

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 03.04.02 Физика  
 Отделение школы (НОЦ) Экспериментальной физики

### МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы

## РАЗРАБОТКА СПОСОБОВ ПОСТОБРАБОТКИ СЕТЧАТЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МЕТАМАТЕРИАЛОВ, ПОЛУЧЕННЫХ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВЫМ ПЛАВЛЕНИЕМ

УДК 621.785.545:539.2

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
ОБМ91	Павельева Александра Андреевна		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
С.н.с. НИЦ ФМКМ ИШХБМТ	Сурменова М.А.	к.ф.-м.н		

### КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН ШБИП	Киселева Е. С.	к.э.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент отделения ОТД	Антоневич О.А.	к.б.н.		

### ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Заведующий кафедрой - руководитель отделения на правах кафедры	Лидер А.М.	д.т.н., профессор		

**Результаты обучения магистров  
направления 03.04.02 «Физика»  
(профиль «Физика конденсированного состояния»)**

Код резу льт ата	Результат обучения (Выпускник должен быть готов)	Требования ФГОС, критериев и/или заинтересованных сторон
<i>Общекультурные (универсальные) компетенции</i>		
P1	Понимает необходимость самостоятельного обучения и повышения квалификации в течение всего периода профессиональной деятельности.	Требования ФГОС (ОК-7), критерий 5 АИОР
P2	Проявляет способность эффективно работать самостоятельно в качестве члена команды по междисциплинарной тематике, быть лидером в команде, консультировать по вопросам проектирования научных исследований, а также быть готовым к педагогической деятельности.	Требования ФГОС (ОК-6, ПК-11), критерий 5 АИОР
P3	Умеет находить зарубежных и отечественных партнеров, владеет иностранным языком, позволяющим работать с зарубежными партнерами с учетом культурных, языковых и социально-экономических условий.	Требования ФГОС (ОК-2, ОК-4), критерий 5 АИОР
P4	Проявляет понимание используемых методов, области их применения, вопросов безопасности и здравоохранения, юридических аспектов, ответственности за профессиональную деятельность и ее влияния на окружающую среду.	Требования ФГОС (ОК-3), критерий 5 АИОР
P5	Следует кодексу профессиональной этики, ответственности и нормам научно-исследовательской деятельности.	Требования ФГОС (ОК-5), критерий 5 АИОР
<i>Профессиональные компетенции</i>		
P6	Проявляет глубокие естественнонаучные, математические профессиональные знания в проведении научных исследований в перспективных областях профессиональной деятельности.	Требования ФГОС (ОК-1, ПК-1), критерий 5 АИОР
P7	Принимает участие в фундаментальных исследованиях и проектах в области физики металлов и материаловедения, а также в модернизации современных и создании новых методов изучения механических, электрических, магнитных, тепловых свойств твердых тел.	Требования ФГОС (ПК-2), критерий 5 АИОР

P8	Способен обрабатывать, анализировать и обобщать научно-техническую информацию, передовой отечественный и зарубежный опыт в профессиональной деятельности, осуществлять презентацию научной деятельности.	Требования ФГОС (ПК-4), критерий 5 АИОР
P9	Способен применять полученные знания для решения нечетко определенных задач, в нестандартных ситуациях, использует творческий подход для разработки новых оригинальных идей и методов исследования в области физики металлов, материаловедения и термообработки.	Требования ФГОС (ПК-3), критерий 5 АИОР
P10	Способен планировать проведение аналитических имитационных исследований по профессиональной деятельности с применением современных достижений науки и техники, передового отечественного и зарубежного опыта в области научных исследований, умеет критически оценивать полученные теоретические и экспериментальные данные и делает выводы, знает правовые основы в области интеллектуальной собственности.	Требования ФГОС (ОК-4, ПК-6, ПК-7, ПК-8, ПК-9), критерий 5 АИОР
P11	Умеет интегрировать знания в различных и смежных областях научных исследований и решает задачи, требующие абстрактного и креативного мышления и оригинальности в разработке концептуальных аспектов проектов научных исследований.	Требования ФГОС (ОК-5, ПК-10), критерий 5 АИОР



<b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b>	1. Аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки и техники в области биомедицинских материалов, требований к ним и методов их модифицирования. 2. Постановка цели и задач научного исследования. 3. Разработка методов постобработки сетчатых металлических метаматериалов. 4. Исследование влияния данных методов на микроструктуру, морфологию, механические свойства и целостность конструкции. 4. Обсуждение результатов проведенных исследований. 5. Заключение по проделанной работе.
---	---

<b>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</b>	
Раздел	Консультант
Литературный обзор, материалы и методы, экспериментальная часть	старший научный сотрудник НИЦ ФМКМ ИШХБМТ, к.ф.-м.н., Сурменова М.А.
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Доцент ОСГН ШБИП, к.э.н., Киселева Е.С.
Социальная ответственность	доцент отделения ОТД, к.б.н., Антоневиц О.А.
Иностранный язык	доцент отделения ИЯ, к.ф.н., Зяблова Н.Н.
<b>Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:</b>	
Материалы и методы	

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

**Задание выдал руководитель / консультант (при наличии):**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
С.н.с. НИЦ ФМКМ ИШХБМТ	Сурменова М.А.	к. ф.-м. н		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
ОБМ91	Павельева Александра Андреевна		

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

Студенту:

Группа	ФИО
ОБМ91	Павельевой Александре Андреевне

Школа	ИЯТШ	Отделение школы (НОЦ)	ОЭФ
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	03.04.02 Физика

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

1. <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	Стоимость материальных ресурсов и специального оборудования определены в соответствии с рыночными ценами г. Томска Тарифные ставки исполнителей определены штатным расписанием НИ ТПУ
2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	-30% премии; 20% надбавки; 12% накладные расходы; 30% районный коэффициент.
3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	Коэффициент отчислений во внебюджетные фонды – 30,2%. (НК РФ)

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

1. <i>Оценка коммерческого и инновационного потенциала НТИ</i>	1. Потенциальные потребители результатов исследования; 2. Анализ конкурентных технических решений; 3. SWOT – анализ; 4. Оценка готовности проекта к коммерциализации.
2. <i>Разработка устава научно-технического проекта</i>	1. Определение структуры выполнения НИ. 2. Определение трудоемкости работ. 3. Разработка графика проведения исследования.
3. <i>Планирование процесса управления НТИ: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок</i>	Формирование плана и графика разработки: - определение трудоемкости работ; - определение структуры работ; - разработка графика Ганта. Формирование бюджета затрат на научное исследование: - материальные затраты; - основная заработная плата; - дополнительная заработная плата; - отчисления на социальные нужды; - накладные расходы.
4. <i>Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности</i>	1. Определение интегрального финансового показателя; 2. Определение интегрального показателя ресурсоэффективности; 3. Определение интегрального показателя эффективности.

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

1. <i>Оценка конкурентоспособности технических решений</i>	
2. <i>Матрица SWOT</i>	
3. <i>График проведения НТИ</i>	
4. <i>Бюджет НТИ</i>	
5. <i>Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НТИ</i>	

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

**Задание выдал консультант:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН ШБИП	Киселева Елена Станиславовна	к.э.н.		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
ОБМ91	Павельева Александра Андреевна		

## ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
ОБМ91	Павельева Александра Андреевна

Школа	ИЯТШ	Отделение (НОЦ)	ОЭФ
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	03.04.02 «Физика»

Тема ВКР:

**Разработка способов постобработки сетчатых металлических метаматериалов, полученных электронно-лучевым плавлением**

**Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:**

1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	<p>Объект исследования: метаматериалы титанового сплава Ti6Al4V.</p> <p>Область применения: костные имплантаты.</p> <p>Рабочая зона: корпус №3 ТПУ лаборатория №018</p>
--	---

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

<p><b>1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:</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>	<p>ПНД Ф 12.13.1-02. Техника безопасности при работе в химико-аналитических лабораториях</p> <p>Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 N 197-ФЗ</p> <p>ГОСТ 12.2.032-78. Рабочее место при выполнении работ сидя.</p> <p>ГОСТ 12.2.033-78 Рабочее место при выполнении работ стоя.</p> <p>ГОСТ 12.0.003-15. Система стандартов безопасности труда. Опасные и вредные факторы.</p>
<p><b>2. Производственная безопасность:</b></p> <p>2.1. Анализ выявленных вредных и опасных факторов</p> <p>2.2. Обоснование мероприятий по снижению воздействия</p>	<p>Вредные факторы:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Недостаточная освещенность рабочей зоны;</li> <li>– Повышенный уровень шума;</li> <li>– Пониженная температура воздуха рабочей зоны;</li> <li>– Недостаток естественного света;</li> <li>– Поражение химически активными веществами.</li> </ul> <p>Опасные факторы:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Повышенная температура поверхностей оборудования, материалов;</li> <li>– Поражение электрическим током.</li> </ul>

<b>3. Экологическая безопасность:</b>	<p>– Воздействие на атмосферу: газообразные отходы, загрязняющие атмосферу помещения – естественные выделения – пары химических реагентов, бытовая пыль, электрическая и тепловая энергия;</p> <p>– на гидросферу: отходы, образующиеся в процессе отмычки образцов, в процессе влажной уборки помещения лаборатории, при пользовании водопроводом, загрязнение химическими реагентами;</p> <p>– на литосферу: отходы бумаги, офисная техника, комплектующие и запчасти, утратившие в результате износа потребительские свойства, загрязнение почвы химическими реагентами.</p>
<b>4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:</b>	Возможно возникновение ЧС техногенного и экологического характера

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

**Задание выдал консультант:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент отделения ОТД	Антонеvич О.А.	к.б.н.		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
ОБМ91	Павельева Александра Андреевна		

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

Школа ИЯТШ  
 Направление подготовки (специальность) 03.04.02 «Физика»  
 Уровень образования Магистратура  
 Отделение школы (НОЦ) ОЭФ  
 Период выполнения \_\_\_\_\_ (осенний / весенний семестр 20\_\_ /20\_\_ учебного года)

Форма представления работы:

магистерская диссертация

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

### КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН выполнения выпускной квалификационной работы

Срок сдачи студентом выполненной работы: \_\_\_\_\_

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
30.12.19	Аналитический обзор литературы	15
30.05.20	Проведение постобработки сетчатых металлических метаматериалов, изготовленных методом электронно-лучевого плавления из титанового сплава Ti-6Al-4V	20
30.06.20	Исследования изменения механических свойств сетчатых металлических метаматериалов	10
30.11.20	Исследования изменений формы, размеров и целостности конструкции сетчатых металлических метаматериалов, изготовленных из сплава Ti-6Al-4V	10
30.12.20	Исследования микроструктуры сетчатых металлических метаматериалов из сплава Ti-6Al-4V после этапа постобработки	10
30.03.21	Анализ результатов	15
15.04.21	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	5
30.04.21	Социальная ответственность	5
15.05.21	Заключение	10

**СОСТАВИЛ:**

**Руководитель ВКР**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
С.н.с. НИЦ ФМКМ ИШХБМТ	Сурменова М.А.	к.ф.-м.н.		

