные свойства титановых образцов, полученных электронно-лучевым плавлением с топологией ТППМЭ**

В работе [36] исследуется влияние топологии на механические свойства пористых структур из титанового сплава (Ti-6Al-4V ELI). Пористость образцов варьировалась за счет изменения размера ячейки и

толщины страта. Толщина страта варьировалась для получения структуры с пористостью губчатой кости от 50 до 90%.

Испытания на сжатие проводились на образцах  $12 \times 12 \times 12$  мм. Влияние гироидной структуры на механические характеристики образцов оценивали, варьируя размер ячейки ( $4 \times 4 \times 4$  мм или  $6 \times 6 \times 6$  мм), толщину страта (0,25, 0,5 или 1,0 мм) и выполняли испытания на сжатие и растяжение (рисунок 18).

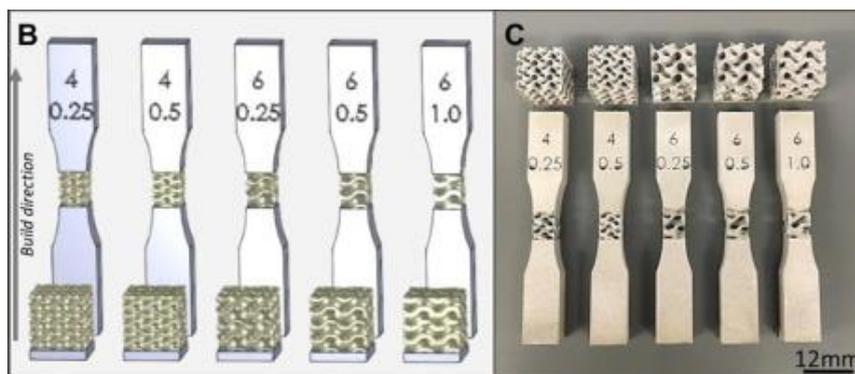


Рисунок 18 – а) Смоделированные образцы на сжатие и растяжение с гироидной структурой различной пористости, определяемой размерами элементарной ячейки ( $4 \times 4 \times 4$  или  $6 \times 6 \times 6$ ) и толщиной стенки (0,25, 0,50 или 1,0 мм). б) Образцы гироида Ti-6Al-4V на сжатие и растяжение [36]

Пористые структуры демонстрировали деформационное поведение с преобладанием растяжения при нагрузке на сжатие и растяжение, а также жесткость и прочность, зависящие от пористости.

При использовании стандартных параметров лазера внутри стенок структуры гироидов наблюдались дефекты, которые могли провоцировать появление трещин. В исследовании использовалась стандартная плотность энергии лазера, которая составляла  $29,8 \text{ Дж/мм}^3$ . Далее авторы работы решили уточнить этот параметр и пришли к выводу, что значение плотности энергии лазера, равное  $96,7 \text{ Дж/мм}^3$  является оптимальным для уменьшения пористости образцов. Проведение измерений при уточненном параметре плотности энергии лазера привело к увеличению усталостных характеристик при сжатии и растяжении, особенно для более толстостенных гироидных структур, в то время как более тонкие стенки не показали значительных изменений.

В работе [37] изучили усталостные свойства ТППМЭ структуры гироидного типа. Проводились статические испытания на сжатие, многоцикловые усталостные испытания на сжатие. Сравнивались характеристики образцов, подвергнутых пескоструйной обработке. Гироидная структура имеет относительную плотность 15% и размер элементарной ячейки 4 мм. Размер образца 20×20×20 мм. Изготавливали структуры из стали 316L. Для анализа распределения напряжений на поверхности структуры был применен метод конечных элементов. К верхней поверхности сетчатой модели было применено смещение, равное 0,1 мм. Максимальная деформация составила 1,25%, что находится в пределах упругой стадии (рисунок 19).

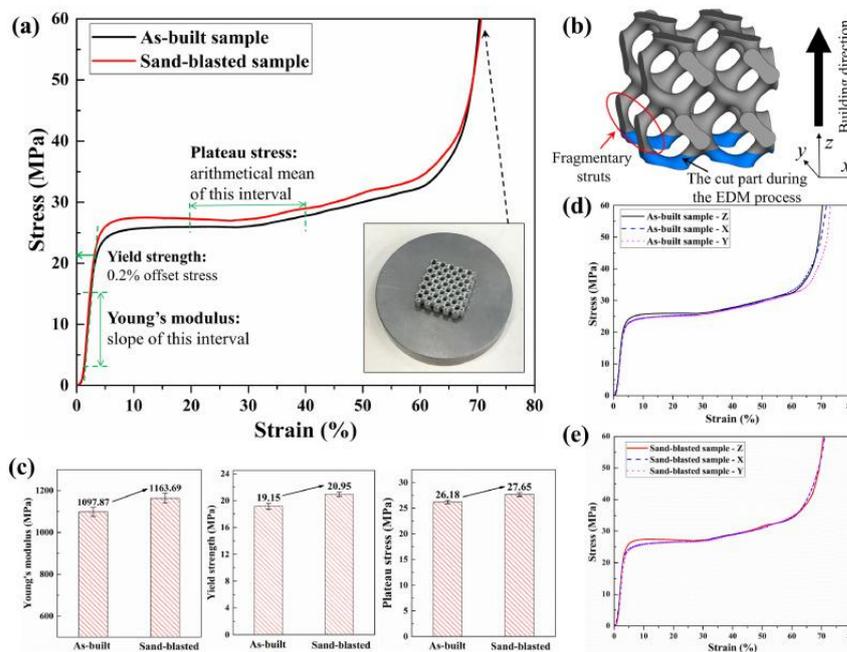


Рисунок 19 – Кривые деформация – напряжение механических свойств образцов гироидных клеточных структур в исходном состоянии и после пескоструйной обработки [37]

При испытаниях на усталостные свойства получили кривые деформации в зависимости от количества циклов (рисунок 20). Существует три классических стадии накопления деформации, а именно периоды первичного увеличения деформации ( $N < 100$ ), стадия постоянного плато в широком диапазоне циклов и стадия быстрого накопления деформации.

Однако не у всех экземпляров четко наблюдаются три стадии. При нагрузке с низким напряжением образец не испытал разрушения. Для

нагрузки с большим напряжением стадия постоянного плато четко не показана на рисунках, так как нагрузка близка к пределу текучести. Между стадиями постоянного плато и быстрого накопления деформации есть точка резкого скачка деформации ( $N_c$ ). Кривые показывают, что для структур, подвергнутых пескоструйной очистке, значения  $N_c$  увеличиваются по мере уменьшения напряжения нагрузки. Это происходит за счет удаления прилипших частиц порошка, уменьшения остаточного напряжения на поверхности и образования нанокристаллической зоны.

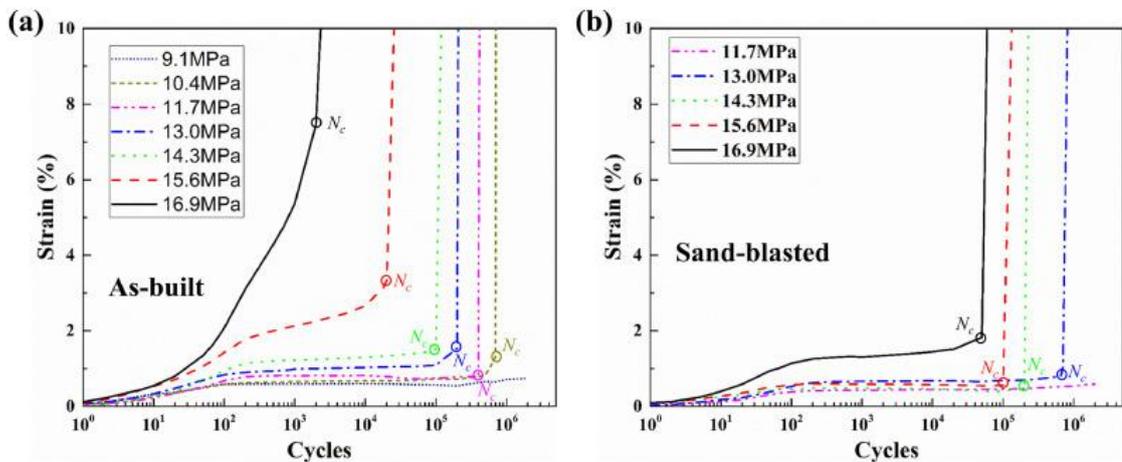


Рисунок 20 – Накопленные деформации, изменяющиеся в зависимости от количества циклов и напряжений гироидных клеточных структур до и после пескоструйной обработки [37]

На рисунках 21 и 22 представлено распределение главного напряжения на поверхности образца при монотонной сжимающей нагрузке.

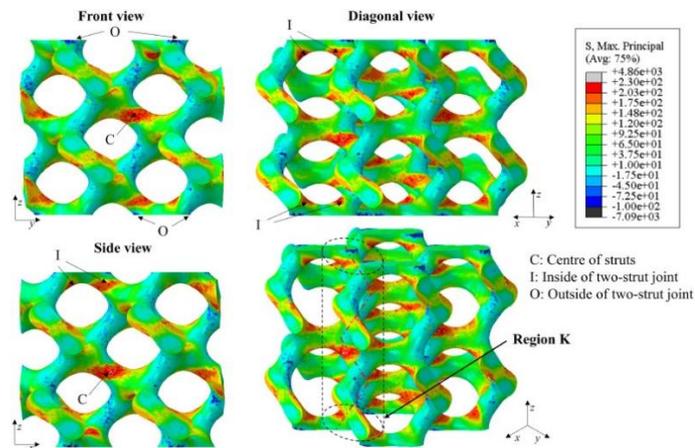


Рисунок 21 – Распределение напряжения на поверхностях деформируемого образца [37]

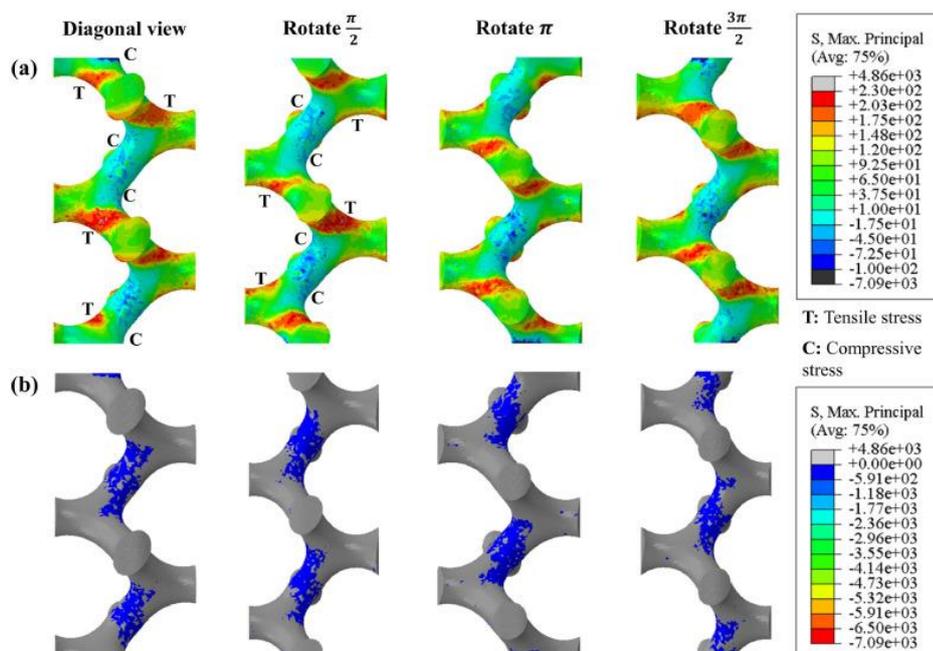


Рисунок 22 – (а) Распределение максимального главного напряжения с растягивающим и сжимающим напряжением и (б) Распределение максимального главного напряжения только с сжимающим напряжением [37]

Результаты показывают, что сильное напряжение концентрируется внутри между двумя стратами (область I), а также в центрах наклонных страт (область C), тогда как наименьшее напряжение с отрицательным значением находится снаружи между двумя стратами (область O). При циклической сжимающей нагрузке во время испытания на усталость области I и C испытывают серьезные растягивающие напряжения, которые приводят к зарождению и росту трещин.

В работе [38] изучают усталостные свойства титановых сетчатых структур на основе элементарных ячеек типа тетраэдра и октаэдра и размером пор 500 мкм и 1000 мкм (рисунок 23). Все элементарные ячейки имели страты размером 400 мкм. Пористость различных элементарных ячеек составила 67,00% в T500, 84,03% в T1000, 62,87% в O500 и 77,01% в O1000. В каркасе ячейка была повторена 18 раз, 9 раз, 12 раз и 8 раз в вертикальном направлении и 9 раз, 5 раз, 10 раз и 6 раз в горизонтальных направлениях T500, T1000, O500 и O1000.