**Консультант (при наличии)**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
С.н.с. НИЦ ФМКМ ИШХБМТ	Сурменова М.А.	к.ф.-м.н.		

**СОГЛАСОВАНО:****Руководитель ООП**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Заведующий кафедрой - руководитель отделения на правах кафедры	Лидер А.М.	Д.Т.Н., профессор		

## Реферат

Выпускная квалификационная работа содержит 138 страниц, 39 рисунков, 29 таблиц, 69 литературных источников, 1 приложение.

Ключевые слова: аддитивные технологии, постобработка, метаматериалы, титан, титановые сплавы, электронно-лучевое плавление.

Объектом исследований являлись металлические метаматериалы, изготовленные из титанового сплава Ti-6Al-4V с помощью электронно-лучевого плавления.

Цель работы: разработать способы постобработки сетчатых металлических метаматериалов, полученных электронно-лучевым плавлением.

Для достижения поставленной цели были определены следующие задачи:

1. Изучить особенности топологии трижды периодических поверхностей минимальной энергии (ТППМЭ) типа «гирид», обеспечивающей уменьшение количества концентраторов напряжений в синтезируемом сетчатом металлическом метаматериале;

2. Изучить и определить возможные методы постобработки сетчатого металлического метаматериала с гиридной топологией;

3. Определить наиболее подходящие способы постобработки сетчатой конструкции с гиридной топологией;

4. Осуществить постобработку выбранными способами;

5. Оценить влияние параметров постобработки сетчатой конструкции на микроструктуру с помощью сканирующей электронной микроскопии;

6. Оценить влияние параметров постобработки сетчатой конструкции на механические свойства с помощью механических испытаний;

7. Оценить влияние постобработки сетчатой конструкции на изменение формы и толщины стенок с помощью компьютерной томографии;

8. Сделать выводы о проделанной работе.

В работе представлены результаты исследований по разработке способов постобработки металлических метаматериалов, изготовленных из титанового сплава Ti-6Al-4V. А также влияние данных способов на микроструктуру и морфологию поверхности, механические свойства и целостность структуры.

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

Экономическая значимость работы: способы постобработки сетчатых металлических метаматериалов, изготовленных методами аддитивных технологий, позволяющие экономически выгодно и ресурсо-эффективно провести качественную постобработку сложных конструкций.

## Определения, обозначения, сокращения

АТ – аддитивные технологии

ТППМЭ – трижды периодические поверхности минимальных энергий

УЗВ – ультразвуковое воздействие

ХТ – химическое травление

ПО – пескоструйная обработка

ЭЛП – электронно-лучевое плавление

СЭМ – сканирующая электронная микроскопия

AM – additive manufacturing

TPMES – triply periodical minimal energy surface

EBM – electron beam melting

USV – ultrasound vibration

CE – chemical etching

SEM - Scanning electron microscopy

## Оглавление

Введение.....	17
1.1 Аддитивные технологии.....	20
1.2 Электронно-лучевое плавление.....	21
1.3 Требования к сетчатым материалам .....	23
1.4 Метаматериалы .....	25
2 Материалы и методы .....	41
2.1 Получение образцов.....	41
2.2 Методы постобработки .....	42
2.2.1 Пескоструйная постобработка.....	42
2.2.2 Химическое травление .....	43
2.2.3 Ультразвуковое воздействие .....	45
2.3 Методы исследования.....	47
2.3.1 Сканирующая электронная микроскопия .....	47
2.3.2 Компьютерная томография.....	49
2.4 Механические испытания .....	50
3 Результаты.....	51
3.1 Этап постобработки .....	51
3.1.1 Пескоструйная обработка .....	51
3.1.2 Ультразвуковое воздействие .....	51
3.1.3 Химическое травление .....	52
3.2 Сканирующая электронная микроскопия.....	52
3.2.1 Морфология поверхности .....	52
3.2.2 Изучение микроструктуры.....	55
3.3 Компьютерная томография.....	58
3.4 Механические испытания .....	62
Заключение .....	70
4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность .....	72
и ресурсосбережение .....	72

4.1	Предпроектный анализ .....	73
4.1.1	Потенциальные потребители результатов исследований.....	73
4.1.2	Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения .....	73
4.3	SWOT-анализ.....	74
4.4	Оценка готовности проекта к коммерциализации.....	79
4.4.1	Инициация проекта.....	81
4.4.2	Организационная структура проекта.....	82
4.5	Планирование управления научно-техническим проектом .....	83
4.6	Бюджет научного исследования.....	85
4.7	Специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ .	86
4.8.	Основная заработная плата .....	86
4.9	Дополнительная заработная плата научно-производственного персонала	89
4.10	Отчисления на социальные нужды .....	90
4.11	Накладные расходы .....	90
4.12	Организационная структура проекта .....	91
4.13	Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования.....	92
4.14	Динамические методы экономической оценки инвестиций .....	92
4.15	Чистая текущая стоимость (NPV) .....	93
4.16	Дисконтированный срок окупаемости.....	94
4.17	Внутренняя ставка доходности (IRR) .....	95
4.18	Индекс доходности (рентабельности) инвестиций (PI) .....	97
4.19	Оценка сравнительной эффективности исследования.....	97
4.20	Оценка сравнительной эффективности исследования.....	98
	Вывод по разделу .....	101
5	Социальная ответственность .....	103
5.1	Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности ....	104
5.1.1	Специальные (характерные для рабочей зоны исследователя) правовые нормы трудового законодательства .....	104

5.1.2	Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны исследователя .....	105
5.2	Производственная безопасность .....	107
5.2.1	Анализ вредных производственных факторов .....	108
5.2.2	Анализ опасных факторов .....	115
5.3	Экологическая безопасность.....	118
5.4	Безопасность в чрезвычайных ситуациях .....	119
5.4.1	Анализ вероятных ЧС, которые могут возникнуть в лаборатории при проведении исследований .....	119
5.4.2	Обоснование мероприятий по предотвращению ЧС и разработка порядка действия в случае возникновения ЧС .....	120
	Выводы по разделу .....	122
	Используемая литература.....	123
2.	Materials and methods .....	131
2.1	Obtaining samples .....	131
2.2	Post-processing methods.....	132
2.2.1	Sandblasting post-processing.....	132
2.2.2	Chemical etching .....	133
2.2.3	Ultrasonic vibration .....	134
2.3	Research methods .....	135
2.3.1	Scanning Electron Microscopy .....	135
2.3.2	Computed tomography .....	137
2.4	Mechanical tests .....	138

## Введение

Ткани человеческого организма имеют ограниченную способность к регенерации, которая снижается с возрастом. И в настоящее время проблема потери костной ткани может быть решена путем замены недостающей части кости специальными каркасами, т. е. костными имплантатами [1,2].

Данные имплантаты должны иметь определенные физико-механические и биохимические показатели. К главным механическим показателям относятся модуль Юнга структуры и материала, предел прочности и текучести, которые напрямую зависят от структуры и выбранного материала, дополнительным и не менее важным критерием для структуры имплантатов является минимально возможное количество концентраторов напряжений в структуре [3]. Учет вышеперечисленных критериев позволяет более точно прогнозировать поведение имплантата в организме человека при различных нагрузках, а также минимизировать риск его разрушения в процессе эксплуатации [2, 3].

Дополнительным важным критерием в применении имплантатов является взаимное расположение и размер пор структуры, что не только влияет на механические показатели структур, но и определяет успешность процесса их приживаемости в организме, а также прочность фиксации в необходимой области организма [1-3]. Это объясняется тем, что пористость имплантата необходима для обеспечения возможности прорастания костных клеток и сосудистой системы организма в объем каркаса [2, 3]. Костные клетки дополнительно фиксируют имплант в необходимом месте и положении, а вновь выросшие сосуды обеспечивают транспорт кислорода и питательных веществ [3-5].

Таким образом, архитектура готового изделия является одним из решающих факторов в выполнении комбинации механических и биологических требований [2-5].

Рассматривая применимость каркасов с точки зрения материалов, из которых они изготовлены, стоит отметить некоторые важные особенности: используемые материалы должны быть биосовместимы, иметь достаточную прочность, тепло- и электропроводность, иметь необходимые физико-химические свойства поверхности [4, 6, 7]. Указанным критериям свойств удовлетворяют титан и сплавы на его основе, что объясняет их широкую применимость в костном, зубном и суставном протезировании [2-7].

Суммируя вышесказанное, можно сделать вывод, что метод для создания протезов должен позволять задавать и выдерживать в процессе производства необходимый размер пор, а также иметь возможность работы с металлами.

Сохранять необходимые условия формы в процессе производства и работать с металлами позволяют аддитивные технологии (АТ). Одним из методов аддитивных технологий является электронно-лучевое плавление (ЭЛП). Данный метод заключается в послойном наплавлении металлического порошка, которое производится в вакуумной камере с помощью специального программного обеспечения. Данное программное обеспечение позволяет производить микропористые структуры с глобальными морфологическими свойствами, которые строго контролируются в процессе производства [2,5,7].

Также, для костных протезов необходимо высокое качество конечной поверхности, обеспечивающее сохранность запланированных механических свойств и более успешное прорастание сосудистых и костных тканей в объем каркаса, что является проблемой при данном методе производства [2-4,8].

Частицы порошка, которые были расплавлены неполностью, остаются на изготовленных каркасах припеченными к поверхности как внешней, так и внутрискелетной, т. е. в порах. Трудность вызывает удаление порошка с внутренней поверхности, которая возрастает при увеличении плотности сетки [7-9].

Очищение поверхности костных имплантатов необходимо для выполнения эксплуатационных условий [9]. Что становится возможным при проведении этапа постобработки [7,8,10,11]. Необходимо отметить, что данный

этап не должен ухудшать механические или физико-химические свойства образцов.

Таким образом, целью данной работы является разработка способов постобработки сетчатых металлических метаматериалов, полученных электронно-лучевым плавлением.