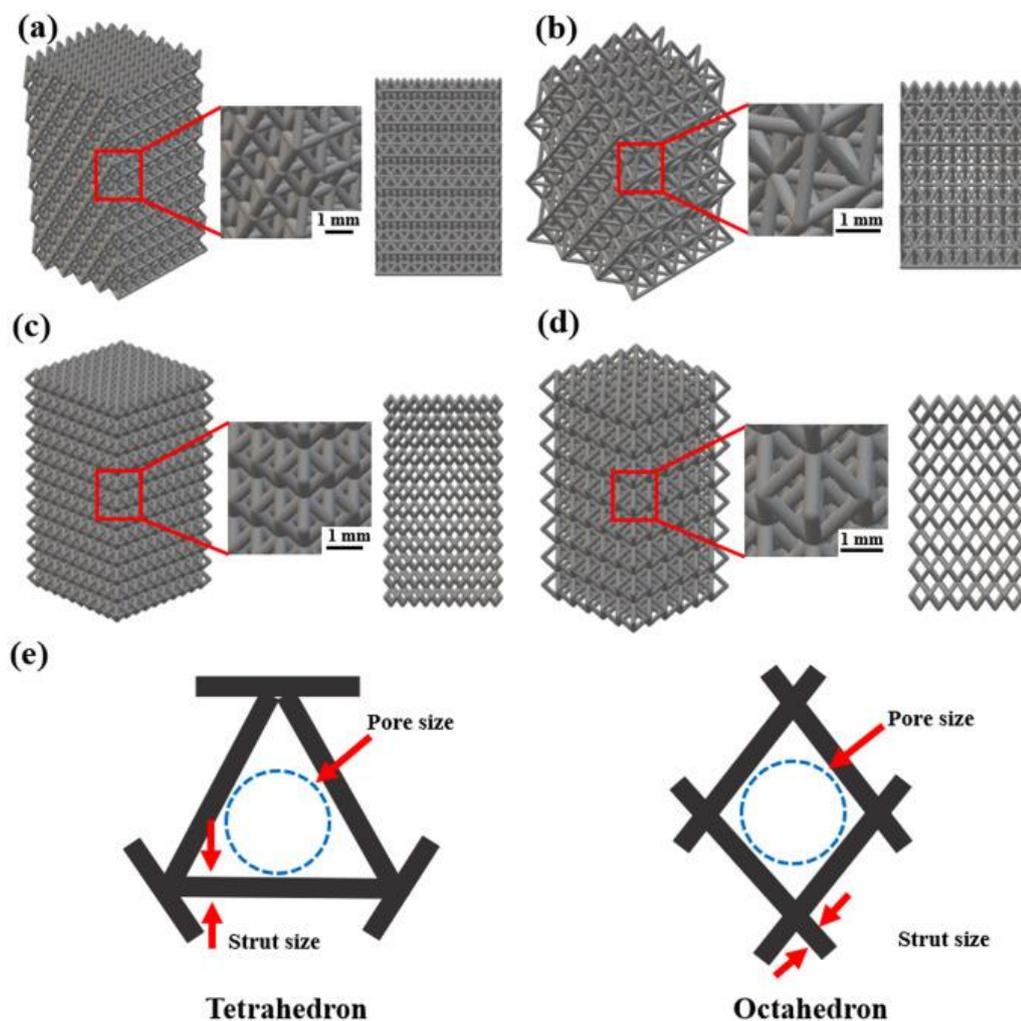


Рисунок 23 – 3D вид и вид сбоку пористых матриц модели., (А) T500, (Б) T1000, (С) O500, (Д) O1000 (Е) 2D вид пор и страт [38]

Структуры были изготовлены с помощью метода СЛП. Параметры обработки: лазер мощностью 240 Вт, штриховки шагом 0,07 мм, скорость сканирования  $1000 \text{ мм} \times \text{с}^{-1}$ , толщина слоя 30 мкм. Когда изготовление было завершено, все каркасы были очищены ультразвуком с использованием ацетона. Плотность массивного чистого титана была измерена как  $4,48 \text{ г/см}^3$  с помощью метода Архимеда.

Усталостные свойства оценивали на гидравлической испытательной раме с датчиком нагрузки 100 кН. Использовались постоянная частота нагружения (10 Гц) и постоянное соотношение нагрузок  $R=0,19$ . Когда образцы теряли 90% своей первоначальной жесткости, считалось, что они вышли из строя (рисунок 24).

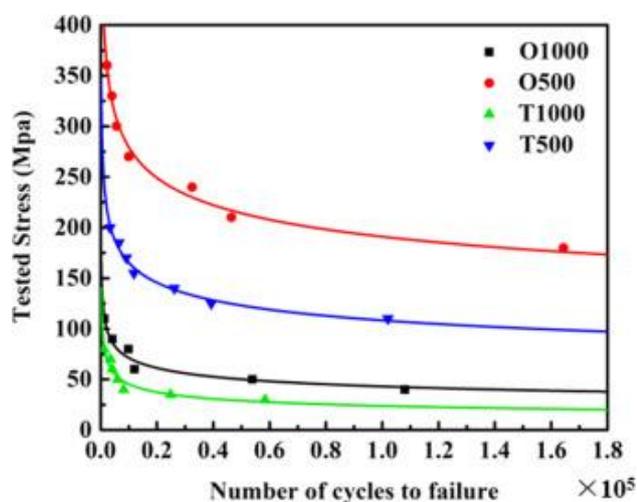


Рисунок 24 – Динамические механические свойства титановых каркасов, обработанных СЛП: кривые, полученные в результате испытаний на усталость при сжатии [38]

Максимальное количество циклов нагружения составляло около  $1,65 \times 10^5$  для октаэдров,  $1,0 \times 10^5$  для тетраэдров. Результаты показали, что усталостное поведение пористых каркасов сильно зависит от геометрии пор. Пористые каркасы с ячейкой октаэдра демонстрируют лучшие усталостные свойства по сравнению с каркасами с ячейкой тетраэдра.

Поверхность излома наблюдали с помощью сканирующего электронного микроскопа. Трещины излома росли нормально под действием сжимающих усилий. Закрытые поры свидетельствуют о снижении усталостной долговечности. Кроме того, внутренние поры и страты с порошковой адгезией могут вызывать концентрацию напряжений и снижать сопротивление этих каркасов. Шероховатость поверхности влияет на возникновение трещин, поскольку остроугольные частицы могут резко повысить концентрацию напряжений (рисунок 25).

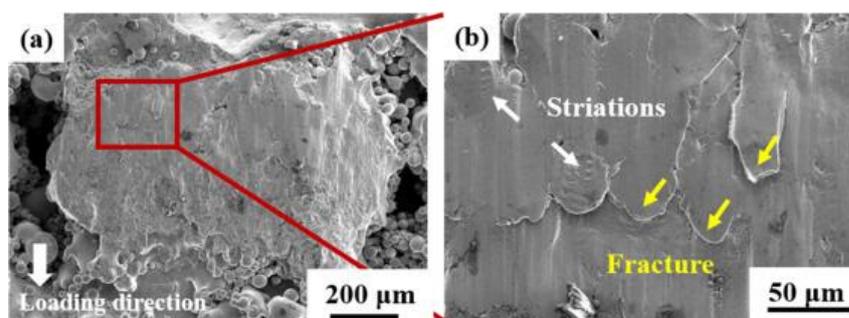


Рисунок 25 – Поверхность излома после разрушения [38]

Структуры (гиرويد, октаэдр, тетраэдр), методы получения, величина усталостной прочности, пористость и количество циклов были представлены в таблице 2. Стоит отметить, что параметры усталостной прочности разные. Это объясняется различной толщиной стратов, пористостью, параметрами получения структур, в частности, мощности лазера. Все это оказывает влияния на усталостные свойства. Несмотря на одинаковую пористость структур, свойства материала отличаются, а именно микроструктура и шероховатость, поскольку использовались разные режимы для получения.

Таблица 2 – Параметры усталостной прочности для различных структур [23]

Тип структуры	Метод	Пористость	Количество циклов	Усталостная прочность (МПа)
Гиرويد после пескоструйной обработки [39]	СЛП	85%	$2 * 10^6$	11,7
Гиرويد [39]	СЛП	85%	$2 * 10^6$	9,1
Октаэдр 500 [40]	СЛП	62.87%	$10^6$	130,6
Октаэдр 1000 [40]	СЛП	77.01%	$10^6$	26,00
Тетраэдр 500 [40]	СЛП	67.00%	$10^6$	70.90
Тетраэдр 1000 [40]	СЛП	84.03%	$10^6$	12,50
Гиرويد [38]	СЛП	78%	$10^6$	14,0
Гиرويد [38]	СЛП	61%	$10^6$	32,6
Гиرويد [38]	СЛП	85%	$10^6$	5,3
Гиرويد [38]	СЛП	75%	$10^6$	15,0
Гиرويد [38]	СЛП	55%	$10^6$	31,1
Гиرويد [38]	СЛП	87%	$10^6$	5,3
Гиرويد [38]	СЛП	49%	$10^6$	43,8

В результате литературного анализа на тему исследование влияния топологии и материала на физико-механические характеристики металлических структур, изготовленных аддитивным способом, был изучен ряд научных статей, выделен ряд проблем данной области исследования, описаны основные идеи публикаций, которые помогают решить существующие проблемы. Также после изучения каждого аспекта, влияющего

на создание и использование металлических структур, можно сделать несколько выводов по каждому из них:

1) Материал сетчатых/ячеистых структур имеет большое влияние на практичность использования медицинского импланта. Основными критериями для выбора материала являются следующие условия: биосовместимость, механические характеристики, близкие к механическим характеристикам костной ткани, простота печати и обработки.

2) В работе были рассмотрены два метода получения металлических структур: селективное лазерное спекание и электронное лучевое плавление. Каждый метод имеет свои достоинства и недостатки. Было приведено сравнение этих методов в обзоре. Оба метода позволяют получать необходимые параметры металлических структур в широком диапазоне. Основным вектором развития аддитивных методов изготовления пористых металлических структур направлен в сторону метода электронно-лучевого плавления. В исследованиях приведены параметры, которые позволяют в процессе печати структуры воспроизвести наиболее точную версию виртуальной модели импланта.

3) Топология металлической структуры в значительной степени может определять свойства импланта. Например, структура Шварца демонстрирует более однородное и стабильное распределение напряжений по фон Мизесу, а алмазная и ОЦК-сетки с регулярной пористостью демонстрируют хрупкое деформационное поведение. Традиционными типами ячеек считаются ячейка ОЦК, алмазная ячейка, ячейка Шварца и кубическая ячейка. Гироидная структура имеет наиболее близкие механические свойства и усталостные характеристики с трабекулярной и кортикальной костями [34].

4) Рассмотренные структуры с топологией трижды периодической поверхностью минимальной энергии обладают следующими достоинствами: высокая проницаемость, высокие эффективные модули сдвига и сжатия, однородное распределение напряжений структуры.

5) Приведены основы метода тестирования усталостных свойств. В исследованиях приведены результаты тестирования образцов с различными параметрами ячеек, структурами, материалами и пористостью. Каждый из приведенных параметров влияет на усталостные свойства структуры.

## **Глава 2. Материалы и методика эксперимента**

### **2.1 Изготовление сетчатых структур из сплава Ti-6Al-4V**

Сетчатые структуры были изготовлены из сплава Ti-6Al-4V методом электронно-лучевого плавления на установке ARCAM A2 EBM (Möln dal, Швеция). Ячейки сетки имеют гироидную структуру (рисунок 26).



Рисунок 26 – Изображение образца из сплава Ti-6Al-4V .

В программе Wolfram Mathematica 12 была построена гироидная структура с заданной толщиной стенки. Структура была сконструирована путем повторения элементарных ячеек гироид. Для построения была использована формула гироида:

$$\cos(x)\sin(y)+\cos(y)\sin(z)+\cos(z)\sin(x)=0,$$

Для подготовки файла к печати использовалась программа SolidWorks.

Процесс изготовления образца заключается в следующем: в установку загружается порошок, далее производится откачка для получения вакуума порядка  $10^{-4}$  Па, после осуществляется плавление. При получении образцов использовались параметры: температура подложки  $740^{\circ}\text{C}$ , толщина слоя порошка 50 мкм. Ускоряющее напряжение 60 кВ, сила тока 8 мА. Размер порошка варьировался от 50 до 150 мкм.

Для удаления прилипших частиц, образцы были подвергнуты постобработке, которая проводилась с использованием системы повторного использования порошка ARCAM. Аналогично пескоструйной обработке, этот метод может сдуть слегка приставшие металлические частицы с поверхностей.

## 2.2 Определение пористости образца

Для определения макропористости ячеистой структуры использовался объемно-весовой метод исследования. Метод основан на вычислении плотности ячеистой структуры  $\rho$  путем взвешивания образца на весах и определения его объема.

$$\rho = \frac{m}{V},$$

где  $m$  – масса образца,  $V$  – объем образца.

Пористость рассчитывается в соответствии с формулой:

$$P = \left(1 - \frac{\rho}{\rho_0}\right),$$

где  $\rho$  – плотность образца,  $\rho_0$  — плотность материала.

Для сплава титана Ti-6Al-4V плотность материала равна:

$$\rho_0(Ti6Al4V) = 4.42 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$$

## 2.3 Исследование морфологии образца

Для анализа поверхности образца был использован сканирующий электронный микроскоп (СЭМ). Принцип работы основан на использовании эффектов, возникающих при облучении поверхности образца электронным пучком. В результате взаимодействия электронов с веществом генерируются сигналы, которые используются для формирования изображения поверхности образца. В сканирующем электронном микроскопе анализируются сигналы вторичных, отраженных и поглощённых электронов.

Схема микроскопа представлена на рисунке 27.

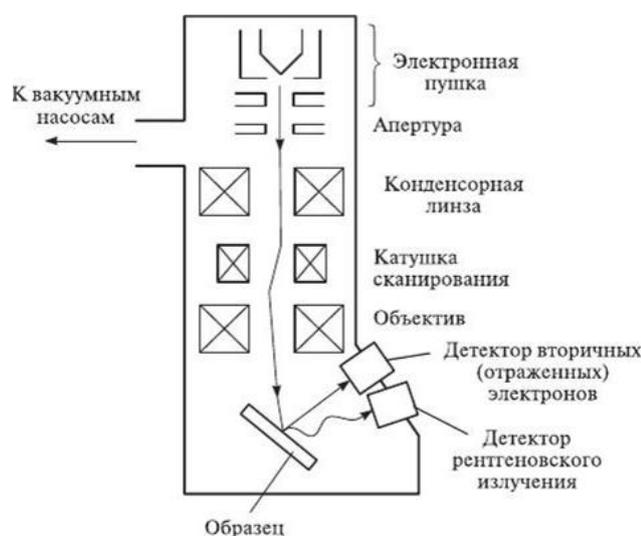


Рисунок 27 – Схема сканирующего электронного микроскопа [39].

Электронная пушка создает пучок электронов с энергией от  $E_0 = 0,1$  до 30 кэВ. Под воздействием напряжения между катодом и анодом электроны ускоряются. Электроны проходят апертуры – металлические пластины с отверстиями, которые служат для отбора электронов, отклоняющихся от оптической оси на выбранный угол. Потом пучок фокусируют конденсорные линзы. Отклоняющая система обеспечивает сканирование электронного луча, а объективная линза увеличивает изображение предмета. Детекторы получают сигналы от вторичных электронов, отраженных электронов и рентгеновского излучения.

Исследование морфологии поверхности проводилось с помощью Quanta 200 3D, FEI (рисунок 28).



Рисунок 28 – Сканирующий электронный микроскоп Quanta 200 3D, FEI

[40]

Микроскоп имеет диапазон ускоряющего напряжения от 200 до 30000 В, а также разрешение 3,5 нм.