Для достижения поставленной цели необходимо выполнить следующие задачи:

1. Изучить особенности топологии трижды периодических поверхностей минимальной энергии (ТППМЭ) типа «гиرويد», обеспечивающей уменьшение количества концентраторов напряжений в синтезируемом сетчатом металлическом метаматериале;

2. Изучить и определить возможные методы постобработки сетчатого металлического метаматериала с гиرويدной топологией;

3. Определить наиболее подходящие способы постобработки сетчатой конструкции с гиرويدной топологией;

4. Осуществить постобработку выбранными способами;

5. Оценить влияние параметров постобработки сетчатой конструкции на микроструктуру с помощью сканирующей электронной микроскопии;

6. Оценить влияние параметров постобработки сетчатой конструкции на механические свойства с помощью механических испытаний;

7. Оценить влияние постобработки сетчатой конструкции на изменение формы и толщины стенок с помощью компьютерной томографии;

8. Сделать выводы о проделанной работе.

# 1 Литературный обзор

## 1.1 Аддитивные технологии

Аддитивные технологии (АТ) производства являются перспективными методами для изготовления изделий сложных форм путем послойного наплавления используемых материалов [1-4]. АТ предоставляют возможность изготавливать изделия со сложной геометрией с минимальной потребностью в последующей постобработке, используя широкий спектр возможных материалов с почти нулевыми отходами и обеспечивают большую свободу в проектировании производимых изделий, что позволяет дизайнерам и инженерам создавать уникальные продукты.

На данный момент в производстве доступно большое количество процессов аддитивных технологий, которые различаются способами нанесения слоев для создания деталей. Также, возможно разделение данных методов по принципам работы: какие-то методы предполагают работу в высоком вакууме, а другие – в среде инертного газа или в открытой атмосфере [7]. По используемым материалам: одни работают с металлами, а другие с полимерами и пр. По форме и состоянию используемых материалов, как правило, металлов: иногда в методах требуется использование проволоки в качестве исходного материала, а иногда – порошка. Источник энергии, осуществляющий плавление слоев при работе с металлами, может представлять собой лазер или электронный луч. Каждый метод имеет свои преимущества и недостатки [8].

Наиболее быстро развивающимися технологиями среди аддитивных методов на сегодняшний день являются селективное лазерное спекание/плавление и электронно-лучевое плавление. В данной работе методом, используемым для производства исследуемых образцов, являлся метод электронно-лучевого плавления [4,6-9].

## 1.2 Электронно-лучевое плавление

Электронно-лучевое плавление – один из методов аддитивных технологий, позволяющий при послойном плавлении металлического порошка создавать изделия. Данная область технологий имеет множество преимуществ при проектировании и производстве, например, короткое время исполнения, возможность создания изделий сложной геометрии и отсутствие необходимости в дополнительных инструментах [12]. Электронно-лучевое плавление выполняется с применением высокоэнергетического электронного луча в качестве движущегося источника тепла для обеспечения плавления частиц металлического порошка, остывание которого посредством самоохлаждения приводит к формированию требуемой геометрии. Траектория хода луча и необходимые параметры процесса задаются с помощью программного обеспечения, а требуемая геометрия готовых изделий прописывается в компьютерной модели, создаваемой человеком. Возможность прямого изготовления металлических деталей может значительно ускорить проектирование и разработку продуктов в широком спектре областей, связанных с металлическими изделиями сложных форм, тонких сетчатых структур, наличием внутренних полостей и каналов, которые сложны в изготовлении классическими способами производства [12, 13].

Производственные машины для метода ЭЛП были впервые коммерциализированы в 1997 году корпорацией Argam AB в Швеции [14]. Поскольку ЭЛП обладает множеством уникальных характеристик, таких как высокая энергоэффективность, высокая скорость сканирования и умеренные эксплуатационные расходы, в последние годы данная технология привлекла повышенный интерес в различных отраслях промышленности [13]. Использование электронного луча предлагает широкие возможности, такие как более высокая скорость сборки за счет увеличенной глубины проникновения и высокой скорости сканирования [12].

Источником электронов в данном методе является нагретая до высоких температур вольфрамовая нить, находящаяся в верхней области электронной пушки (рисунок 1).

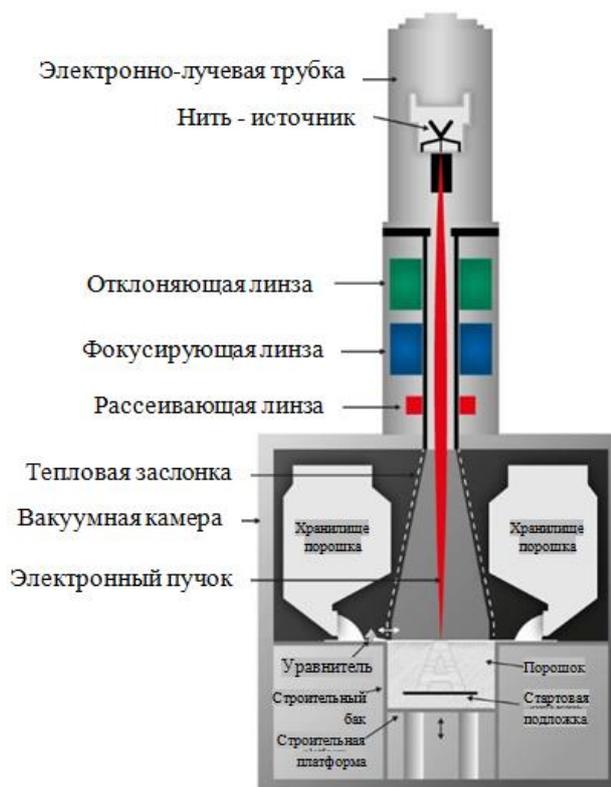


Рисунок 1 – Схематичное представление устройства установки для метода ЭЛП

Вольфрамовая нить испускает электроны, которые коллимируются и ускоряются до кинетической энергии около 60 кэВ, образуя электронный пучок. Электронный пучок контролируется двумя магнитными катушками, расположенными в нижней области колонны электронно-лучевой пушки. Первая линза – магнитная, фокусирует луч до нужного диаметра, а вторая – отклоняет сфокусированный луч в нужную точку на строительной платформе. Сама электронно-лучевая пушка неподвижна. Ток пучка регулируется в диапазоне от 1 до 50 мА, диаметр луча можно сфокусировать до 0,1 мм [14].

Сырьем, используемым в ЭЛП, является металлический порошок. Характеристики и качество порошков сильно влияют на производительность

процесса. Обычно используются порошки с диаметром от 45 до 100 мкм. Типичная толщина слоя находится в диапазоне от 0,05 до 0,2 мм.

Электронный луч с компьютерным управлением сканирует слой порошка по заранее заданной через программное обеспечение схеме и объединяет желаемые области в твердые и плотные металлические конструкции благодаря плавлению [15]. В начальном этапе плавления должно быть произведено сканирование поверхности лучом с высокой скоростью (порядка 2 м/с) в несколько проходов для предварительного нагрева порошков до спеченного состояния, в то время как сканирование луча порядка  $\sim 0,5$  м/с используется во время цикла плавления. Затем поверх уже расплавленной области укладывается новый слой порошка и процесс сканирования повторяется до тех пор, пока не будут завершены все слои [14, 15].

Весь процесс проходит в высоком вакууме. Типичное давление остаточных газов в установке составляет  $10^{-1}$  Па в вакуумной камере и  $10^{-3}$  Па в электронной пушке [15]. В процессе плавления низкое давление инертного газа гелия ( $10^{-1}$  Па) добавляется в вакуумную камеру, чтобы избежать накопления электрических зарядов в порошках [14].

Когда все слои прошли этап плавления, полученное изделие оставляют остывать внутри технологической камеры, которая затем заполняется гелием для облегчения охлаждения [15].

### **1.3 Требования к сетчатым материалам**

Несмотря на то, что АТ позволяют создавать изделия необходимых параметров, применение данных изделий без этапов постобработки затруднено. Это объясняется наличием высоких требований, предъявляемых к данным конструкциям.

В костной инженерии невозможное прямое применение готовых изделий без этапа постобработки связано с несколькими трудностями, указанными ниже.

Несоответствие модуля упругости между изделиями и прилегающими костями является основной проблемой для хорошей фиксации имплантационных материалов к костной ткани [16]. В то время как имплантаты должны иметь низкий модуль упругости, чтобы соответствовать модулю кости, они должны быть прочными и достаточно долговечными, чтобы выдерживать прикладываемые к ним физиологические нагрузки. Также, предполагается, что они будут надежно служить в течение длительного периода [17, 18].

На сегодняшний день данная проблема может быть решена использованием титана и сплавов на его основе, в частности, Ti-6Al-4V, который широко применяется для несущих имплантатов из-за выдающейся механической прочности и превосходной биосовместимости [3–7]. Однако несоответствие жесткости твердого Ti-6Al-4V и костной ткани достаточно велико. Чтобы решить эту проблему, в качестве костных имплантатов применяются открытые ячеистые пены или пористые каркасы для уменьшения модуля упругости имплантатов.

Поверхностные характеристики материалов влияют на адгезию остеобластов к биоматериалам; следовательно, пористость, форма пор и размер пор имплантатов играют решающую роль в прорастании кости [16]. Открытые ячеистые пены или каркасы с взаимосвязанной структурой пор также могут обеспечивать транспортировку жидкостей организма и обеспечивать лучшую биологическую фиксацию, способствуя врастанию костной ткани в поры имплантатов, а также обеспечивают плавную передачу напряжения между имплантатами и костями [8, 9]. Что указывает на необходимость наличия открытой пористой структуры с отсутствием легко отделимых частиц, которыми являются частицы порошка, спеченные с поверхностью изделий в процессе производства.

## 1.4 Метаматериалы

Метаматериалы – это особый класс материалов с необычными или новыми комбинациями механических и физических свойств. Механические свойства таких материалов напрямую связаны с их топологической конструкцией и типом материала. Термин «метаматериалы» был предложен для описания механических свойств ячеистых структур [19]. Метаматериал можно рассматривать как механическую структуру, при описании его мелкомасштабных свойств. В то же время, он рассматривается, как однородный материал при анализе макроскопических свойств. В этом смысле предполагается, что метаматериал представляет собой непрерывную среду, и для характеристики его механического поведения предлагается использовать модули упругости.