## 2.4 Методика испытаний на растяжение

Квазистатические испытания на растяжение осуществляются на специальных разрывных или универсальных машинах. Для проведения испытания сначала определяются начальные размеры исследуемого образца. Далее образец фиксируется на держателях. Образец, закрепленный в захватах машины, подвергается принудительному удлинению путем перемещения одного из захватов. Растягивающая сила создается испытательными машинами механическим или гидравлическим приводом. Скорость перемещения захватов должна быть постоянной, не более 20 мм/мин. В этом случае нагружение можно считать статическим.

В процессе испытания диаграммный аппарат, установленный на испытательной машине, создает машинную диаграмму растяжения – это график зависимости удлинения образца  $\Delta l$  от растягивающей силы  $F$ . Чтобы диаграмма растяжения характеризовала механические свойства материала, а не конкретного образца, ее перестраивают, переходя к величинам  $\sigma$  (механическое напряжение) и  $\varepsilon$  (относительное удлинение). На такой диаграмме растяжения можно определить следующие механические характеристики материала:

1) Модуль Юнга – величина, которая характеризует упругие свойства материала, равная нормальному напряжению, при котором относительное удлинение было бы равно единице.

2) Предел упругости – максимальное механическое напряжение, при котором выполняется закон Гука, то есть деформация тела прямо пропорциональна приложенной силе.

3) Предел текучести – механическая характеристика материала, характеризующая напряжение, при котором деформации продолжают расти без увеличения нагрузки.

4) Предел прочности — механическая характеристика материала, указывающая величину механических напряжений, соответствующую максимальному значению нагрузки при испытаниях на растяжение.

После проведения испытаний могут быть определены еще две характеристики, которые являются мерой пластичности материала:

1) Остаточная продольная деформация при разрыве – это отношение остаточного удлинения образца к его первоначальной длине.

2) Остаточное сужение образца после разрыва – это отношение изменения площади поперечного сечения образца в месте разрыва к первоначальной площади.

Испытания на статическое растяжение в данной работе проводились на установке Instron 3369 (рисунок 29).



Рисунок 29 – Универсальная электромеханическая испытательная машина Instron 3369 [41]

Исследование выполнялось по стандарту ISO 13314:2011. Скорость деформации образцов равнялась 0,5 мм/мин. Максимальная нагрузка составляет 50 кН.

### **2.3 Методика проведения испытаний на сжатие**

Квазистатические испытания на сжатие в данной работе также проводились на установке Instron 3369. Испытания осуществляются по ГОСТ

25.503 с целью определения механических характеристик: предела текучести и предела прочности при сжатии. При испытании образец стандартной формы и размеров размещается между нажимными плитами приспособления, центрируется. Далее подвергается непрерывному, плавному деформированию до заданного значения деформации или до разрушения. При этом регистрируется зависимость между сжимающей силой  $F$  и изменением высоты  $h$  образца в виде диаграммы сжатия образца. Диаграмма сжатия позволяет оценить поведение материала в упругой и упругопластической стадиях деформирования и определить механические свойства материала.

Испытания на сжатие, в отличие от испытаний на растяжение, имеют ряд особенностей:

- 1) Образцы, изготовленные из пластичных материалов, не разрушаются, при этом получая большую деформацию;
- 2) На результаты испытания существенно влияет отношение высоты образца к его диаметру;
- 3) На результаты испытания также влияют силы трения на опорных торцах образца, образец становится бочкообразным. Напряженное состояние в таком образце не одноосное и неоднородное.

Диаграмму сжатия материала получают тем же способом, что и диаграмму растяжения. Методика определения механических характеристик материала, таких как предел упругости и предел текучести, соответствует методике определения этих характеристик при испытании на растяжение.

## **2.4 Методика проведения усталостных испытаний**

Циклические испытания в данной работе проводились на сервогидравлической машине Biss Nano при комнатной температуре. Испытания на усталость заключались в циклическом растяжении и сжатии с регулируемым усилием до значения отказа или по достижении  $10^7$  циклов. Для всех испытаний частота нагрузки была постоянной и составляла 15 Гц, а коэффициент асимметрии цикла  $R$  был равен 0,1. Для каждого цикла

максимальное напряжение  $\sigma_{\max}$ , задавалось как часть соответствующего значения предела текучести  $\sigma_y$ . Испытания проводились при напряжениях  $1,2\sigma_y$ ,  $1,0\sigma_y$ ,  $0,8\sigma_y$ ,  $0,6\sigma_y$  и  $0,4\sigma_y$ . Таким образом, циклические испытания проводились как в режиме многоциклового усталости, так и в режиме малоциклового усталости. Внешний вид образцов приведён на рисунке 31.



Рисунок 31 – Внешний вид ТППМЭ образца из титанового сплава Ti-6Al-4V для статических и циклических испытаний

### **Глава 3. Экспериментальная часть**

#### **3.1 Исследование пористости образца**

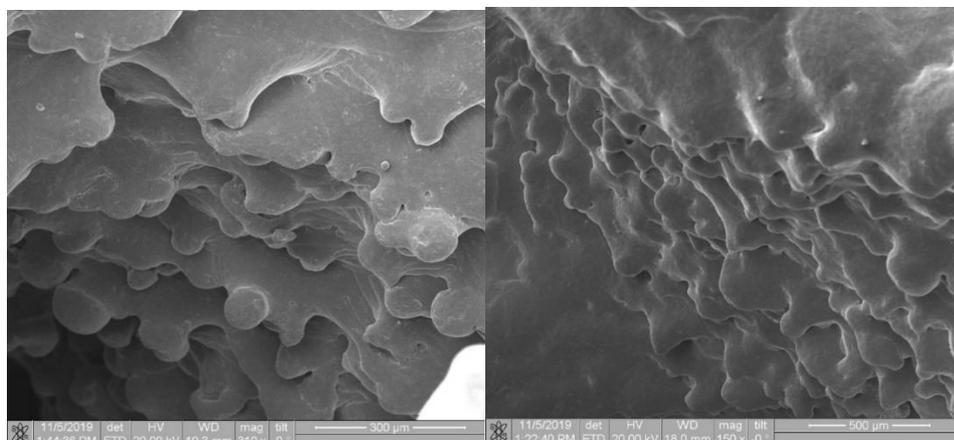
Пористость образца была исследована с помощью объемно-весового метода исследования. Взвешивание образца проводилось 10 раз. Среднее значение массы образца составило  $3,37 \pm 0,03$  г. Объем пористой структуры составил  $3,375 \text{ см}^3$  при длине ребра куба 15 мм. Плотность пористой структуры составила  $0,9979 \text{ г/см}^3$ . Пористость образца равна 77,5%.

Пористость данной сетчатой структуры находится в оптимальном диапазоне пористости от 60% до 90% [1,2], который позволяет получить модуль Юнга близкий к модулю упругости кортикальной и трабекулярной кости, что снижает вероятность возникновения эффекта экранирования напряжений.

#### **3.2 Исследование морфологии поверхности**

Микроструктура образцов была охарактеризована с помощью СЭМ. На рисунках 32-33 представлены изображения поверхности титановых скэффолдов Ti-6Al-4V, полученных методом электронно-лучевого плавления. Поверхность развитая, что характерно для образцов, полученных с помощью аддитивных технологий. Развитость поверхности влияет положительно на

пролиферацию клеток костной ткани. На поверхности видны впадины между частицами порошка округлой формы, создающие неровности на поверхности стенок. Не обнаружены области необработанного порошка, образующиеся между слоями из-за отсутствия сплавления между ними.



Рисунки 32, 33 – СЭМ изображения поверхности образца, изготовленного из титанового сплава марки Ti-6Al-4V методом электронно-лучевого плавления.

На рисунке 34 изображены стенки пористой структуры с топологией гирийд.

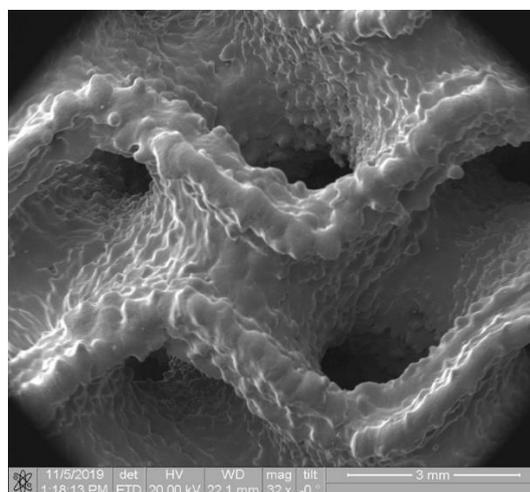


Рисунок 34 – СЭМ изображения поверхности образца, изготовленного из титанового сплава марки Ti-6Al-4V методом электронно-лучевого плавления

Толщина стенок структуры равномерная, отсутствуют трещины и отдельные. Отсутствуют нерасплавленные частицы порошка, которые при попадании в биологические системы могут вызвать воспаление. В структуре

есть полые каналы. В результате измерения с учетом масштаба было определено среднее значение ширины стенки, равное  $0,38 \pm 0,04$  мм. Также найдено среднее значение расстояния между стенками, равное  $2,3 \pm 0,7$  мм.

Для модели, спроектированной для металлической печати, было задано значение толщины стенки 0,2 мм. Это значение оказалось меньшим, чем рассчитанная ширина стенки по микрофотографии. Данный результат свидетельствует о низком уровне точности изготовления титановых пористых структур ячейкой гироид ЭЛП методом. Различие экспериментальной и расчетной пористости может быть связано с увеличением бассейна расплава там, где вектор сканирования делает разворот на конце стойки, в результате чего стойки становятся толще. Подобные неточности могут повлечь за собой смыкание пор, утолщение страт, что может нарушить врастание кости и повлиять на механические характеристики структуры.

### 3.3 Определение механических свойств при испытаниях на растяжение

Были проведены испытания на квазистатическое одноосное растяжение. Кривая «напряжение-деформация» и соответствующие механические свойства ТППМЭ образцов из сплава Ti-6Al-4V представлены на рисунке 35.

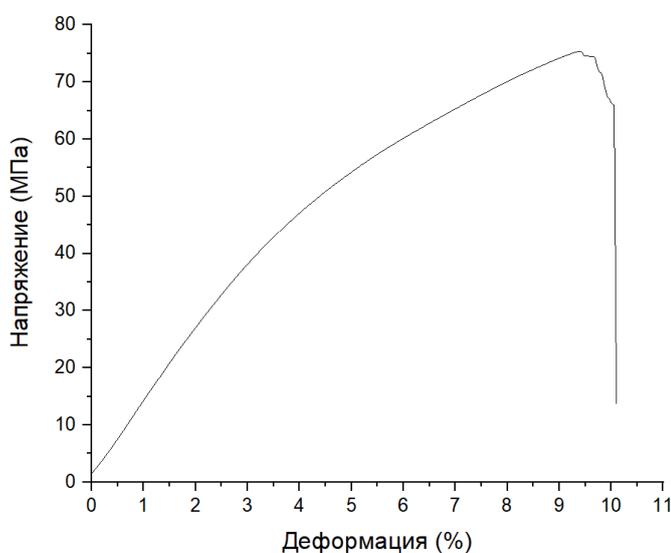


Рисунок 35 – Кривая растяжения образца.

Испытания на одноосное квазистатическое сжатие проводили при скорости нагружения 0,5 мм/мин. Для получения статистических данных испытывали по 3 образца при одинаковых условиях нагружения.

Образец ведет себя как твердый, хрупкий материал. Отсутствует площадка и зуб текучести. Разрушение происходит при деформации 10%. Механические характеристики образцов представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Механические свойства ТППМЭ образцов при растяжении.

Толщина стенки, мм	0,38
Пористость, %	75,9
Модуль упругости E, ГПа	1,2
Предел текучести $\sigma_y$ , МПа	37,3
Предел прочности $\sigma_e$ , МПа	75,5

Полученный модуль Юнга сравнивался с модулем Юнга кортикальной и трабекулярной костной тканью в таблице 4.

Таблица 4 – Сравнительная таблица механических свойств ТППМЭ образцов, кортикальной и трабекулярной костной ткани при растяжении [12]

	Кортикальная ткань	Трабекулярная ткань	Гироид
Модуль Юнга	0,43-22 ГПа	0,02-4 ГПа	1,2-1,41 ГПа
Предел прочности на растяжение	15-200 МПа	1,2-80 МПа	75,5

Полученная структура может замещать кортикальную костную ткань, так как значения модуля Юнга и предела прочности структуры допустимы и для кортикальной кости.

Фрактограмма излома на рисунке 36 показывает, что поверхность разрыва имеет ямки и сколы. Полученный излом имеет матовую, «бархатистую» поверхность, имеется небольшая шероховатость. Наблюдается смешанный характер разрушения.

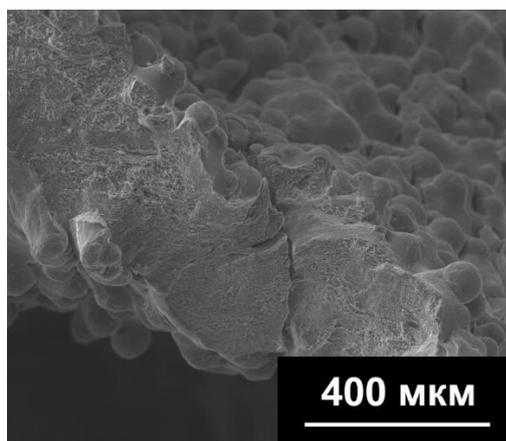


Рисунок 36 – СЭМ изображение поверхности излома образца, изготовленного из титанового сплава марки Ti-6Al-4V методом электронно-лучевого плавления.

Воспользовавшись методом секущих, оценим долю вязкого и хрупкого разрушения. Для этого разделим поверхность разрушения на квадратики размером 100 пикс. × 100 пикс. (рисунок 37).

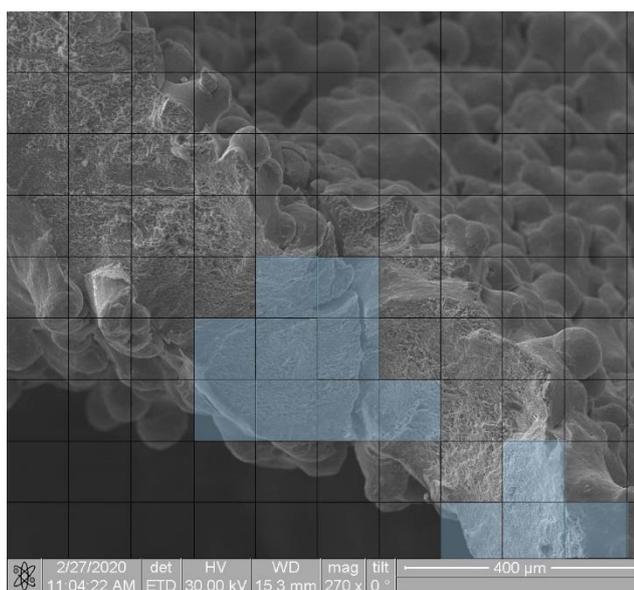


Рисунок 37 – Метод секущих.

$$N_{\text{общ}} = 41$$

$$f_{\text{вяз}} = \frac{N_{\text{вяз}}}{N_{\text{общ}}} = \frac{28}{55} = 68 \% \text{ – доля вязкого разрушения}$$

$$f_{\text{хруп}} = \frac{N_{\text{хруп}}}{N_{\text{общ}}} = \frac{13}{41} = 32 \% \text{ – доля хрупкого разрушения}$$

Для смешанного характера разрушения доля вязкого разрушения составила 35%, доля хрупкого разрушения составила 65%.

### 3.4 Определение механических свойств при испытаниях на сжатие

Также были проведены испытания на квазистатическое одноосное сжатие. Кривая «напряжение-деформация» и механические свойства представлены на рисунке 38.

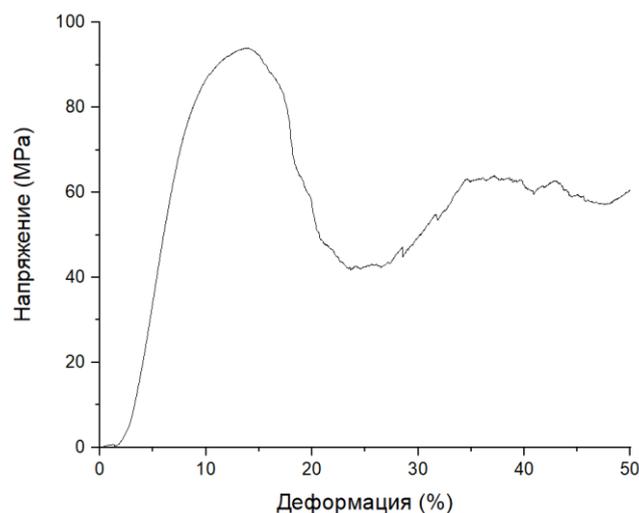


Рисунок 38 – Кривая сжатия ТППМЭ образцов из сплава Ti-6Al-4V

На кривой можно выделить область упругой деформации, наблюдаемую до первого максимального значения напряжения. Затем можно наблюдать область плато, в которой напряжение колеблется. Далее область уплотнения, которая характеризуется быстрым нарастанием напряжения. Такие реакции на сжатие согласуются со смешанным характером кривых напряжение-деформация. Механические характеристики образцов представлены в таблице 5.

Таблица 5 – Механические свойства ТППМЭ образцов при сжатии

Толщина стенки, мм	0,38
Пористость (Масс), %	75,9
Модуль упругости E, ГПа*	1,41
Предел текучести $\sigma_y$ , МПа	65,2
Предел прочности $\sigma_e$ , МПа	87,8

Полученный модуль Юнга сравнивался с модулем Юнга кортикальной и трабекулярной костной тканью в таблице 6.

Таблица 6 – Сравнительная таблица механических свойств ТППМЭ образцов, кортикальной и трабекулярной костной ткани при сжатии

	Кортикальная ткань	Трабекулярная ткань	Гироид
Модуль Юнга	0,43-22 ГПа	0,02-4 ГПа	1,2-1,41 ГПа
Предел прочности на сжатие	15-200 МПа	1,2-80 МПа	87,8

Значения модуля Юнга и предела прочности при сжатии и растяжении различны. Это связано с условиями проведения эксперимента, механизмами деформации и вкладом объема материала. Структура может замещать кортикальную костную ткань. При замещении трабекулярной костной ткани эффект экранирования напряжений на границе с костью будет минимальным.

### 3.5 Определение механических свойств при усталостных испытаниях

Результаты циклических испытаний ТППМЭ образцов из сплава Ti-6Al-4V, проведенных на сервогидравлической машине Biss Nano с частотой 15 Гц при различных нагрузках, представлены в таблице 7.

Таблица 7 – Механические свойства ТППМЭ образцов из сплава Ti-6Al-4V

Максимальная нагрузка	№ образца	Количество циклов до разрушения, N	Среднее значение N
1,2 $\sigma_y$	1	2519	2662
	2	2609	
	3	2857	
1 $\sigma_y$	4	18387	20660
	5	20586	
	6	23006	
0,8 $\sigma_y$	7	93166	103071
	8	111958	
	9	104090	
0,6 $\sigma_y$	10	573122	557818
	11	499983	
	12	600348	
0,4 $\sigma_y$	13	Не сломался	10306452

Испытывали по 3 образца при одинаковых условиях нагружения. Максимальное количество циклов составило 10 млн при нагрузке  $\sigma_{max} = 0,4\sigma_y$ . При этих условиях образец разрушен не был. Минимальное количество циклов до разрушения составило 2519. На рисунке 38 представлена зависимость средней величины долговечности образцов Ti-6Al-4V.

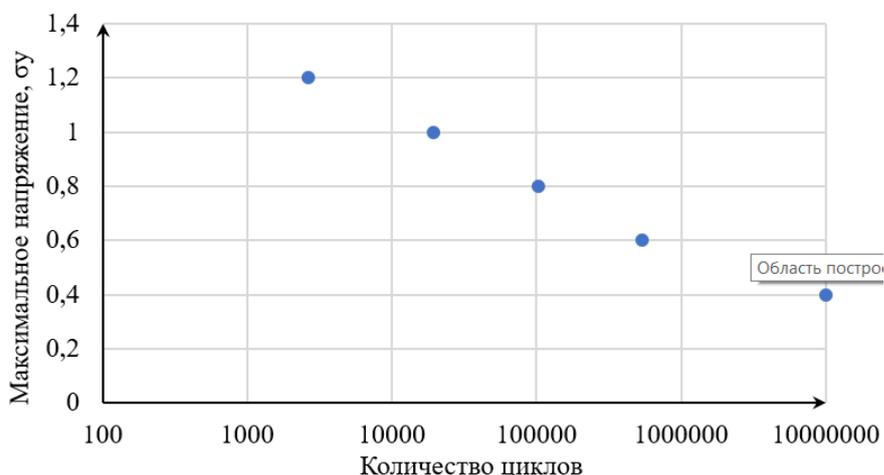


Рисунок 38 – Зависимость количества циклов до отказа от нагрузки

Наблюдается логарифмическая зависимость количества циклов до разрушения от максимальной нагрузки, прикладываемой к образцу.

Установлено, что в условиях малоциклового усталости при  $\sigma_{max} = 1,2\sigma_y$  разрушение образцов № 1-3 имеет хрупкий характер без видимых следов пластической деформации (рисунок 39)



Рисунок 39 – Фотография образца №1 в конце циклического растяжения:

а – вид спереди; б – вид сбоку.

После  $\sim 2600$  циклов происходит мгновенное распространение трещины, ориентированной под углом  $45^\circ$  к оси растяжения. При уменьшении максимальной нагрузки до  $\sigma_{max} = 1,0\sigma_y$  на порядок увеличивается количество циклов до разрушения гироидов. Типичный внешний вид ТППМЭ образцов из сплава Ti-6Al-4V в конце испытаний на усталостную прочность при  $\sigma_{max} = 1,0\sigma_y$  представлен на рисунке 40.

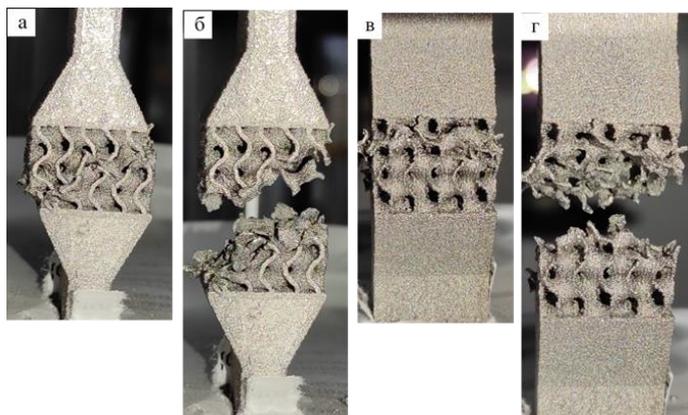


Рисунок 40 – Образец №б в процессе (а, в) и в конце циклического растяжения (б, г): а, б –вид спереди; в, г –вид сбоку.

Разрушение образцов по-прежнему происходит путем постепенного накопления усталостных повреждений и дальнейшего распространения магистральной трещины по направлениям максимальных касательных напряжений, при этом поверхность разрушения имеет более развитый рельеф.

При циклических испытаниях образцов № 7,8,9 при  $\sigma_{max} = 0,8\sigma_y$  количество циклов до их разрушения увеличивается до  $\sim 100$  тыс., при этом разрушение носит более вязкий характер (рисунок 41).

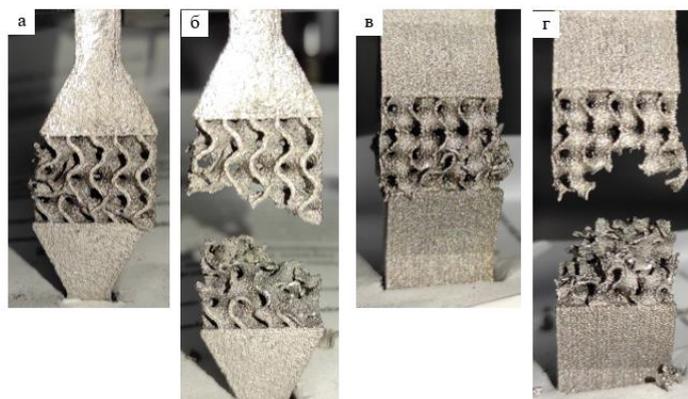


Рисунок 41 – Фотография образца №7 в процессе (а, в) и в конце циклического растяжения (б, г): а, б –вид спереди; в, г –вид сбоку.

Разрушение ТППМЭ образцов из сплава Ti-6Al-4V при  $\sigma_{max} = 0,6\sigma_y$  наступает после ~500 тыс. циклов. Внешний вид образцов в конце испытаний на усталостную прочность при  $\sigma_{max} = 0,6\sigma_y$  представлен на рисунке 42.

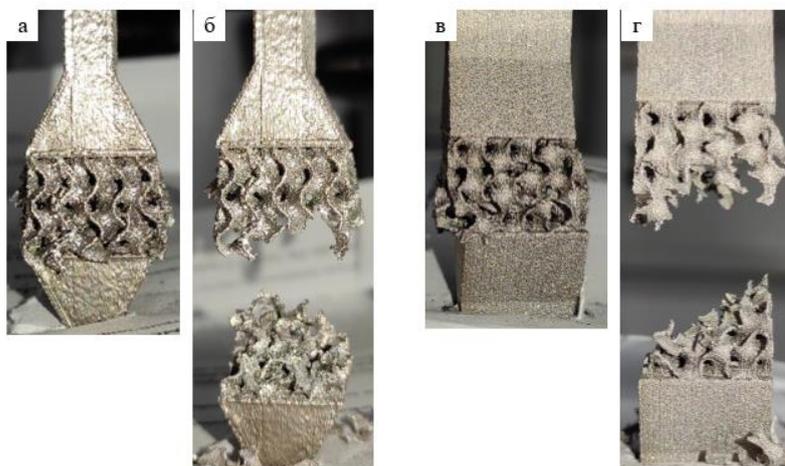


Рисунок 42 – Фотография образца №2 в процессе (а, в) и в конце циклического растяжения (б, г): а, б –вид спереди; в, г –вид сбоку.

Представленные образцы демонстрируют наличие развитой пластической деформации в зоне распространения усталостной трещины.

Наконец, циклические испытания ТППМЭ образцов из сплава Ti-6Al-4V при  $\sigma_{max} = 0,4\sigma_y$  не приводят к их разрушению даже после ~10 млн. циклов. Предел выносливости равен примерно 32 МПа при частоте 15 Гц, что можно сравнить с результатом работы [49], в которой рассматривалась сетчатая структура алмаза с пористостью 83%. Для такой структуры предел выносливости оказался равным 19,4 МПа при тех же условиях. В работе [38] были исследованы структуры тетраэдра T1000 и октаэдра O1000 с пористостью 84% и 77% соответственно. Для таких структур предел выносливости оказался равным 12,5 МПа и 26,0 МПа соответственно при 1 млн. циклов.

В общем случае, развитие трещин в нагруженном гироиде начинается с образования их зародышей, которые образуются либо в области дефектов материала, либо являются следствием его пластической деформации. Поскольку ТППМЭ образцы из сплава Ti-6Al-4V, полученные методом электронно-лучевого плавления, не способны испытывать значительные

пластические деформации, то в качестве зародышей трещин прежде всего выступают области с высокой локальной кривизной, то есть впадины на их поверхности. Причем, чем больше глубина впадины, тем выше концентрация напряжений у его вершины. Соответственно, уменьшение шероховатости поверхности ТППМЭ образцов в процессе электрополировки, облучения электронными пучками может способствовать увеличению их усталостной прочности.

В случае многоциклового усталости определяющим становится внутренняя микроструктура ТППМЭ образца из сплава Ti-6Al-4V, а, именно, размеры первичных  $\beta$  зерен и игл мартенситной  $\alpha'$  фазы, объемная доля вторых фаз, наличие пористости, величина внутренних напряжений и др. Соответственно существенного увеличения циклической стойкости ТППМЭ образцов из сплава Ti-6Al-4V можно добиться не только если реализовать в материале высокие сжимающие напряжения, но и замедлить непрерывное накопление деформационных дефектов в процессе усталостного нагружения. Последнее может быть достигнуто путем формирования в процессе 3D-печати ТППМЭ образцов из сплава Ti-6Al-4V высоконеравновесной мартенситной структуры, способной испытывать вызванные деформацией обратимые фазовые превращения.