При обсуждении механических свойств метаматериала принято различать три шкалы [20]:

1. макроскопический уровень, на котором пористый материал рассматривается как однородное твердое тело;
2. мезоскопический уровень, на котором пористый материал рассматривается как двухфазный материал с мезоструктурой, состоящей из однородного твердого основного материала и пустым пространством (отверстия);
3. микроструктурный уровень, на котором учитываются неоднородности (например, структура поликристаллических зерен или микропористость) в основном материале.

Нередко объектами исследований являются металлоконструкции с традиционной топологией, где ребра основного элемента сетки расположены под различными углами, а основное внимание уделено обсуждению влияния геометрии получаемых материалов на их функциональные свойства.

Строение легковесных изделий, с помощью методов АТ, может быть весьма разнообразным и, главным образом, зависеть от параметров технологического процесса изготовления. Опираясь на исследования ведущих мировых научных коллективов последнего десятилетия, следует выделить следующие виды пористых материалов, получаемых с помощью аддитивных технологий:

- 1) металлическая пена, ячеистая структура которой содержит большое количество равномерно распределенных пор и перемычек;
- 2) проволочные сетки, состоящие из проволок необходимых размеров, расположенных под разным углом, образующих ячейки разной формы;
- 3) трехмерные регулярные сетки листовой топологии, включающие в себя ячейки, состоящие из листов, примером которых могут служить сотовые структуры.

Структуры с регулярной трехмерной листовой топологией вызвали интерес в качестве нового подхода к проектированию листовых пористых каркасов для тканевой инженерии. При изучении бионических принципов, лежащих в основе выбора конструкций новых материалов, сочетающих в себе высокие прочностные характеристики и малый вес, особое внимание заслуживают поверхности минимальной энергии. При этом, использование АТ, позволяет получать пористые легковесные изделия широкого спектра применения с бионическими структурами, состоящими из периодически повторяющихся элементарных ячеек с минимальной поверхностью.

Первое упоминание о топологии трижды периодических поверхностей минимальной энергии было сделано немецким математиком Шварцем в 1865 году, где он представил поверхности типа «Алмаз» [21]. Спустя почти 100 лет после того, как Шварц представил эту поверхность, поверхность типа «гирийд» была открыта Шоэном в 1970 году [19].

Трижды периодические поверхности минимальных энергий (ТПМЭ) описывают периодически транслированные бесконечные структуры по трем независимым осям координат с нулевой средней кривизной поверхности

(вогнутая и выпуклая кривизны симметричны во всех точках). Нулевая кривизна ТППМЭ привлекает внимание, поскольку улучшает несущую способность конструкции [21]. Хорошо известными ТППМЭ являются ячейки типа «гирийд» (рисунок 2, 3), «примитив» (рисунок 4, 5) и «алмаз» (рисунок 6) и т.д. [22]. ТППМЭ может быть реализована для получения пористых структур двумя способами.

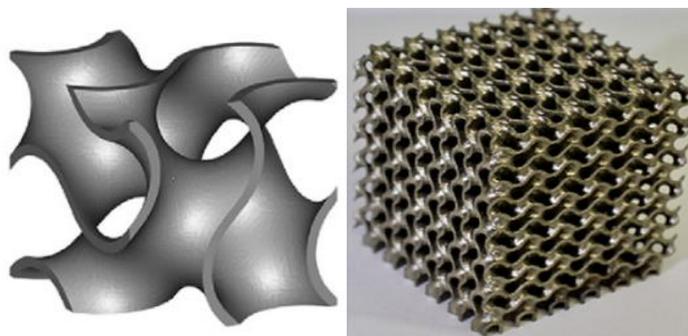


Рисунок 2 – Листовые структуры ТППМЭ на основе ячейки «гирийд» [24]

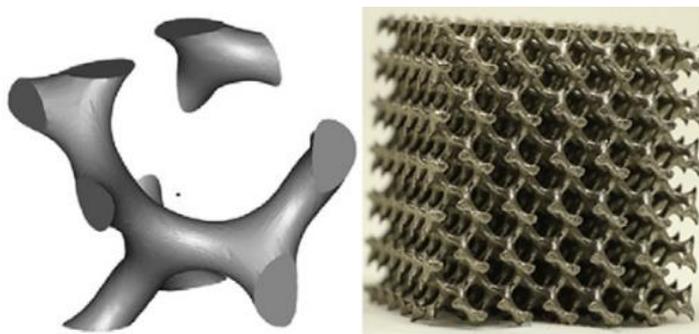


Рисунок 3 – Стержневые структуры ТППМЭ на основе ячейки «гирийд» [24]

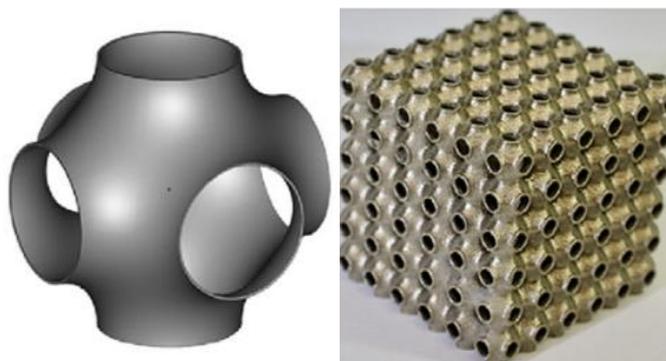


Рисунок 4 – Листовые структуры ТППМЭ на основе ячейки «примитив» [24]

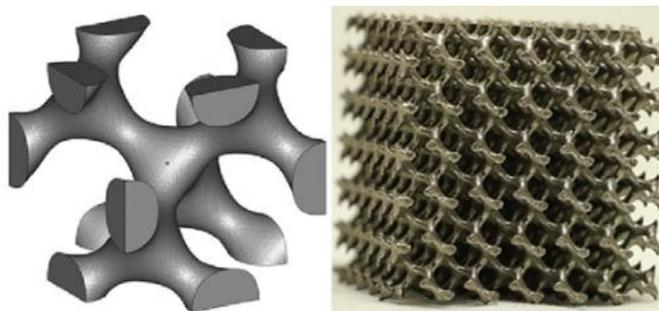


Рисунок 5 – Стержневые структуры ТППМЭ на основе ячейки «примитив»[24]

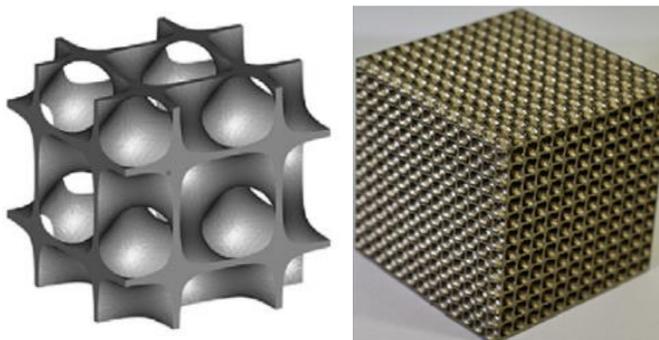


Рисунок 6 – Листовые структуры ТППМЭ на основе ячейки «алмаз» [24]

1) Листовые сетки представляют собой структуру, в которой единая и непрерывная плоскость ТППМЭ имеет определенную толщину на всем протяжении. В этой стратегии относительная плотность клеточной структуры контролируется указанной толщиной и константой уравнения. Предполагается, что целостность листовой структуры ТППМЭ обеспечивает более высокую прочность и устойчивость к повреждениям за счет эффективного препятствования распространению трещин [23]. Для распространения трещин в сплошных пористых листовых структурах требуется больше энергии по сравнению со стержневыми структурами. Пористые листовые конструкции на основе гироида имеют более высокий модуль Юнга, пиковое напряжение и ударную вязкость по сравнению с гироидными стержневыми структурами [24]. Листовые гироидные конструкции имеют более высокую жесткость, чем стержневые с той же пористостью и изготовленные из того же материала [25]. Изучение листовых структур на основе ТППМЭ листов представляет большой

интерес для биомедицинских приложений, поскольку производство имплантатов с пористыми элементами является одним из основных направлений технологии электронно-лучевого плавления.

2) Стержневые сетки представляют собой структуру на основе стержней с плавным полукруглым переходом между ними [26]. Такая структура создается путем заполнения одного из двух полупространств, разделенных топологией ТППМЭ, и относительная плотность контролируется только константой уравнения [27]. Она используется для преодоления концентраторов напряжений в местах сочленения стержней, характерных для элементарных ячеек с прямыми стержнями на основе многогранников. Пористые конструкции, в которых используются прямые стержни, в местах сочленений имеют концентраторы напряжений, особенно в местах соединений под острым углом. Это может привести к полному разрушению соответствующих элементов конструкции [28]. Стержневые структуры ТППМЭ на основе балок имеют гладкие полукруглые соединения между горизонтальными и вертикальными элементами по сравнению с традиционными стержневыми конструкциями на основе многогранников.

### **1.5 Методы постобработки сетчатых металлических конструкций и их особенности**

Постобработка титановых образцов необходима для понижения шероховатости поверхности и удаления остаточных частиц порошка, находящихся в порах образцов. Наличие частиц порошка в порах обуславливается двумя основными факторами: сложной формой объемной поверхности и сплавлением частиц порошка с объемной поверхностью в процессе производства.

Методами постобработки, рассматриваемыми в данном разделе, являются химическое травление, лазерная и пескоструйная полировки поверхности.

Рассматривая метод химического травления, стоит отметить работу [1], в которой исследовалась эффективность химической полировки в удалении спекшихся частиц порошка из пор, а также в снижении шероховатости поверхности. Материалом исследования являлись образцы титанового сплава CP-Ti 4 класса, изготовленные методом аддитивных технологий селективным лазерным сплавлением (СЛС), представляющие собой пористые каркасы с тремя различными размерами пор, равными 200 мкм, 500 мкм и 200 + 500 мкм, а также структуры алмазного типа. Размер частиц порошка находился в диапазоне 10–45 мкм, фотография образцов представлена на рисунке 7.

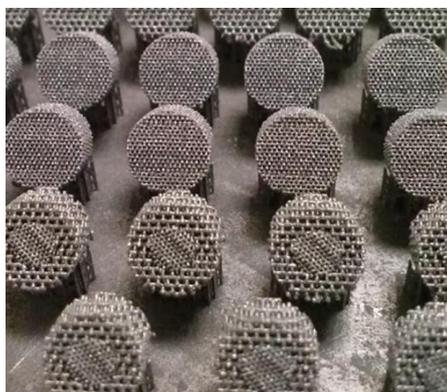


Рисунок 7 – Серия титановых скэффолдов с различными размерами пор, изготовленных в одной рабочей партии [1]

Для удаления не полностью расплавленных частиц титана образцы были химически отполированы в растворах с различными концентрациями таких кислот, как HF и HF-HNO<sub>3</sub>. Выбор химического травления, как метода последующей обработки, обуславливается небольшим размером пор. В работах [2 - 5] сообщалось, что эффективность данного метода напрямую зависела от состава и концентрации кислот.