При сравнении можно заметить, что предел выносливости полученных образцов, равный примерно 32 МПа при  $10^7$  циклах и частоте 15 Гц, оказался ниже, чем у плотного титана, предел выносливости которого составляет примерно 252 МПа [47]. Также, полученный предел выносливости выше, чем предел выносливости кортикальной кости, который лежит в пределах 7-40 МПа при  $10^7$  циклах и частоте 0,1 Гц [48]. При этом значение предела выносливости выше, чем для структур с той же пористостью, но с традиционной топологией, при которой страты не имеют плавного сочленения между собой [49]. Таким образом, ТППМЭ структуры полученные ЭЛП методом являются перспективными для медицинского применения.

## **Глава 4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение**

На сегодняшний день перспективность научного исследования определяется не столько масштабом открытия, оценить которое сложно на первых этапах жизненного цикла продукта, сколько коммерческой ценностью разработки. Оценка коммерческой ценности разработки является необходимым условием при поиске источников финансирования для проведения научного исследования и коммерциализации его результатов. Оценка помогает ученому найти партнера для проведения научного исследования, коммерциализации результатов и открытия бизнеса.

Любой ученый заинтересован в потребителях, которые приобретут его разработку по цене, обеспечивающей получение прибыли в достаточном объеме и на протяжении длительного периода. Поэтому необходимо представлять, кто является конечным потребителем разработки, или кто может стать им в будущем, по какой причине они эту разработку приобретают. Необходимо определить свой целевой рынок.

Таким образом, целью раздела «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» является определение перспективности и успешности научно-исследовательского проекта, посвященного исследованию физико-механических характеристик сетчатых материалов, полученных с использованием аддитивных технологий.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- Оценка коммерческого потенциала и перспективности поведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения;
- Провести анализ конкурентных технических решений;
- Провести SWOT-анализ для выявления сильных и слабых сторон проекта;
- Разработка планирования научно-исследовательских работ;

- Определение бюджета научно-технического исследования;
- Оценка ресурсной эффективности научно-технического исследования.

#### 4.1.1 Потенциальные потребители результатов работы

Для определения потенциальных потребителей результатов исследования необходимо рассмотреть целевой рынок – это совокупность потенциальных клиентов, которые могут быть заинтересованы в продукте исследования. Также необходимо произвести сегментирование рынка – это выделение части рынка или группы потребителей, которой требуется определенный товар или услуга.

Объектом данного исследования является сетчатая структура из порошка сплава титана Ti-6Al-4V с топологией гироид, изготовленной методом электронно-лучевого плавления.

В таблице 4.1 представлены потенциально заинтересованные стороны проекта.

Таблица 4.1 – Заинтересованные стороны проекта

Заинтересованные стороны проекта	Ожидания заинтересованных сторон
Организации по производству медицинских изделий, центры имплантации	Прикладное применение
Научные центры	Использование полученных результатов для разработки и улучшения свойств полученных сетчатых структур.

#### 4.1.2 Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения

Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения позволяет провести оценку сравнительной эффективности научной разработки, своевременно вносить корректировки в исследования, поддерживать рентабельность проекта.

Целесообразно проводить данный анализ с помощью оценочной карты. Позиция разработки и конкурентов оценивается по каждому показателю

экспертным путем по пятибалльной шкале, где 1 – наиболее слабая позиция, а 5 – наиболее сильная. Веса показателей, определяемые экспертным путем, в сумме должны составить 1. Анализ конкурентных технических решений определяется по формуле:

$$K = \sum B_i \cdot B_i,$$

где  $K$  – конкурентоспособность научной разработки или конкурента,  $B_i$  – вес показателя (в долях единицы),  $B_i$  – балл  $i$ -го показателя.

Конкурентами сетчатой структуры с топологией гироид являются структуры тетраэдра, так как они обладают примерно такими же значениями модуля Юнга, как структуры с топологией гироид; и функционально-градиентные сетчатые структуры. Условные обозначения:  $K_{\Pi}$  – сетчатая структура с топологией гироид,  $K_{K1}$  – сетчатая структура с топологией тетраэдр,  $K_{K2}$  – это функционально-градиентные сетчатые структуры.

Для оценки конкурентных решений были выбраны следующие критерии: биологическая безопасность, механические свойства, сложность изготовления, предполагаемый срок эксплуатации, доступность.

Таблица 4.2 – Оценочная карта для сравнения разработок

Факторные признаки (Pj)	Вес критерия, $a_j$	Баллы			Конкурентоспособность		
		$b_{\Pi}$	$b_{K1}$	$b_{K2}$	$K_{\Pi}$	$K_{K1}$	$K_{K2}$
1	2	3	4	5	6	7	8
<b>Технические критерии оценки</b>							
1. Биологическая безопасность	0,3	5	3	4	1,5	0,9	1,2
2. Механические свойства	0,2	5	2	5	1	0,4	1
3. Простота изготовления	0,2	4	5	3	0,8	1	0,6
4. Предполагаемый срок эксплуатации	0,2	4	3	5	0,8	0,6	1
5. Доступность	0,1	4	4	3	0,4	0,4	0,3
<b>Итого</b>	<b>1</b>	<b>22</b>	<b>17</b>	<b>20</b>	<b>4,5</b>	<b>3,3</b>	<b>4,1</b>

На основе представленного выше анализа можно сделать вывод о том, что данная сетчатая структура является оптимальной для использования в практических целях. Конкурентные продукты имеют ряд недостатков: низкая биологическая безопасность, сложный процесс изготовления, короткий срок эксплуатации, что связано в основном с выбором топологии сетчатой структуры, которая не распределяет напряжения по всему материалу, образуя концентраторы напряжения в месте соединения страт. В тоже время данная модель имеет поверхность, способную распределять напряжение по всей поверхности материала, предотвращая образование трещин и разрушение структуры.

#### **4.2 SWOT – анализ**

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

Сильные стороны – это факторы конкурентоспособной стороны проекта. Указывают на отличительное преимущество проекта или ресурсы, являющиеся особенными с точки зрения конкуренции.

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

Возможности – предпочтительные ситуации в настоящем или будущем, возникающую в условиях окружающей среды проекта.

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

В таблице 4.3 представлена интерактивная матрица проекта, в которой показано соотношение сильных сторон с возможностями, что позволяет более подробно рассмотреть перспективы разработки.

Таблица 4.3 – SWOT-анализ

	<p>Сильные стороны проекта:</p> <p>С1. Простота и высокая скорость ЭЛП технологии. изготовления металлических структур.</p> <p>С2. Оптимальные физико-механические и биологические характеристики продукта.</p> <p>С3. Экономичность технологии изготовления структуры, повторное использование материала.</p>	<p>Слабые стороны проекта:</p> <p>Сл1. Использование зарубежного оборудования аддитивного производства.</p> <p>Сл2. Отсутствие у потенциальных потребителей квалифицированных кадров по работе с научной разработкой.</p> <p>Сл3. Отсутствие оборудования для проведения ряда исследований в ТПУ.</p>
<p>Возможности:</p> <p>В1. Импортзамещение технологий аддитивного производства на российском рынке.</p> <p>В2. Появление спроса на товар, обусловленного его конкурентными преимуществами;</p> <p>В3. Повышение стоимости конкурентных разработок в сфере регенерации костной ткани.</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Экономичность, энергоэффективность и низкая стоимость технологии может повысить спрос со стороны производителей имплантов.</li> <li>2. Инициирование дополнительного спроса, обеспеченного высокой скоростью изготовления имплантов.</li> <li>3. Повышение информированности со стороны производителей имплантатов и научно-исследовательских групп при увеличении стоимости конкурентных разработок.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Необходимость использования научно-исследовательских ресурсов ТПУ при отсутствии необходимого оборудования.</li> <li>2. Обеспечение условий для создания кадров в области создания пористых структур для медицинского применения.</li> </ol>
<p>Угрозы:</p> <p>У1. Отсутствие спроса на новые технологии производства.</p> <p>У2. Развитая конкуренция аддитивных технологий изготовления металлических структур.</p> <p>У3. Введение дополнительных государственных требований к сертификации медицинских имплантов.</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Благодаря возможностям системы своевременному финансированию продвижение на рынок может стать успешным.</li> <li>2. Повышение конкурентоспособности после модернизации разработки.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Использование зарубежного оборудования для создания и проведения испытаний продукта может вызвать повышение стоимости изготовления импланта.</li> <li>2. Отсутствие спроса и квалифицированных кадров замедлит вывод продукта на рынок.</li> </ol>

В результате выполнения SWOT-анализа можно сделать вывод, что преимущества разработанной пористой структуры значительно преобладают над её недостатками. Имеющиеся несовершенства возможно устранить, воспользовавшись перечисленными выше возможностями.

#### 4.3 Планирование научно-исследовательских работ

##### 4.3.1 Определение трудоемкости выполнения работ

Трудовые затраты в большинстве случаев образуют основную часть стоимости разработки, поэтому важным моментом является определение трудоемкости работ каждого из участников научного исследования.3

Для определения ожидаемого (среднего) значения трудоемкости  $t_{\text{ожи}}$  используем следующую формулу:

$$t_{\text{ожи}} = \frac{3t_{\text{min } i} + 2t_{\text{max } i}}{5}$$

где  $t_{\text{ожи}}$  – ожидаемая трудоемкость выполнения  $i$ -ой работы чел.-дн.,  $t_{\text{min } i}$  – минимально возможная трудоемкость выполнения заданной  $i$ -ой работы, чел.-дн.,  $t_{\text{max } i}$  – максимально возможная трудоемкость выполнения заданной  $i$ -ой работы, чел.-дн.

Для научного руководителя:

$$t_{\text{ожи}} = \frac{3 \cdot 20 + 2 \cdot 35}{5} = 26 \text{ чел. -дн}$$

Для инженера:

$$t_{\text{ожи}} = \frac{3 \cdot 80 + 2 \cdot 120}{5} = 96 \text{ чел. -дн}$$

Исходя из ожидаемой трудоемкости работ, определяем продолжительность каждой работы в рабочих днях  $T_p$ , учитывая параллельность выполнения работ несколькими исполнителями:

$$T_{p_i} = \frac{t_{\text{ожи}}}{\text{Ч}_i},$$

где  $T_{p_i}$  – продолжительность одной работы, раб.дн.,  $t_{\text{ожи}}$  – ожидаемая трудоемкость выполнения одной работы, чел.-дн.,  $\text{Ч}_i$  – численность

исполнителей, выполняющих одновременно одну и ту же работу на данном этапе, чел.

Длительность работ в календарных днях:

$$T_{Ki} = T_{pi} \cdot K_{\text{кал}},$$

где  $T_{Ki}$  – продолжительность выполнения  $i$ -й работы в календарных днях,  $T_{pi}$  – продолжительность выполнения  $i$ -й работы в рабочих днях,  $K_{\text{кал}}$  – коэффициент календарности.

Коэффициент календарности вычисляется по следующей формуле:

$$K_{\text{кал}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}}},$$

где  $T_{\text{кал}}$  – количество календарных дней в году,  $T_{\text{вых}}$  – количество выходных дней в году,  $T_{\text{пр}}$  – количество праздничных дней в году.

Тогда коэффициент календарности соответственно равен:

$$K_{\text{кал}} = \frac{365}{365 - 52 - 14} = 1,22$$

Таблица 4.4 – Распределение исполнителей и этапы выполняемых работ

Название работы	Трудоемкость работ			Исполнители	Длительность работ в рабочих днях, $T_{pi}$	Длительность работ в календарных днях, $T_{Ki}$
	$t_{\text{min}}$ , чел-дни	$t_{\text{max}}$ , чел-дни	$t_{\text{ож}}$ , чел-дни			
Составление и утверждение темы научного исследования	1	7	3	Руководитель Инженер	1 1	1 1
Изучение и подбор необходимых материалов	14	40	24	Инженер	24	29
Определение направления исследований	4	14	8	Руководитель, инженер	4 4	5 5
Календарное планирование работ по теме	4	17	9	Руководитель, инженер	4 4	5 5
Разработка технологии изготовления	2	7	4	Инженер	4	5
Получение сетчатой структуры	5	28	14	Инженер	14	17

Продолжение таблицы 4.4

Проведение исследования пористости образцов и обработка полученных данных	3	10	7	Инженер	7	8
Проведение исследования морфологии образцов и обработка полученных данных	3	12	8	Инженер	8	10
Проведение испытаний на растяжение и сжатие, обработка полученных данных	7	20	15	Инженер	15	18
Проведение усталостных испытаний и обработка полученных данных	15	30	20	Инженер	20	24
Оценка эффективности результатов	7	23	13	Руководитель, Инженер	6 6	7
Составление ВКР	5	24	12	Инженер	12	15
Итого					119	144

### 4.3.2 Разработка графика проведения научного исследования

Календарный план-график проведения НИОКР по теме представлен в таблице 4.5.

Таблица 5.5 – Календарный план-график проведения научного исследования

№ работ	Вид работ	Исполнители	Т <sub>к</sub> , кал.дн.	Продолжительность выполнения работ													
				Февраль			Март			Апрель			Май				
				1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3		
1	Составление и утверждение темы научного исследования	Руководитель Инженер	1														
2	Изучение и подбор необходимых материалов	Инженер	29														
3	Определение направления исследований	Руководитель, инженер	5														
4	Календарное планирование работ по теме	Руководитель, инженер	5														
5	Разработка технологии изготовления	Инженер	5														
6	Получение сетчатой структуры	Инженер	17														
7	Проведение исследования пористости образцов и обработка полученных данных	Инженер	8														
8	Проведение исследования морфологии образцов и обработка полученных данных	Инженер	10														
9	Проведение испытаний на растяжение и сжатие, обработка полученных данных	Инженер	18														
10	Проведение усталостных испытаний и обработка полученных данных	Инженер	24														
11	Оценка эффективности результатов	Руководитель, Инженер	7														
12	Составление ВКР	Инженер	15														
		Руководитель, инженер															
		Инженер															

Исходя из представленных данных, можно утверждать, что в календарных днях длительность работ для руководителя составляет 18 дней, а для инженера – 144 дня.