Химическое травление проводилось в растворах плавиковой кислоты с концентрациями 1–5% HF и временем выдержки 1–6 минут, а также в смесях

плавиковой и азотной кислот (2,0 / 20%), (1,3 / 9,0%), (4,0 / 16%), (2,2 / 20%) HF/HNO<sub>3</sub>, соответственно, в течение 3–9 мин. Каждый образец полировали в отдельном сосуде с использованием ультразвуковой ванны (20 кГц) для очистки.

В результате исследования, для всех образцов был выбран подходящий состав ванны для каждого размера пор. Обработка происходила в течение 6 минут в ваннах с растворами 2,0%HF/20%HNO<sub>3</sub> и 1,3%HF/9,0%HNO<sub>3</sub> для пор 200 мкм и 500 мкм структуры, соответственно. Оптимизация состава ванны для структуры 200 + 500 мкм показала, что более эффективное и равномерное удаление нерасплавленных частиц происходит в растворе 2,2%HF/20%HNO<sub>3</sub> в течение 6 мин [1].

Изменение масс образцов, которые были протравлены в ваннах, составляло 28%, 64% и 43% для структур 200 мкм, 500 мкм, 200 + 500 мкм соответственно. Наибольшая потеря массы в результате обработки наблюдалась для образцов, размер пор которых был равен 500 мкм, независимо от состава используемых ванн. Это может быть связано с тем, что во время полировки наблюдалось очень высокое образование водорода, которое могло препятствовать проникновению кислоты по порам вглубь образца [1].

Состояние поверхности образцов до и после данной обработки показано на рисунке 8. Метод химической полировки позволил удалить частицы порошка с поверхностей пор образцов.

Показатели прочности на сжатие и модуля Юнга снизились после полировки для всех образцов, что подтверждается общим увеличением пористости, приводящим к снижению модуля Юнга [6, 7]. Однако уменьшение данных показателей было более выраженным для образцов с размерами пор равными 500 мкм. Их прочность на сжатие после полировки снизилась более чем в 4 раза. Значения модуля Юнга до химической обработки были 6,1 ГПа, 5,4 ГПа и 4,6 ГПа для размеров пор 200 мкм, 500 мкм и 200 + 500 мкм, соответственно.

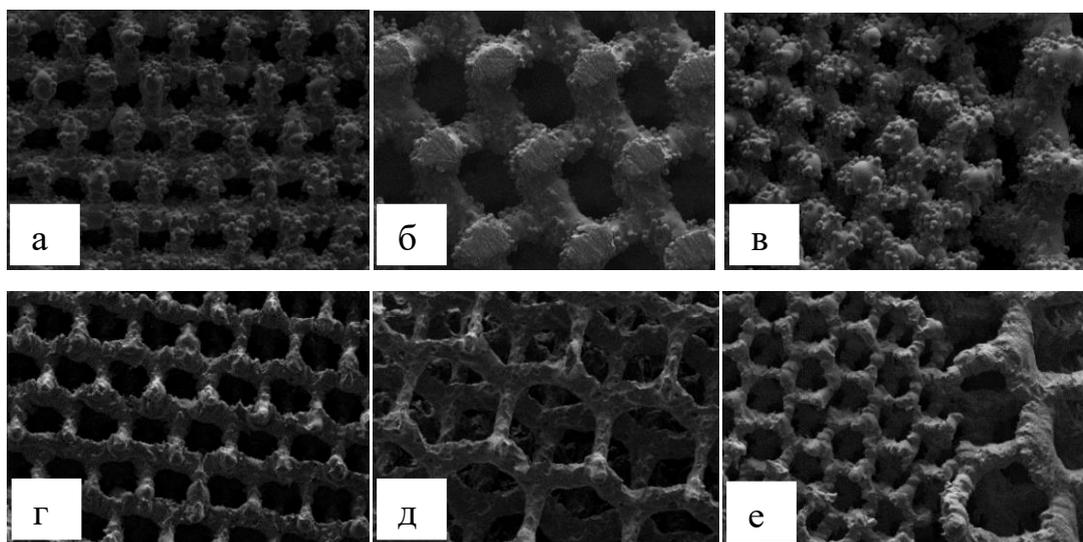


Рисунок 8 – Вид поверхности образцов до травления с размерами пор, равными а) 200 мкм; б) 500 мкм; в) 200 + 500 мкм, и после травления в растворах HF/HNO<sub>3</sub> в течение 6 минут: г) 200 мкм – 2,0% HF/20% HNO<sub>3</sub>; д) 500 мкм – 1,3% HF/9,0% HNO<sub>3</sub>; е) 200 + 500 мкм – 2,2% HF/20% HNO<sub>3</sub> [1]

В работе [8] также описывается метод химического травления для удаления спекшихся с поверхностью образцов частиц порошка и уменьшения шероховатости поверхности с помощью смеси азотной и плавиковой кислот. В данной работе было исследовано влияние химического травления на образцы сплава Ti-6Al-4V, полученные с помощью СЛС, частицы порошка сплава не превышали в размере 50 мкм.

Авторы данной работы утверждают, что титан и его сплавы требуют для травления применение достаточно агрессивных кислот, чтобы удалить оксидные пленки алюминия и титана с поверхности. Именно поэтому комбинация таких кислот, как HF и HNO<sub>3</sub>, наиболее часто встречается в работах по химической постобработке. Но соотношения обеих кислот в растворе должны быть тщательно подобраны, так как это влияет на скорость травления и на количество водорода, поглощенного сплавом Ti-6Al-4V.

Поглощение водорода объясняется его выделением, как продукта химической реакции, происходящей при травлении. Так как азотная кислота (HNO<sub>3</sub>) реагирует с титаном, авторами данной статьи было обнаружено, что чем

больше количество  $\text{HNO}_3$  в составе раствора, тем меньше водорода выделяется и, соответственно, способно поглотиться. И далее авторами работы было сделано предположение, что отношение  $\text{HF}$  к  $\text{HNO}_3$  должно быть 1:10 для уменьшения поглощения водорода, что понижает риск возникновения поверхностного водородного охрупчивания.

В данной работе травление происходило в водном растворе кислот: 2 мол.%  $\text{HF}$  и 20 мол.%  $\text{HNO}_3$ . Объем смеси и время травления были следующими: 200 мл в течение 90 с, 200 мл в течение 120 с, 400 мл в течение 90 с и 400 мл в течение 120 с [8]. После каждого процесса травления образцы промывали шесть раз в деионизированной воде и сушили с помощью потока азота [8].

Результаты показывают, что объем раствора, применяемого для обработки, не влияет на количество удаляемого материала. Но влияние оказывает время травления: чем дольше образцы находятся в контакте со смесью кислот, тем более явным оказывается их влияние на поверхность.

Итоговые условия авторами для дальнейшей постобработки были выбраны следующие: 400 мл смеси кислот и контакт образца с данной смесью в течение 90 и 120 с. Результаты травления представлены на рисунке 6. Для оценки эффективности данной постобработки образцы были залиты эпоксидной смолой, в результате чего были зафиксированы и частицы порошка, оставшиеся в объеме образцов. После чего образцы были разрезаны и проанализированы на наличие частиц после травления.

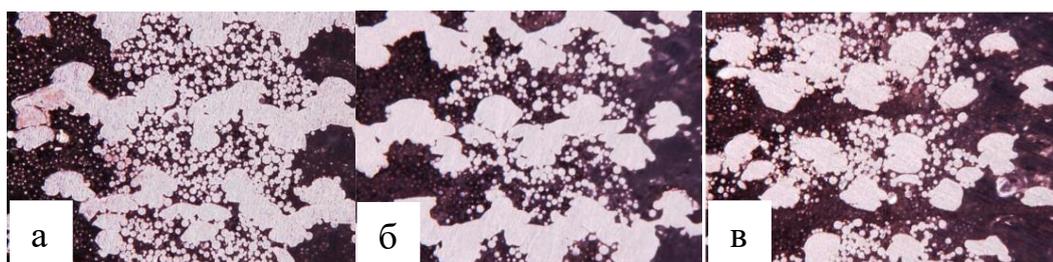


Рисунок 9 – Вид образцов в сечениях а) не травленных, б) травленных 90 секунд и в) травленных 120 секунд [8]

Как видно из рисунка 9, полного удаления частиц порошка не произошло. Исходя из этого, авторы данной работы делают следующий вывод: продолжение обработки травлением до полного удаления частиц порошка из пор, находящихся в объеме образцов, приведет, скорее всего, к нарушению целостности структуры [8].

В работе [9] в качестве постобработки образцов из титанового сплава Ti-6Al-4V, изготовленных с помощью СЛС, авторы используют составной метод, состоящий из нескольких этапов. Первоначальный вид образцов представлен на рисунке 10.

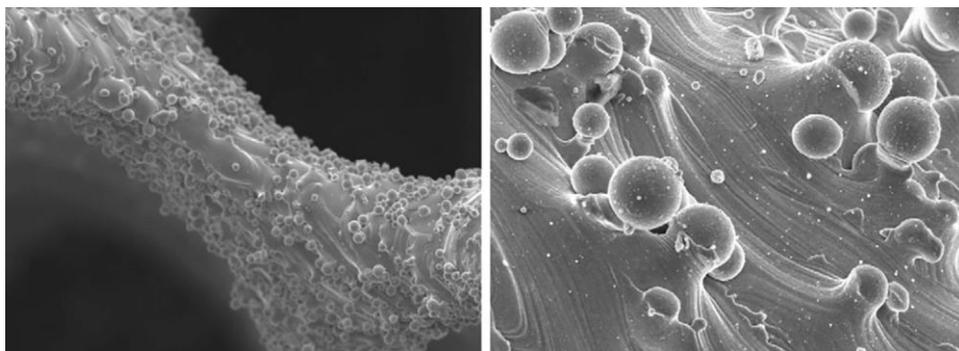


Рисунок 10 – СЭМ-изображения исходного состояния поверхности образцов в работе [9]

Этапы данной работы заключаются в следующем: сначала образцы были промыты этанолом в ультразвуковой ванне для очистки и просушены при 100 °С, затем образцы были протравлены в 37% HCl в атмосфере инертного газа Ar в течение 90 минут при 50 °С, а после чего – в течение 60 минут при 40 °С. При следующем этапе образцы были оставлены в 10 мольном водном растворе щелочи NaOH при 60 °С в течение 24 ч, после чего промыты дистиллированной водой и просушены при 100 °С [9].