## 4.4 Бюджет научно-технического исследования

### 4.4.1 Расчет материальных затрат научно-технического исследования

Расчет материальных затрат осуществляется по следующей формуле:

$$Z_M = (1 + K_T) \cdot \sum_{i=1}^m C_i \cdot N_{\text{расх } x_i},$$

где  $m$  – количество видов материальных ресурсов, потребляемых при выполнении исследования;  $N_{\text{расх } i}$  – количество материальных ресурсов  $i$ -го вида, планируемых к использованию;  $K_T$  – коэффициент, учитывающий транспортно-заготовительные расходы (15% от стоимости материалов);  $C_i$  – цена приобретения единицы  $i$ -го вида потребляемых материальных ресурсов.

Таблица 4.6 – Материальные затраты

Наименование	Единица измерения	Количество	Цена за ед.руб	Затраты на материалы ( $Z_M$ ), руб.
Порошок (Ti-6Al-4V) для печати образцов	кг	1	5500	5500
Халат	шт	1	500	500
Перчатки	уп	5	22	110
Набор лабораторных инструментов	шт	1	1000	1000
Чашка Петри	шт	1	400	400
Итого:				7510

### 4.4.2 Расчет затрат на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ

Таблица 4.7 – Расчет бюджета затрат на приобретение спецоборудования для научных работ

№ п/п	Наименование оборудования	Кол-во единиц оборудования	Цена единицы оборудования, тыс.руб.	Общая стоимость оборудования, тыс.руб.
1	Лабораторные весы	1	25,2	25,2
2	Ноутбук	1	45,4	45,4
Итого:				70,6

В работе использовалось уже приобретенное оборудование, поэтому рассчитаем стоимость в виде амортизационных отчислений. Амортизация рассчитывается по формуле  $A = C/СПИ/12$ , где  $A$  – амортизация за один месяц,  $C$  – первоначальная стоимость в тысячах рублей,  $СПИ$  – срок полезного использования в годах. Амортизация для ноутбука составила:

$$A = (4 \cdot 45,5) / 4 / 12 = 3,79.$$

#### 4.4.3 Основная заработная плата исполнителей темы

Статья включает основную заработную плату работников, непосредственно занятых выполнением проекта, (включая премии, доплаты) и дополнительную заработную плату. Расчет основной заработной платы:

$$З_{ЗП} = З_{осн} + З_{доп},$$

где  $З_{осн}$  – основная заработная плата;  $З_{доп}$  – дополнительная заработная плата.

$$З_{осн} = З_{дн} \cdot T_p,$$

где  $T_p$  – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником;  $З_{дн}$  – среднедневная плата работника:

$$З_{дн} = \frac{З_m \cdot M}{F_d},$$

где  $З_m$  – месячный должностной оклад работника;  $M$  – количество месяцев работы без отпуска в течение года (при пятидневной неделе  $M=11,2$ );  $F_d$  – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб.дн (Таблица 4.8).

Таблица 4.8 – Баланс расчетного времени

Показатели рабочего времени	Руководитель	Инженер	Лаборант
Календарное число дней	365	365	365
Количество нерабочих дней			
- выходные дни	104	104	104
- праздничные дни	14	14	14
Потери рабочего времени			
- отпуск	24	24	24
- невыходы по болезни			
Действительный годовой фонд рабочего времени	223	223	223

Месячный должностной оклад работника:

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

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 (в НИИ и на промышленных предприятиях – за расширение сфер обслуживания, за профессиональное мастерство, за вредные условия: 15-20 % от  $Z_{тс}$ );  $k_p$  – районный коэффициент, равный 1,3 (для Томска).

Таблица 4.9 – Расчёт основной заработной платы

Исполнители	$Z_{тс}$ , руб.	$k_{пр}$	$k_d$	$k_p$	$Z_m$ , руб.	$Z_{дн}$ , руб.	$T_p$ , раб.дн.	$Z_{осн}$ , руб.
Руководитель	37700	-	-	1,3	49010	2461	15	36915
Инженер	17752	-	-	1,3	23077	1159	119	137921
Итого:								174836

#### 5.4.4 Дополнительная заработная плата

Дополнительная заработная плата включает оплату за непроработанное время и рассчитывается исходя из 10% от основной заработной платы, работников, непосредственно участвующих в выполнении темы:

$$Z_{доп} = k_{доп} \cdot Z_{осн},$$

где  $Z_{доп}$  – дополнительная заработная плата,  $Z_{осн}$  – основная заработная плата,  $k_{доп}$  – коэффициент дополнительной заработной платы (принимается равным 0,12).

Для руководителя:

$$Z_{доп} = 36915 \cdot 0,12 = 4429,8$$

Для инженера:

$$Z_{доп} = 13791 \cdot 0,12 = 16550,5$$

#### 4.4.5 Отчисления во внебюджетные фонды

В данной статье расходов отражаются обязательные отчисления по установленным законодательством Российской Федерации нормам органам

государственного социального страхования (ФСС), пенсионного фонда (ПФ) и медицинского страхования (ФФОМС) от затрат на оплату труда работников.

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы:

$$Z_{\text{внеб}} = K_{\text{внеб}} \cdot (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}),$$

где  $K_{\text{внеб}}$  – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды.

Таблица 5.10 – Отчисления во внебюджетные фонды

Исполнитель	Основная заработная плата, руб.	Дополнительная заработная плата, руб.
Руководитель	36915	4429,8
Инженер	137921	16550,5
Коэффициент отчислений во внебюджетные фонды	0,3	
Итого:	58744,9	

#### 4.4.6 Накладные расходы

Накладные расходы учитывают прочие затраты организации, не попавшие в предыдущие статьи расходов: печать и ксерокопирование материалов исследования, оплата услуг связи, электроэнергии, почтовые и телеграфные расходы, размножение материалов и т.д. Их величина определяется по следующей формуле:

$$Z_{\text{накл}} = (\text{сумма статей } \frac{1}{7}) \cdot K_{\text{нр}},$$

где  $K_{\text{нр}}$  – коэффициент, учитывающий накладные расходы (величина коэффициента принимается равной 0,16).

$$Z_{\text{накл}} = (7510 + 28990 + 174836 + 4429,8 + 16550,5 + 58744,9) \cdot 0,16 = 46569,8$$

#### 4.4.7 Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта

Рассчитанная величина затрат научно-исследовательской работы (темы) является основой для формирования бюджета затрат проекта, который при формировании договора с заказчиком защищается научной организацией

в качестве нижнего предела затрат на разработку научно-технической продукции. В таблице 5.11 представлен расчет бюджета научно-исследовательской работы.

Таблица 4.11 – Расчет бюджета затрат НТИ

Наименование статьи	Сумма, руб.
1. Материальные затраты НТИ	7510
2. Затраты на специальное оборудование для научных (экспериментальных работ)	28990
3. Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	174836
4. Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы	20980,3
5. Отчисления во внебюджетные фонды	58744,9
6. Накладные расходы	46569,8
7. Бюджет затрат НТИ	383363,5

#### 4.5 Оценка эффективности проекта

Экономическая эффективность проекта производится на основе расчета интегрального показателя эффективности научного исследования. Его нахождение связано с определением двух средневзвешенных величин: финансовой эффективности и ресурсоэффективности.

Интегральный показатель финансовой эффективности получают после оценки затрат нескольких вариантов исполнения научного исследования. Наибольший интегральный показатель реализации технической задачи принимается за базу расчета, с которым соотносятся финансовые значения по всем вариантам исполнения. Оценим бюджет затрат исполнения проекта:

1. методом селективного лазерного плавления/спекания;
2. методом электронно-лучевого плавления.

Интегральный финансовый показатель разработки:

$$I_{\text{фин}}^{\text{исп}i} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{\text{max}}},$$

где  $\Phi_{ri}$  – стоимость  $i$ -го варианта исполнения,  $\Phi_{\max}$  – максимальная стоимость исполнения НИР.

Таблица 4.13 – Расчет интегрального показателя финансовой эффективности

Исполнение	Селективное лазерное плавление/спекание	Электронно-лучевое плавление
Оборудование	SLM 800	Argam A2 EBM
$\Phi_{ri}$	476200	400000
$I_{\text{фин}}^{\text{исп}}$	1	0,84

Таким образом, для данной НИР показатель финансовой эффективности составляет 0,84.

Ресурсоэффективность проекта можно оценить с помощью интегрального показателя ресурсоэффективности, вычисляемого по формуле:

$$I_p^{\text{исп}} = \sum_{i=1}^n (a_i \cdot b_i),$$

где  $I_p^{\text{исп}}$  – интегральный показатель ресурсоэффективности;

$a_i$  – весовой коэффициент разработки;

$b_i$  – бальная оценка разработки, устанавливается экспертным путем по выбранной шкале оценивания;

$n$  – число параметров сравнения.

Таблица 4.14 – Оценка характеристик проекта.

Критерии	Весовой коэффициент	Селективное лазерное плавление/спекание	Электронно-лучевое плавление
1. Энергосбережение	0,15	4	4
2. Скорость работы	0,15	4	4
3. Количество концентраторов напряжений	0,5	3	5
4. Шероховатость	0,2	3	5
$I_{ri}$	1	3,5	4,5

Определим интегральный показатель эффективности:

$$I_{\text{исп}} = \frac{I_p^{\text{исп}}}{I_{\text{фин}}^{\text{исп}}}$$

Данный показатель будет равен:

– для исполнения 1:  $I_{\text{исп}1} = 3,5/1 = 3,5$ ;

– для исполнения 2:  $I_{\text{исп}2} = 4,5/0,84 = 5,36$ .

Следовательно, исполнение 2 является наиболее эффективным.

### **Заключение по разделу**

В ходе выполнения раздела «Финансовый менеджмент» был выполнен анализ конкурентоспособности. Проведён SWOT-анализ проекта, в ходе которого были выявлены потенциальные внутренние и внешние сильные и слабые стороны, возможности и угрозы. Из анализа выяснили сильные и слабые стороны исследования, а также выявили стратегии его дальнейшего развития. Сильными сторонами можно назвать то, что технология изготовления структуры является экономичной за счет системы повторного использования материала, отличается высокой скоростью и простотой. К слабым сторонам можно отнести отсутствие квалифицированных кадров по работе с научной разработкой и отсутствие необходимого оборудования для тестирования имплантов.

При планировании научно-исследовательской работы был произведен подсчет бюджета исследования. В процессе формирования бюджета были определены материальные затраты НИИ (7510), затраты на специальное оборудование для научных (28990), затраты по основной заработной плате исполнителей темы (174836), затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы (20980,3), отчисления во внебюджетные фонды (58744,9), накладные расходы (46569,8). Общий бюджет затрат составил 383363,5.

Проведена оценка результатов ресурсоэффективности, которая составила 4,5 из 5, что говорит о хорошей эффективности реализации технического проекта. Проведение такого рода оценки коммерческой ценности необходимо, чтобы оценить состояние и перспективы проводимых научных исследований.

## **Глава 5. Социальная ответственность**

### **Введение**

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

В современных условиях развития общества, всё чаще возникает острая потребность в новых способах реконструкции крупных костных дефектов, способных удовлетворить физико-механическим характеристикам человеческой кости. На основании этого, в настоящей выпускной работе ведется исследование физико-механических характеристик сетчатых материалов, полученных с использованием аддитивных технологий. В работе были получены изображения сканирующей электронной микроскопии, проведены статические испытания на растяжение и сжатие металлической пористой структуры, а также проведены усталостные испытания. Проведение данных исследований предполагает работу на различных установках. Например, установка ARCAM A2 EBM для печати металлических моделей методом электронно-лучевой плавки, установка Biss Nano – сервогидравлическая испытательная машина, используемая для проведения усталостных испытаний, сканирующий электронный микроскоп и т.д.

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

### **5.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности.**

Правовые нормы трудового законодательства, относительно работы в описанных выше условиях регулируются таким документом как, Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 25.02.2022) (с

изм. и доп., вступ. в силу с 01.03.2022) [50]. Таким образом, нормальная продолжительность рабочего времени не может превышать 40 часов в неделю, а режим работы предусматривает продолжительность рабочей недели, в данном случае шестидневная рабочая неделя. Как следствие, применяется следующий режим работы: с понедельника по пятницу 7 часов в день, в субботу 5 часов в день. Оплата труда производится в размере не меньше МРОТ, и нормы труда установлены в соответствии с уровнем техники, технологии, организации производства и труда.

### **5.1.2 Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны исследователя.**

Рациональная планировка рабочего места должна обеспечивать: наилучшее размещение орудий и предметов труда, не допускать общего дискомфорта, уменьшать утомляемость работника, повышать его продуктивность труда.

Согласно ГОСТ 12.2.032-78 «ССБТ. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования.» [51], должны быть соблюдены требования о размере зоны досягаемости моторного поля в вертикальной и горизонтальной плоскостях, высоты рабочей поверхности, пространства для ног и рабочего сиденья. Отрегулировано размещение средств отображения информации, именно мониторов ЭВМ: под углом  $\pm 15^\circ$  от нормальной линии взгляда и в горизонтальной плоскости под углом  $\pm 15^\circ$  от сагиттальной плоскости.

## **5.2 Производственная безопасность.**

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

В ходе анализа рабочего места при проведении исследований было выявлено, что в лаборатории возможно наличие таких вредных и опасных факторов, как:

- Отклонение показателей микроклимата;
- Превышение уровня шума;
- Недостаточная освещенность рабочей зоны;
- Опасность электрического тока;

Все вышеописанные факторы объединены в таблице 4 и классифицированы в соответствии с ГОСТ 12.0.003-2015 [52].

Таблица 5.1 – Возможные опасные и вредные факторы

Факторы (ГОСТ 12.0.003-2015)	Тип фактора		Нормативные документы
	Вредный	Опасный	
1.Отклонение показателей микроклимата	+	-	Требования к допустимым параметрам микроклимата регулируются СанПиН 2.2.4.3359-16. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений [53].
2. Превышение уровня шума	+	-	ГОСТ 12.1.003-2014 ССБТ. Шум. Общие требования безопасности.[54]
3.Недостаточная освещенность рабочей зоны	+	-	СанПиН 2.1.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания.[55]
4. Опасность электрического тока	-	+	Система стандартов безопасности труда. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты. ГОСТ 12.1.019- 2017[56]

### 5.2.2 Отклонение показателей микроклимата.

Микроклиматом называют метеорологические условия внутри производственных помещений. К показателям микроклимата можно отнести: температуру воздуха, скорость движения воздуха, влажность и тепловое излучение. Отклонение показателей от нормы может вызвать изменение природных условий. Повышенная влажность воздуха затрудняет

терморегуляцию организма, а пониженная влажность вызывает пересыхание слизистых оболочек дыхательных путей.