Пескоструйная обработка являлась дальнейшей ступенью в данной работе. По итогам двух этапов почти все спеченные частицы порошка были удалены с поверхности пор. Но пескоструйная обработка создала множество трещин, размер которых находился в диапазоне 1–5 мкм. Благодаря этапу

травления в кислоте HCl, поверхность стала относительно однородной и гладкой [9].

Травление в NaOH привело к коррозии поверхностей, в результате чего на поверхности образовалось множество небольших впадин с диаметром от 2 до 10 мкм.

На рисунке 11 представлено состояние поверхности после каждого из этапов. Травление было необходимо для модификации поверхностного химического состава для лучшей пролиферации костных клеток. Положительного влияния данного этапа постобработки на поверхность образцов не было выявлено.

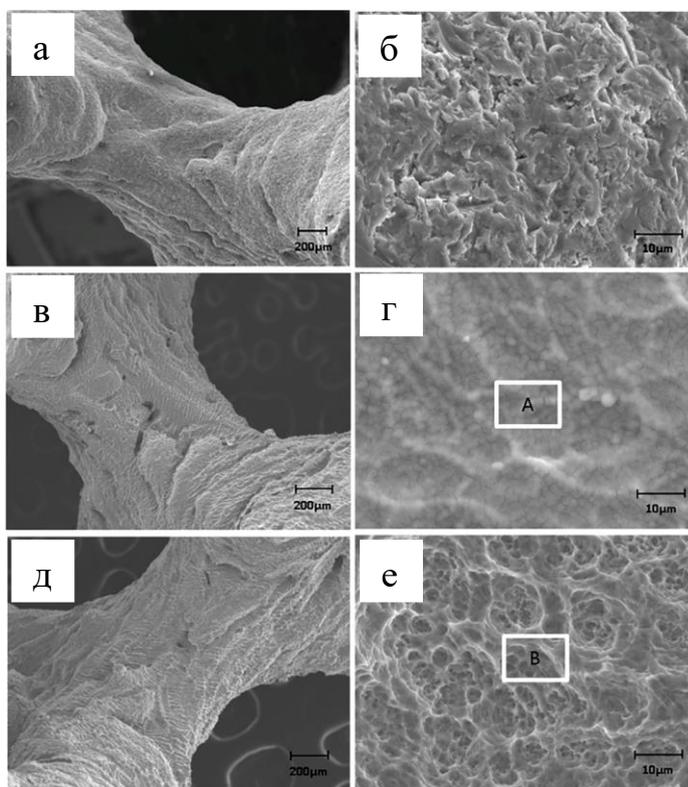


Рисунок 11 – Морфология поверхности образцов Ti-6Al-4V после различных модификаций поверхности: а) и б) термообработка + пескоструйная обработка, в) и г) термообработка + пескоструйная обработка + модификация HCl, д) и е) термическая обработка + пескоструйная обработка + HCl и последующие модификации NaOH [9]

В работе [10] представлены такие методы постобработки, как химическое травление и электрохимическая полировка. Образцы, с которыми проводилась данная работа, были изготовлены из титанового сплава Ti-6Al-4V.

Этап химического травления проводился для удаления спекшихся частиц порошка с поверхностью самих образцов. Авторы данной работы утверждают, что для сплавов на основе титана одной из самых эффективных кислот для травления является плавиковая кислота HF. Соответственно, в данной работе именно HF использовалась в качестве кислоты для травления [10].

После этапа предварительной подготовки образцы были опущены в раствор на основе плавиковой кислоты HF и оставались погруженными в течение 10 минут. Установленное время в 10 минут и состав ванны для травления описывается авторами, как оптимальное соотношение качества поверхности и скорости травления. Состав раствора для травления состоял из 0,5 мл HF и 50 мл H<sub>2</sub>O. После химической полировки пористые структуры промывали деминерализованной водой, затем этанолом, а после чего сушили на воздухе [10].

Этап электрохимической полировки был выполнен для дополнительного уменьшения шероховатости поверхности. Исследуемый образец (анод) был подключен к платине (проволока, диаметр 30 мм) и погружен в пластиковый стакан, заполненный 100 мл электролита. Цилиндрическая платиновая емкость (30 мм диаметром и 40 мм в высоту) использовалась в качестве катода. Оба электрода были подключены к источнику постоянного тока с плотностью тока 1,2 мА /мм<sup>2</sup>. Электролит был приготовлен путем смешивания в заданных количествах следующих реагентов: 55 мл CH<sub>3</sub>COOH, 30 мл H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, 15 мл HF. Образцы выдерживались в электролитической ванне в течение 8 минут. После полировки пористые структуры были немедленно промыты в деминерализованной воде, затем в этаноле и просушены на воздухе [10].

На рисунке 12 представлена поверхность образцов и ее состояние в исходном виде, после химического травления, после химического травления и электролитической полировки, в порядке их расположения, соответственно.

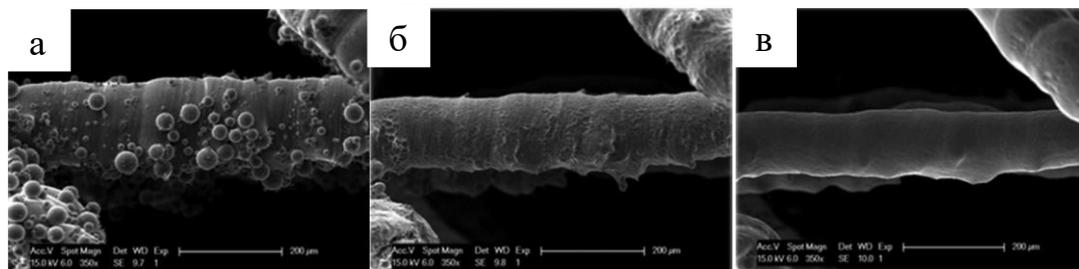


Рисунок 12 – Состояние поверхности одного из исследуемых образцов а) исходное, б) после химического травления, в) после химического травления и электролитической полировки [10]

Как видно из рисунка 12, после этапа химического травления спекшиеся частицы порошка удаляются с поверхности не полностью, а поверхность все еще остается шероховатой. После же комбинации двух этапов поверхность освобождена от частиц, а шероховатость снижена.

В дальнейшем был добавлен еще один этап постобработки, представлявший собой повтор химического травления. Результаты трехступенчатой постобработки представлены на рисунке 13.

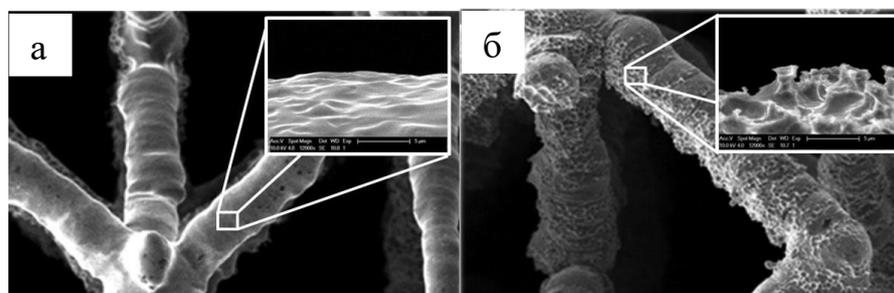


Рисунок 13 – Состояние поверхности образцов а) после двух этапов постобработки, б) после трех этапов постобработки, где третьим этапом является повторение химического травления [10]

Стоит отметить, что в большинстве работ перед началом основной обработки проводится продувка образцов потоком газа (аргона) под давлением 5 бар для удаления из объема образцов свободных или слабосвязанных частиц порошка.

Рассматривая лазерную полировку, как метод постобработки, обратим внимание на работы [11, 29-31]. Лазерная полировка поверхности представляет собой метод постобработки, заключающийся в последовательном прохождении луча лазера по поверхности. При этом лазерный луч нагревает поверхность, что приводит к расплавлению пиков шероховатости, соответственно, снижая ее. Принцип выполнения представлен на рисунке 14. Результаты снижения шероховатости с помощью лазерной полировки представлены на рисунке 15.

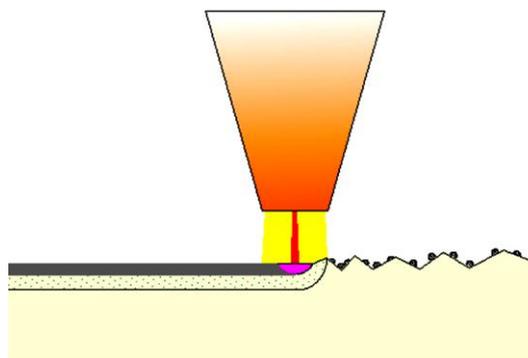


Рисунок 14 – Принцип выполнения обработки поверхности с помощью лазерного полирования [11]

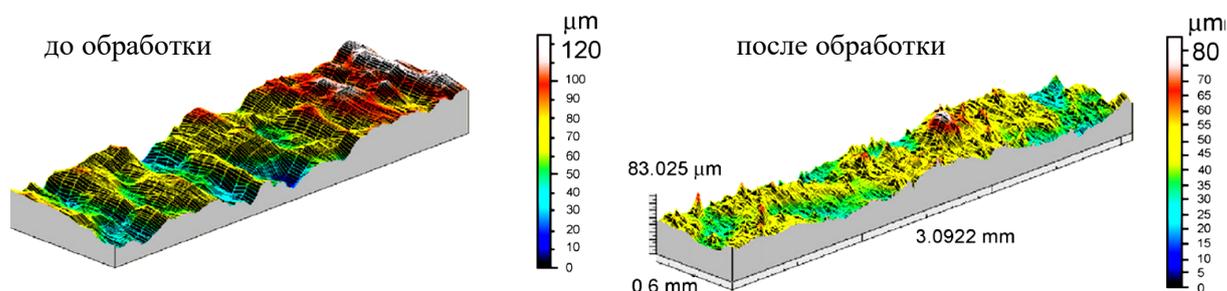


Рисунок 15 – Состояние исследуемой поверхности до и после обработки лазерной полировкой [11]

Из рисунка 15 видно, что шероховатость поверхности уменьшилась. Так же заметно, что исследуемый образец имеет поверхность параллельную основе

образца. Аналогичный эффект наблюдается в статьях [29-31], где образцы, которые представлены на рисунках 16 – 18, из титана и его сплавов, полученные методом селективного лазерного сплавления, были подвергнуты обработке лазерным плавлением для очистки поверхности от спеченных частиц порошка.