Недостаточная вентиляция рабочего помещения, повышение влажности воздуха, попадание прямых солнечных лучей, перегрев оборудования могут вызвать у человека ухудшение самочувствия, что напрямую влияет на его работоспособность, производительность и здоровье.

Санитарными нормами, установленными для производственных помещений [53] заданы оптимальные и допустимые диапазоны температуры воздуха, скорости движения молекул и влажности воздуха.

В таблицах 5-6 представлены оптимальные и допустимые параметры рабочей зоны для различных категорий работ. В нашем случае, категория работ - Па, т.е. работы, связанные с постоянной ходьбой, выполняемые стоя или сидя, но не требующие перемещения тяжестей.

Таблица 5.2 – Оптимальные и допустимые параметры температуры для рабочей зоны [53]

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

Таблица 5.3 – Оптимальные и допустимые параметры скорости движения воздуха для рабочей зоны [53]

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

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

### **5.2.3 Превышение уровня шума**

Производственным шумом называется шум на рабочих местах, на участках или на территориях предприятий, который возникает во время производственного процесса. Источниками шума на производстве является транспорт, технологическое оборудование, системы вентиляции, пневмо- и гидроагрегаты, а также источники, вызывающие вибрацию.

Следствием вредного действия производственного шума могут быть:

- профессиональные заболевания,
- повышение общей заболеваемости,
- снижение работоспособности,
- снижение производительности труда.

Шум с уровнем звукового давления до 35дБ привычен для человека и не беспокоит его. Повышение этого уровня до 40–80дБ создает значительную нагрузку на нервную систему, вызывая ухудшение самочувствия, а при длительном действии может быть причиной нервов. Воздействие шума уровнем свыше 80дБ может привести к потере слуха – профессиональной глухоте. При действии уровней свыше 140дБ возможен разрыв барабанных перепонки, контузия, а при уровне более 160дБ наступает летальный исход.

Средства индивидуальной защиты органов слуха установлены ГОСТ 12.4.318-2019 по системе стандартов безопасности труда. К средствам защиты относятся противозумные шлемофоны (шлемы), наушники, заглушки, вкладыши. Они эффективно защищают организм от раздражающего действия шума, предупреждая возникновение различных функциональных нарушений и расстройств, если правильно подобраны и систематически используются.

Для определения допустимого уровня шума на рабочих местах используется ГОСТ 12.1.003-2014 ССБТ. «Шум. Общие требования безопасности» [54], СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания» [55]. В таблице 5.4 приведены допустимые уровни звукового давления на рабочем месте согласно нормам из СанПиН 1.2.3685-21.

Таблица 5.4 – Допустимые уровни звукового давления на рабочем месте [55]

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

Следует использовать средства коллективной защиты. Они подразделяются на средства, снижающие шум в источнике его возникновения, и средства, снижающие шум на пути его распространения от источника до защищаемого объекта.

Внутри здания тихие помещения необходимо располагать вдали от шумных так, чтобы их разделяло несколько других помещений или ограждение с хорошей звукоизоляцией.

#### 4.2.4 Недостаточная освещенность рабочей зоны

Качество освещения влияет на работоспособность сотрудника, на его психологическое состояние в процессе выполнения работ. Наиболее благоприятное влияние на состояние сотрудника оказывает преимущественно естественное освещение. Нормы естественного, искусственного и совмещенного освещения зданий и сооружений, мест производства работ вне зданий представлены в СанПиНе 2.1.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания» [55].

Он определяет наименьшую освещенность рабочих поверхностей в производственных помещениях в зависимости от вида производимой

деятельности. В соответствии с СП 52.13330.2016 «Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95\*» [56] зрительные работы делятся на 8 разрядов в зависимости от размера объекта различия и условий зрительной работы. Принимаем четвертый разряд зрительной работы. Допустимые значения наименьшей освещенности рабочих поверхностей в производственных помещениях для четвертого разряда зрительной работы приведены в таблице 5.5. На рабочей поверхности должны отсутствовать резкие тени, которые создают неравномерное распределение поверхностей с различной яркостью в поле зрения, искажает размеры и формы объектов различия.

Таблица 5.5 – Нормирование значения освещенности на рабочих местах производственных помещений при искусственном освещении [56]

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

Естественного освещения в лаборатории по условиям зрительной работы, как правило, недостаточно, как правило, недостаточно, поэтому на рабочих местах оказывается задействованным и искусственное освещение. Оно может быть обеспечено с помощью люминесцентных ламп ЛВ (белого цвета) мощностью 20, 40, 80 Вт. Для рабочих мест с искусственным освещением регламентирована допустимая освещенность, согласно действующим санитарным нормам и правилам СП 52.13330.2016 [56]. Согласно СП 52.13330.2016 газоразрядные лампы приняты в качестве основного источника света. Необходимо учитывать, пульсацию светового потока, слепящее действие, а также возникновение стробоскопического

эффекта. Для уменьшения коэффициента пульсации люминесцентные лампы включают в разные фазы трехфазной электрической сети.

### **5.2.5 Электробезопасность и пожаробезопасность.**

Основными причинами воздействия тока на человека являются: случайные проникновения или приближение на опасное расстояние к токоведущим частям; появление напряжения на металлических частях оборудования в результате повреждения изоляции и т.д.

Поражающее действие электрического тока зависит от значения и длительности протекания тока через тело человека, рода и частоты тока, места протекания тока, индивидуальных свойств человека. Опасной величиной тока является ток, равный 0,001 А, а смертельной 0,1 А. Также исход электропоражения зависит от состояния внешней среды. Могут быть следующие виды воздействий:

- термическое (ожог);
- электрическое;
- механическое (электрометаллизация);
- биологическое (паралич мышц, электрический удар).

Устанавливает предельно допустимые уровни (ПДУ) напряжений и токов ГОСТ 12.1.019-2017. [57]

Помещение, в котором производилась дипломная работа, относится к помещениям третьего класса, так как там отсутствуют условия, создающие повышенную или особую опасность, вследствие этого к оборудованию предъявляются следующие требования:

- экран видеомонитора должен находиться на расстоянии не менее 50 см от пользователя (расстояния от источника);
- защитное заземление — это преднамеренное электрическое соединение с землей или ее эквивалентом металлических нетоковедущих частей, которые могут оказаться под напряжением.

Цель защитного заземления – снизить до безопасной величины напряжение относительно земли на металлических частях оборудования, которые не находятся под напряжением, но могут оказаться под напряжением вследствие нарушения изоляции электроустановок. В результате замыкания на корпус заземленного оборудования снижается напряжение прикосновения и ток, проходящий через тело человека, при его прикосновении к корпусам.

Защитное заземление применяется в трехфазных трех проводных сетях напряжением до 1000В с изолированной нейтралью, а в сетях напряжением 1000В и выше с любым режимом нейтрали.

Наибольшие допустимые значения сопротивления заземления растеканию тока, установленные правилами устройства электроустановок, составляют для установок до 1000 В (4 Ом) – при суммарной мощности генераторов или трансформаторов, питающих данную сеть, не более 100 кВА. Наиболее допустимое значение постоянного тока 0,1 А. Наиболее допустимое значение напряжения 36 В согласно ГОСТ Р 54149-2010 [58].

Поэтому к работе на ПЭВМ допускаются лица, прошедшие обучение безопасным методам труда, вводный инструктаж, первичный инструктаж на рабочем месте. Каждый работник должен знать правила первой медицинской помощи при поражении электрическим током, чтобы быть готовым оказать помощь другим работникам.

Здание, где был разработан дипломный проект, построено из кирпича. Помещение снабжено противопожарной защитой, направленной на предотвращение воздействия на людей опасных факторов пожара. Рабочее помещение относится к 1-й степени огнестойкости по СНиП 21-01-97\* [59]. Возникновение пожара при работе с электронной аппаратурой может быть по причинам электрического характера. Причины возникновения пожара электрического характера: короткое замыкание, перегрузки по току, искрение и электрические дуги, статическое электричество и т. п..

Пожарная безопасность обеспечивается наличием огнетушителей:

Огнетушитель углекислотный (ОУ-2). ОУ-2 предназначен для тушения загораний веществ, горение которых не может происходить без доступа воздуха, загораний электроустановок, находящихся под напряжением не более 10 000 В, жидких и газообразных веществ (класс В, С, Е), загораний в архивах, музеях, картинных галереях.

Согласно ФЗ-123 от 2008г. [60] помещения производственного и складского назначения независимо от их функционального назначения подразделяются на следующие категории:

- повышенная взрывопожароопасность (А);
- взрывопожароопасность (Б);
- пожароопасность (В1 - В4);
- умеренная пожароопасность (Г);
- пониженная пожароопасность (Д).

Лаборатория относится к категории Г. Помещения, в которых находятся негорючие вещества и материалы в горячем, раскаленном или расплавленном состоянии, процесс обработки которых сопровождается выделением лучистого тепла, искр и пламени; горючие газы, жидкости и твердые вещества, которые сжигаются или утилизируются в качестве топлива.

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

### **5.3. Экологическая безопасность.**

#### **5.3.1. Анализ влияния процесса исследования на окружающую среду.**

Вопрос об охране окружающей среды являются актуальным и крайне важным в настоящее время, так как с каждым годом увеличивается количество веществ, загрязняющих окружающую среду.

При выполнении работы возможно загрязнение почвы от экспериментальных отходов.

Использование металлических отходов состоит из нескольких технологических операций, в том числе:

1. Проверка металлических отходов;
2. Отделение отходов черных металлов от отходов цветных металлов;
3. Разделение различных неметаллических примесей;
4. Окончательный контроль отходов;
5. Обработка.

Для утилизации титановых проб используют специальные контейнеры для неорганических материалов. Ввиду того, что титан не токсичен, предварительной обработке перед утилизацией он не подвергается. Вывоз отработанных проб продуктов осуществляется специализированными службами.

Также необходимо улучшить систему улавливания/фильтрации вентиляционных выбросов при работе в лаборатории, так как выбросы непосредственно влияют на окружающую среду в целом. В данный момент используемые фильтры не улавливают все вредные вещества.

Защита окружающей среды при производстве металлических изделий должна быть обеспечена мерами, направленными против загрязнения гидросферы. Все выбросы в канализацию также необходимо подвергать обезвреживанию и очистке. Для этих целей все сливы собираются в отдельную для каждого вида тару, затем подвергаются нейтрализации и только после этого они могут быть слиты в канализацию с их предварительным разбавлением водопроводной водой. Отработанные сливы собираются в специальную герметически закрытую тару, которую по мере заполнения отправляют на обезвреживание и утилизацию.

Устаревшее оборудование является техногенным мусором. Списанная офисная техника и мебель являются причиной загрязнения окружающей среды. Решением этой проблемы является утилизация. В настоящее время

утилизация оборудования является обязательной для компаний и организаций, осуществляющих ее плановое списание, с проведением всех утилизационных работ в специализированных предприятиях, имеющих все разрешительные документы на осуществление подобного рода деятельности. В обратном случае для организаций, регулярно нарушающих правила утилизации компьютерной техники, действующим законодательством предусматривается ряд штрафных санкций, начиная от значительных сумм штрафов и заканчивая приостановлением или полной ликвидацией деятельности.

#### **5.4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях.**

##### **5.4.1. Анализ вероятных ЧС, которые могут возникнуть на рабочем месте при проведении исследований.**

Лаборатория расположена в городе Томск с континентально-циклоническим климатом и природные явления (землетрясения, наводнения, засухи, ураганы и т. д.), в данном городе отсутствуют.

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

##### **5.4.2. Обоснование мероприятий по предотвращению ЧС и разработка порядка действия в случае возникновения ЧС.**

1. Повышение устойчивости системы электроснабжения. Прежде всего, целесообразно заменить воздушные линии электропередачи кабельными (подземными) сетями, использовать резервные сети для

потребителей электроэнергии, обеспечить резервные источники питания объекта (мобильные электрогенераторы).

2. Обеспечение стабильности теплоснабжения, системного звонка, углубления теплотрасс.

3. Обеспечение устойчивости системы водоотведения. Повышение устойчивости канализационной системы путем создания резервной сети трубопроводов, через которую загрязненная вода может быть отведена в случае отказа основной сети. Необходимо разработать схему аварийного сброса сточных вод непосредственно в водоемы.

4. Создать маршруты аварийной эвакуации и разработать планы аварийного спасения.

### **Выводы по разделу**

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

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

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

В случае ЧС в лаборатории присутствует план эвакуации, огнетушитель. В лаборатории работает сигнализация и корпус находится под вахтовой охраной.

По состоянию пожаробезопасности помещение соответствует нормам.

## Заключение

В ходе выполнения работы были получены образцы методом электронно-лучевого плавления из титанового сплава марки Ti-6Al-4V.

1) Исследована морфология поверхности. Выявлена развитость поверхности, равномерность толщины стенок, а также отсутствие трещин и частиц порошка. Пористость образцов составляет 76%. Толщина стенок составляет 0,38 мм.

2) Выполнены испытания на растяжение. Были определены значения модуля Юнга (1,2 ГПа), пределы текучести (37,3 МПа) и прочности образцов (75,5 МПа), а также их относительное удлинение до разрушения (4,5%). Характер разрушения смешанный.

3) Выполнены испытания на сжатие. Были определены значения модуля Юнга (1,41 ГПа), пределы текучести (65,2 МПа) и прочности образцов (87,8 МПа).

4) Проведены циклические испытания ТППМЭ образцов из сплава Ti-6Al-4V при максимальной нагрузке  $\sigma_{max} = 0,4 - 1,2\sigma_y$ . Показано, что при максимальной нагрузке  $\sigma_{max} = 1,2\sigma_y$  количество циклов до разрушения составляет  $\sim 2600$ , в то время как циклические испытания при  $\sigma_{max} = 0,4\sigma_y$  не приводят к разрушению ТППМЭ образцов из сплава Ti-6Al-4V даже после  $\sim 10$  млн. циклов. Данное значение показывает, что структуры могут быть использованы для медицинского применения в соответствии с ISO 7206-4. Также это показывает преимущество ТППМЭ топологии перед другими стандартными топологиями [38, 49]. Изучены закономерности накопления усталостных повреждений в ТППМЭ образцах из сплава Ti-6Al-4V, полученных методом электронно-лучевого плавления и подвергнутых циклическому нагружению, а также продемонстрировано их влияние на количество циклов до разрушения в условиях мало- и многоциклового усталости.

5) Проведено сравнение с параметрами кости, что показало перспективу их использования в медицине. Образцы демонстрируют пористость, сопоставимую с пористостью губчатой кости, а модуль упругости находится в диапазоне 1,2–1,41 ГПа и, таким образом, может быть скорректирован с модулем упругости кортикальной кости. Также результаты анализа усталостных испытаний показывают, что значения циклической долговечности и предела выносливости подходят для медицинского применения лучше, чем сетчатые структуры со стандартной топологией. Следовательно, образцы титанового сплава с топологией гироид можно интегрировать в костную ткань человека при этом уменьшить или избежать эффекта экранирования напряжения и увеличить срок службы имплантатов.

## Литература

- 1) Zadpoor A. A. Bone tissue regeneration: the role of scaffold geometry //Biomaterials science. – 2015. – Т. 3. – №. 2. – С. 231-245.
- 2) Qu H. et al. Biomaterials for bone tissue engineering scaffolds: A review //RSC advances. – 2019. – Т. 9. – №. 45. – С. 26252-26262.
- 3) Yan C. et al. Microstructure and mechanical properties of aluminium alloy cellular lattice structures manufactured by direct metal laser sintering //Materials Science and Engineering: A. – 2015. – Т. 628. – С. 238-246.
- 4) Wang X. et al. Topological design and additive manufacturing of porous metals for bone scaffolds and orthopaedic implants: A review //Biomaterials. – 2016. – Т. 83. – С. 127-141.
- 5) Davidson J. A. et al. New surface-hardened, low-modulus, corrosion-resistant Ti-13Nb-13Zr alloy for total hip arthroplasty //Bio-medical materials and engineering. – 1994. – Т. 4. – №. 3. – С. 231-243.
- 6) Yazdimamaghani M. et al. Porous magnesium-based scaffolds for tissue engineering //Materials Science and Engineering: C. – 2017. – Т. 71. – С. 1253-1266.
- 7) Niinomi M., Boehlert C. J. Titanium alloys for biomedical applications //Advances in metallic biomaterials. – Springer, Berlin, Heidelberg, 2015. – С. 179-213.
- 8) Иванов М. Б. и др. Механические свойства наноструктурного титана серийного производства. – 2011.
- 9) Ganjeh E., Sarkhosh H. Microstructural, mechanical and fractographical study of titanium-CP and Ti-6Al-4V similar brazing with Ti-based filler //Materials Science and Engineering: A. – 2013. – Т. 559. – С. 119-129.
- 10) Топольский В. Ф. и др. Разработка новых титановых биосовместимых сплавов для медицинского применения //Современная электрометаллургия. – 2012.
- 11) Elias C. N. et al. Biomedical applications of titanium and its alloys //Jom. – 2008. – Т. 60. – №. 3. – С. 46-49.

- 12) Килина П. Н. Формирование периодической структуры армирующего каркаса костной ткани на основе порошкового титанового сплава селективным лазерным плавлением [Текст]: Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук/ П.Н. Килина. – Пермь: ПНИПУ. – 176 с.
- 13) Niinomi M. Recent research and development in titanium alloys for biomedical applications and healthcare goods //Science and technology of advanced Materials. – 2003. – Т. 4. – №. 5. – С. 445.
- 14) Rashed M. G. et al. Metallic microlattice materials: A current state of the art on manufacturing, mechanical properties and applications //Materials & Design. – 2016. – Т. 95. – С. 518-533.
- 15) Herzog D. et al. Additive manufacturing of metals //Acta Materialia. – 2016. – Т. 117. – С. 371-392.
- 16) Bagheri Z. S. et al. Compensation strategy to reduce geometry and mechanics mismatches in porous biomaterials built with Selective Laser Melting //Journal of the mechanical behavior of biomedical materials. – 2017. – Т. 70. – С. 17-27.
- 17) An J. et al. Design and 3D printing of scaffolds and tissues //Engineering. – 2015. – Т. 1. – №. 2. – С. 261-268.
- 18) Melchels F. P. W., Feijen J., Grijpma D. W. A review on stereolithography and its applications in biomedical engineering //Biomaterials. – 2010. – Т. 31. – №. 24. – С. 6121-6130.
- 19) Rasheed S. et al. Additive Manufacturing of Bone Scaffolds Using PolyJet and Stereolithography Techniques //Applied Sciences. – 2021. – Т. 11. – №. 16. – С. 7336.
- 20) Раевский Е.В. Лазерные аддитивные технологии: перспективы применения // Аддитивные технологии. – 2022.– №2-2022.
- 21) Changjun Han Continuous functionally graded porous titanium scaffolds manufactured by selective laser melting for bone implants / Changjun Han, Yan Li, Qian Wang, Shifeng Wen, Qingsong Wei, Chunze Yan, Liang

- Hao, Jie Liu, Yusheng Shi. – Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials. – 2018. – №80. – стр. 119–127;
- 22) Ahmadi S.M. Effects of laser processing parameters on the mechanical properties, topology, and microstructure of additively manufactured porous metallic biomaterials: A vector-based approach / S. M. Ahmadi, R. Hedayati, R. K. Ashok Kumar Jain, Y. Li, S. LeeFlang, A. A. Zadpoor. – Materials & Design. – 2017. – №134. – стр. 234–243;
- 23) Chen S.Y. Microstructure and mechanical properties of open-cell porous Ti-6Al-4V fabricated by selective laser melting / S.Y. Chen, J.C. Huang, C.T. Pan, C.H. Lin, T.L. Yang, Y.S. Huang, C.H. Ou, L.Y. Chen, D.Y. Lin, H.K. Lin, T.H. Li, J.S.C. Jang, C.C. Yang. – Journal of Alloys and Compounds. – 2017. – №713. – стр. 248–254;
- 24) Liang H. Trabecular-like Ti-6Al-4V scaffolds for orthopedic: fabrication by selective laser melting and in vitro biocompatibility / Huixin Liang, Youwen Yang, Deqiao Xie, Lan Li, Ning Mao, Changjiang Wang, Zongjun Tian, Qing Jiang, Lida Shen. – Journal of Materials Science & Technology. – 2019. – №35. – стр. 1284–1297;
- 25) Sallica-Leva E. Microstructure and mechanical behavior of porous Ti-6Al-4V parts obtained by selective laser melting / E. Sallica-Leva, A.L. Jardini, J.B. Fogagnolo. – Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials. – 2013. – №26. – стр. 98–108;
- 26) Yan C. Ti-6Al-4V triply periodic minimal surface structures for bone implants fabricated via selective laser melting/ Chunze Yan, Liang Hao, Ahmed Hussein, Philippe Young. – Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials. – 2015. – №51. – стр. 61–73;
- 27) Electron beam melting (EBM) или технология электронно-лучевой плавки [Электронный ресурс]: – Электрон. текстовые дан. – Москва, 2021. – Режим доступа: <https://can-touch.ru/3d-printing-ebm/>
- 28) Surmeneva M. A. Fabrication of multiple-layered gradient cellular metal scaffold via electron beam melting for segmental bone reconstruction /

- Maria A. Surmeneva, Roman A. Surmenev, Ekaterina A. Chudinova, Andrei Koptioug, Mikhail S. Tkachev, Svetlana N. Gorodzha, Lars-Erik Rännar. – *Materials & Design*. – 2017. – №133. – стр. 195–204;
- 29) Zhang L. Additive Manufacturing of Titanium Alloys by Electron Beam Melting: A Review / Lai-Chang Zhang, Yujing Liu, Shujun Li, Yulin Hao. – *Advanced Engineering Materials*. – 2017. – №20;
- 30) Körner C. Additive manufacturing of metallic components by selective electron beam melting — a review / C. Körner. – *International Materials Reviews*. – 2015. – №61. – стр. 361–377;
- 31) H.Chern A. A review on the fatigue behavior of Ti-6Al-4V fabricated by electron beam melting additive manufacturing / Andrew H. Chern, Peeyush Nandwana, Tao Yuan, Michael M. Kirka, Ryan R. Dehoff, Peter K. Liaw, Chad E.Duty. – *International Journal of Fatigue*. – 2019. – №119. – стр. 173–184;
- 32) HaijunGong Influence of defects on mechanical properties of Ti-6Al-4V components produced by selective laser melting and electron beam melting / Haijun Gong, Khalid Rafi, Hengfeng Gu, G.D.Janaki Ram, Thomas Starr, BrentStucker. – *Materials & Design*. – 2015. – №86. – 545–554;
- 33) Xiao L. Compressive properties and micro-structural characteristics of Ti-6Al-4V fabricated by electron beam melting and selective laser melting / Lijun Xiao, Weidong Song, Menglei Hu, Peifeng Li. – *Materials Science and Engineering: A*. – 2019. – №764;
- 34) Arcam EBM [Электронный ресурс]: – Электрон. текстовые дан. – Швеция:, 2021. – Режим доступа: <https://www.ge.com/>
- 35) Sallica-Leva E. Microstructure and mechanical behavior of porous Ti-6Al-4V parts obtained by selective laser melting / E. Sallica-Leva, A.L. Jardini, J.B. Fogagnolo. – *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*. – 2013. – №26. – стр. 98–108;
- 36) Li S. Influence of cell shape on mechanical properties of Ti-6Al-4V meshes fabricated by electron beam melting method / S.J.Li, Q.S.Xu,

- Z.Wang, W.T.Hou, Y.L.Hao, R.Yang, L.E.Murr. – Acta Biomaterialia. – 2014. – №10. – стр. 4537–4547;
- 37) Kelly C. N. Fatigue behavior of As-built selective laser melted titanium scaffolds with sheet-based gyroid microarchitecture for bone tissue engineering / Cambre N. Kelly, Jaedyn Francovich, S. Julmi, David Safranski, Robert E. Guldborg, Hans J. Maier, KenGall. – Acta Biomaterialia. – 2019. – №713. – стр. 610–626;
- 38) Yang L. Compression–compression fatigue behaviour of gyroid-type triply periodic minimal surface porous structures fabricated by selective laser melting / Lei Yang, Chunze Yan, Wenchao Cao, Zhufeng Liu, Bo Song, Shifeng Wen, Cong Zhang, Yusheng Shi, Shoufeng Yang. – Acta Materialia. – 2019. – №181. – стр. 49–66;
- 39) Inteltest [Электронный ресурс]: – Электрон. текстовые дан. – Томск, 2021. – Режим доступа: <https://tomsk.inteltest.ru/>
- 40) Kelly C. N. Fatigue behavior of As-built selective laser melted titanium scaffolds with sheet-based gyroid microarchitecture for bone tissue engineering / Cambre N. Kelly, Jaedyn Francovich, S. Julmi, David Safranski, Robert E. Guldborg, Hans J. Maier, KenGall. – Acta Biomaterialia. – 2019. – №713. – стр. 610–626;
- 41) Yang L. Compression–compression fatigue behaviour of gyroid-type triply periodic minimal surface porous structures fabricated by selective laser melting / Lei Yang, Chunze Yan, Wenchao Cao, Zhufeng Liu, Bo Song, Shifeng Wen, Cong Zhang, Yusheng Shi, Shoufeng Yang. – Acta Materialia. – 2019. – №181. – стр. 49–66;
- 42) Zhao D. Effect of pore geometry on the fatigue properties and cell affinity of porous titanium scaffolds fabricated by selective laser melting / Danlei Zhao, Yutian Huang, Yong Ao, Changjun Han, Qian Wang, Yan Li, Jie Liu, Qingsong Wei, Zhen Zhang. – Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials. – 2018. – №88. – стр. 478–487;

- 43) Растровая электронная микроскопия и рентгеноспектральный микроанализ. Аппаратура, принцип работы, применение [Текст]: учебное пособие / Ю.А. Быков, С.Д. Карпухин. – Москва: МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 44 с.
- 44) Система с электронным и сфокусированными пучками quanta 200 3d [Электронный ресурс]: – Электрон. текстовые дан. – Томск, 2021. – Режим доступа: <http://www.ckp.tsu.ru/about/equipment/7/696/>
- 45) Универсальная электромеханическая испытательная машина instron 3369 [Электронный ресурс]: – Электрон. текстовые дан. – Томск, 2021. – Режим доступа: <http://ckp.tsu.ru/about/equipment/7/21/>
- 46) Испытание на усталость [Электронный ресурс]: – Электрон. текстовые дан. – Пермь, 2021. – Режим доступа: <https://promlab.pro/service.html?itemid=53>
- 47) Семенов Б. Н. Моделирование деформирования и разрушения цилиндрических образцов из нанотитана с керамическим покрытием на основе диоксида циркония при локальных воздействиях //Materials Physics and Mechanics. – 2015. – Т. 24. – №. 2. – С. 178-186.
- 48) Carter D. R. et al. Uniaxial fatigue of human cortical bone. The influence of tissue physical characteristics //Journal of Biomechanics. – 1981. – Т. 14. – №. 7. – С. 461-470.
- 49) Hrabe N. W. et al. Compression-compression fatigue of selective electron beam melted cellular titanium (Ti-6Al-4V) //Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials. – 2011. – Т. 99. – №. 2. – С. 313-320.
- 50) Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. От. 01.03.2022)
- 51) ГОСТ 12.2.032-78 «ССБТ. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования.»

- 52) ГОСТ 12.0.003-2015 «Опасные и вредные производственные факторы и их классификация.»
- 53) СанПиН 2.2.4.3359-16 «Санитарно-эпидемиологические требования к физическим факторам на рабочих местах»
- 54) ГОСТ 12.1.003-2014 «ССБТ. Шум. Общие требования безопасности.»
- 55) СанПиН 2.1.3685-21. «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания.»
- 56) СП 52.13330.2016 «Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95\*»
- 57) ГОСТ 12.1.019-2017 «Система стандартов безопасности труда. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты.»
- 58) ГОСТ Р 54149-2010 «Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.»
- 59) СНиП 21-01-97\* «Пожарная безопасность зданий и сооружений.»
- 60) Федеральный закон от 22.07.2008 N 123-ФЗ (ред. от 30.04.2021) "Технический регламент о требованиях пожарной безопасности"