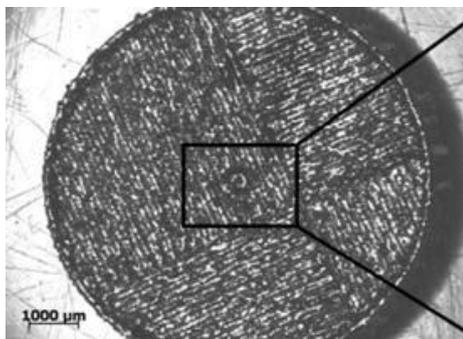


Рисунок 16 – Тип титановых образцов, используемых в работе [29]

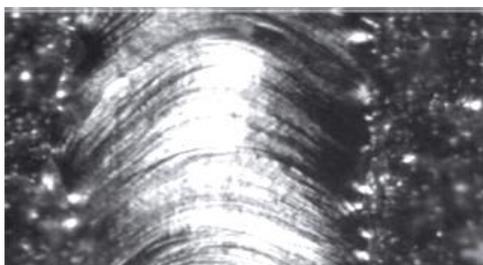


Рисунок 17 – Тип титановых образцов, используемых в работе [30]

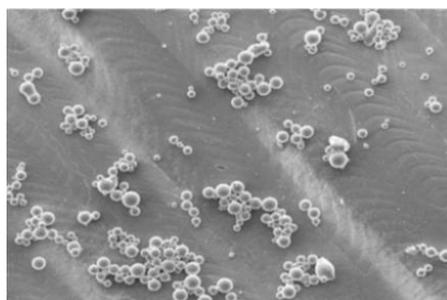


Рисунок 18 – Тип поверхности титановых образцов, используемых в работе [31]

Из рисунков 16–18 можно видеть, что образцы в данных работах, имеют плоские, параллельные основанию образца поверхности, при этом поры в данных образцах отсутствуют. Также, делая вывод по данным работам о методе лазерного полирования, можно отметить, что данный тип обработки подходит только для поверхностей простых форм.

В работе [32] для снижения шероховатости поверхности и удаления спекшихся частиц порошка рассматривается метод пескоструйной обработки. В качестве образцов использовали сетчатые кубы со стороной, равной 40 мм (рисунок 19).

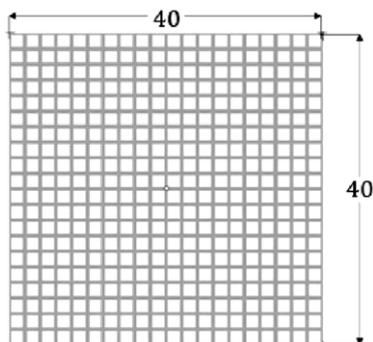


Рисунок 19 – Вид образцов, используемых в работе [32]

Результаты пескоструйной обработки, как отмечают авторы, приводят к удалению 98% частиц порошка. Столь высокая эффективность данного метода может быть объяснена относительно простой формой образцов в данном исследовании.

Из вышесказанного можно сделать вывод, что самым удачным методом постобработки поверхности сложной формы, благодаря высокой проникающей способности, является химическое травление, возможно, с добавлением электролитического травления, в то время как методы лазерной и пескоструйной полировки эффективны для менее сложных форм.

## 2 Материалы и методы

### 2.1 Получение образцов

Образцы кубической формы со стороной поверхности 15 мм и ТППМЭ типа «гирийд» были получены методом ЭЛП на установке ARCAM2 EBM компании ARCAM, АВ (Möln dal, Швеция) с применением порошка титанового сплава Ti-6Al-4V, с использованием стандартных настроек параметров решетчатых структур с толщиной слоя 50 мкм и температурой предварительного нагрева 720 °С (рисунок 20). Диаметр частиц порошка находился в диапазоне от 45 до 100 мкм. Модели были экспортированы из Mathematica в формат STL с плотностью полигональной сеткой по умолчанию.

Используя программное обеспечение Wolfram Mathematica, было произведено визуализирование внешнего вида ТППМЭ типа «гирийд», описанного следующим уравнением:

$$\sin(kx)\cos(ky) + \sin(ky)\cos(kz) + \sin(kz)\cos(kx) = 0 \quad (1)$$

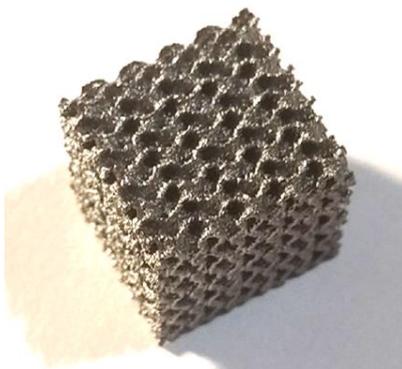


Рисунок 20 – Пример исследуемых образцов

Пределы поверхности выбирались от  $-5/2 \pi$  до  $5/2 \pi$  во всех направлениях. Вся структура при  $k$ , равном 2, состоит из шести элементарных ячеек, дублированных по каждому координатному направлению (X, Y, Z), соответственно, что дает общий размер структуры 15 мм × 15 мм × 15 мм.

Образцы с толщиной 0,2, 0,4 и 0,6 мм были сконструированы на основе уравнения «гирида» с  $k = 2$ . Эти значения толщины были выбраны, чтобы избежать самопересечения конструкции. Толщина стенок равна 1,4, 1,2, 1,0 мм для конструкций толщиной 0,2, 0,4 и 0,6 мм соответственно. Столь малое расстояние приводит к появлению захваченного порошка внутри образцов.

## **2.2 Методы постобработки**

Для удаления захваченного порошка из внутреннего объема трехмерной конструкции с топлогией ТППМЭ в данной работе было использовано три метода: пескоструйная постобработка, ультразвуковое воздействие, химическое травление.

### **2.2.1 Пескоструйная постобработка**

Одним из стандартных методов постобработки является традиционный метод очистки пористых структур, предложенный компанией Arcam, называемый системой восстановления порошка [8,32]. Метод системы восстановления порошка в русскоязычной литературе имеет название «пескоструйная обработка». Принцип действия данного метода заключается в воздействии на необходимую область поверхности направленным, и находящимся под большим давлением, потоком смеси инертного газа и абразивных частиц. В качестве абразивных частиц для имплантатов, изготовленных с помощью метода электронно-лучевого плавления, являются частицы порошка титанового сплава Ti-6Al-4V, который является исходным материалом для производства данных имплантатов. Использование данного порошка одновременно в качестве материала для изготовления имплантатов и в качестве абразивных частиц при пескоструйной обработке позволяет сократить расход порошка, так как высвобожденные частицы в последующем вновь

используются как материал для производства, и исключить загрязнение обрабатываемой поверхности любыми другими химическими элементами. Применяемый поток находится под высоким давлением равным 5 бар. Очистка поверхности от спеченных с нею частиц происходит благодаря наличию абразивных частиц, соударение первых со вторыми инициирует отрыв первых от поверхности, тем самым очищая ее. Эффективность данного метода значительно снижается при необходимости проникновения в узкие каналы или элементарные ячейки небольших размеров, а также при работе с многослойными конструкциями заметно резкое снижение величины давления от внешних слоев ко внутренним, что так же существенно влияет на эффективность данного метода [32].

Стандартная система восстановления порошка (пескоструйная обработка) Arcam EBM, производимая под давлением аргона 5 бар, была применена ко всем образцам после процесса производства.

Так как пескоструйная обработка – стандартный метод обработки изделий, изготовленных ЭЛП, производимый после этапа изготовления компанией Arcam, следует принимать обработанные данным методом исследуемые образцы ТППМЭ в качестве основы для сравнения с образцами, поверхность которых дополнительно была обработана другими методами.

### **2.2.2 Химическое травление**

Химическое травление – метод постобработки, который привлекает большое внимание различных исследователей для уменьшения шероховатости и очистки поверхностей от спеченных частиц [3,5,33]. Основным преимуществом химического травления по сравнению с другими классическими методами является возможность заполнения кислотным раствором имплантатов через структурные поры, что обеспечивает равномерное и практически единовременное воздействие на всю площадь поверхности. Результат проведения данного метода напрямую зависит от его параметров, к которым

относятся: материал изделия, плотность конструкции, состав раствора, концентрация кислот в растворе, температура раствора и окружающей среды, времени контакта изделий и травильного раствора.

Травление титана и сплавов на его основе должно проводиться в растворах достаточно сильных кислот таких, как HF и HNO<sub>3</sub>, что необходимо для удаления с поверхности оксидной пленки титана и алюминия, в случае работы со сплавом Ti-6Al-4V.

Также при химическом травлении пористых изделий с высокой структурной плотностью в большинстве случаев требуется применение магнитной перемешивающей машины для увеличения подвижности химического раствора в структурном объеме образцов. Это значительно увеличивает эффективность проникновения раствора в конструкцию.

В процессе химического травления возможно уменьшение толщины стенок имплантатов. Изменение толщины стенки влияет на общую пористость образца и приводит к изменению механических параметров. Поэтому данный метод требует особенно тщательного подбора параметров проведения.

В данной работе этап химического травления проводился в 50 мл водного раствора таких кислот, как HF и HNO<sub>3</sub> в соотношении 1:10 % от общего объема, соответственно. Состав раствора был выбран для уменьшения количества водорода, образующегося во время химической реакции, но и для поддержания активности кислот по удалению оксидных пленок титана и алюминия [4]. Снижение выделяемого водорода необходимо, так как его высокая концентрация может привести к водородному охрупчиванию поверхности [8].

Кислотный раствор был подготовлен отдельно для каждого образца. Время одного погружения в раствор кислоты для каждого образца составляло 3 минуты.

Для образцов с номинальной толщиной стенки 0,2 мм было выполнено 8 погружений. На этом этапе общее время травления составило 24 минуты. После снижения активности кислотного раствора образец оставляли в кислотном

растворе на 20 минут, что должно было привести к полировке поверхности. Время окончательного травления составило 44 минуты.

Для образцов с номинальной толщиной стенки 0,4 мм было выполнено 14 погружений с общим временем травления 42 минуты.

Для образца номинальной толщиной стенки 0,6 мм общее время составило 36 минут, что соответствует 12 погружениям. Важным отличием этого травления от других является обновление химического раствора после каждых 4 погружений. Таким образом, раствор обновлялся через 12 и 24 минуты травления. После каждого погружения все образцы трижды промывали дистиллированной водой.

### **2.2.3 Ультразвуковое воздействие**

Ультразвуковое воздействие (УЗВ) – это способ постобработки, заключающийся в контакте между подвижным наконечником исполнительного механизма и образцом. Данный метод осуществляется с применением профильных инструментов, высокочастотного механического движения наконечника механизма. УЗВ не включает в себя химические реакции и не относится к термическому типу, а также подходит для механической обработки электрически непроводящих и хрупких материалов заготовок, которые обычно трудно обрабатывать обычными методами обработки.

Принцип работы метода заключается в ультразвуковых колебаниях, которые генерируются сначала путем преобразования низкочастотной электрической энергии в высокочастотный электрический сигнал с использованием соответствующего генератора энергии, а затем в преобразование этого высокочастотного электрического сигнала в механические колебания порядка 20 кГц с помощью магнитострикционного или пьезоэлектрического преобразователя. Данные колебания передаются на образец благодаря контакту между образцом и вибрирующим наконечником. Инструмент вибрирует на ультразвуковых частотах в направлении, параллельном оси

инструмента, а общий ход колебаний составляет всего несколько сотых миллиметра [34].

Вышеуказанные волны ультразвуковой вибрации приводят к возникновению попеременно сжимающих и растягивающих напряжений, результатом чего и является эффект очистки поверхности от спеченных частиц порошка. Площадь контакта между спеченными частицами и поверхностью скэффолда невелика, и выступает в качестве точки, являющейся концентратором вышеуказанных напряжений, это приводит к сколу частицы при достижении критической величины для данной области [35]. Установка для выполнения данного этапа представлена на рисунке 21.



Рисунок 21 – Оборудование Sonic SwissBoster для выполнения УЗВ

Этап постобработки УЗВ был проведен для образцов со всеми значениями толщин стенок с помощью оборудования Sonic SwissBoster 35 кГц 1:1.5 Alu. Приводная головка УЗВ системы монтировалась на модифицированную стойку промышленного настольного сверла с добавленной армирующей нижней пластиной и креплением для ультразвуковой вибрационной головки. Электропитание от штатной системы УЗВ позволяло

регулировать мощность вибрации. Очистку выполняли в один этап путем осторожного сжатия плоских поверхностей образцов кубических образцов между лицевой стороной вибратора и нижней пластиной (эквивалентная сила ~ 5 Н) при переключении мощности в течение 15 секунд при 75% от максимальной мощности.

## **2.3 Методы исследования**

### **2.3.1 Сканирующая электронная микроскопия**

Сканирующая электронная микроскопия (СЭМ) – метод исследования, позволяющий при больших увеличениях получать информацию о состоянии исследуемой поверхности и приповерхностных уровней. В данном методе анализ поверхности происходит в высоком вакууме с применением пучка электронов высокой энергии, находящейся в диапазоне от 100 до  $30 \cdot 10^3$  эВ. Источником электронов является термокатод, как правило, состоящий из вольфрамовой проволоки. Размер электронного пятна, создаваемого пушкой, слишком велик для получения четкого изображения, что приводит к необходимости применения фокусирующих электромагнитных линз, которые также позволяют управлять положением луча на поверхности. Заключительной линзой в системе является собирающая, которая обеспечивает взаимодействие электронного луча с образцом и его проникновение на глубину 1 мкм для генерации сигналов, используемых для создания изображения [36].

Изображение образца формируется точка за точкой в зависимости от движения катушек сканирования, что приводит к перемещению электронного луча в дискретные точки в виде прямых линий, пока на поверхности образца не появится прямоугольный растр. Весь процесс зависит от необходимого увеличения. В случае, когда оператор запрашивает более увеличенное изображение, сканирующие катушки заставляют луч отклоняться на меньшей

площади. Следует отметить, что рабочее расстояние, то есть расстояние от последней линзы до поверхности образца, влияет на увеличение, которое в современных СЭМ решается с помощью автоматической настройки.

Детектор электронов предназначен для обнаружения испускаемых электронов (сигналов) от сканируемого образца. В отсутствие детекторов каждый сигнал, генерируемый взаимодействием между электронным лучом и поверхностью образца, может генерировать изображение, что приводит к возрастанию шума изображений. Как вторичные электроны, так и обратно рассеянные электроны используются в создании СЭМ изображений [36].

Когда положительное напряжение направлено на экран коллектора, происходит сбор как вторичных, так и обратно рассеянных электронов. Тем не менее, только последние будут собираться в случае отрицательного напряжения, приложенного к экрану коллектора.

Затем сигналы отображаются на экране просмотра, и оператор регулирует яркость, контрастность и интенсивность, пока не будет получено достаточно четкое изображение. Отсканированное изображение будет содержать большое количество информации о поверхности, если используются низкие ускоряющие напряжения менее (5 кВ). Напротив, высокие ускоряющие напряжения в диапазоне (15 – 30 кВ), которые проникают под поверхность, обеспечат, благодаря отраженному от поверхности сигнала, подробную информацию о состоянии внутренней части образца. Изображение, полученное с помощью, СЭМ, зависит от визуализации топографии образца с точки зрения формы, размера и текстуры поверхности, а также от количества двух типов электронов [36]. Для изучения влияния методов постобработки морфологию и микроструктуру поверхности образцов был произведен этап сканирующей электронной микроскопии (Quanta 200 3D, FEI Company).

### 2.3.2 Компьютерная томография

Рентгеновская компьютерная томография последние годы применяется для неразрушающих промышленных исследований качества готовых изделий [37]. Промышленное применение данной технологии получило развитие из-за растущей потребности в изучении качества сложных инженерных компонентов, таких как детали, полученные методами АТ [38]. Реконструкция данных компьютерной томографии позволяет продемонстрировать внешнюю и внутреннюю геометрию изделий, а также неоднородности в материале [37].

Принцип действия данного метода основывается на серии рентгеновских снимков, получаемых при вращении изделия на 360 градусов, которые затем реконструируются для создания 3D модели исследуемого объекта. Создаваемое рентгеновское излучение должно обладать достаточной энергией, чтобы проникнуть в исследуемый объект, а затем достигнуть детектора, где получают рентгеновские снимки [39]. В хорошо откалиброванной системе компьютерной томографии качество рентгенограмм зависит от характеристик рентгеновских лучей, настроек детектора и экспозиционного времени на рентгенограмму. Каждый пиксель рентгенограммы имеет процентное значение серого цвета, которое приравнивается к доле рентгеновских лучей, которые не были поглощены изделием [40,41]. После завершения сканирования рентгенограммы реконструируются с помощью алгоритма фильтрации обратной проекции, который преобразует рентгенограммы в трехмерное представление объекта. Алгоритм создает двумерные срезы через объект, которые в виде стека представляют объект как набор трехмерных пикселей, называемых вокселями [42-46]. Каждый воксель имеет соответствующее значение серого, которое представляет атомную плотность материала; воздух имеет самое низкое значение серого (черный), в то время как материалам с высоким атомным номером назначается более высокое значение серого (белый). Трехмерные данные могут быть проанализированы дополнительно для получения

информации о размерах, объемного анализа и другой количественной оценки [43].

Компьютерная томография была выполнена с использованием системы Sauervein при работе с рентгеновской трубкой напряжением 135 кВ, током 70 мА и размером вокселя 15,5 мкм. Данные обрабатывались с помощью программы FiJi ImageJ. Для анализа изображений и трехмерных параметров использовался программный пакет VG Studio Max 3.1 [44]. Для каждой объемной поры набор параметров, включая объем и сферичность, был определен с помощью инструмента анализа пор из VG Studio Max 3.1.

## **2.4 Механические испытания**

Квазистатические испытания на сжатие проводились с использованием универсальной испытательной машины INSTRON 3369 с тензодатчиком 50 кН, Illinois Tool Works Inc. Испытания образцов проводились в соответствии с ISO 13314: 2011 [47,48]. Направление нагрузки для образцов на сжатие было перпендикулярно направлению построения ЭЛП. Все механические испытания проводились при комнатной температуре.

Нижняя плоскость образцов была неподвижна, а верхняя смещалась вниз под давлением с постоянной скоростью 5 мм/мин, т. е. со скоростью деформации всей ячеистой структуры равной 0,1%. Приложенные нагрузки и смещения были измерены для расчета сжимающего напряжения путем деления значения нагрузки на эффективную площадь решетчатых конструкций. Деформация разрушения была установлена на уровне 50% от высоты образца.

## 3 Результаты

### 3.1 Этап постобработки

#### 3.1.1 Пескоструйная обработка

Стандартная система восстановления порошка (пескоструйная обработка) Arcam EBM, производимая под давлением аргона 5 бар, была применена ко всем образцам после процесса производства. После которой, образцы осматривались на ярком фоне, внутри структуры обнаруживался агломерат спеченного с поверхностью порошка (рис. 22).

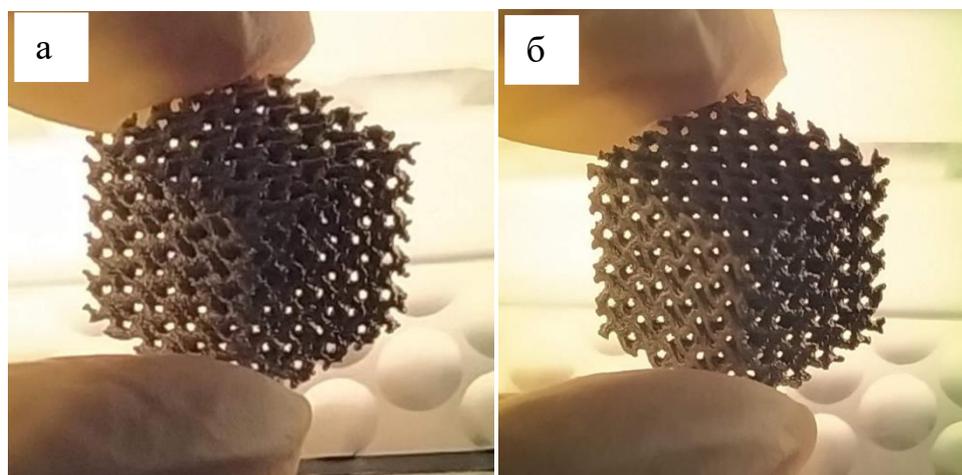


Рисунок 22 – Исследуемые образцы а) содержащие агломерат порошка б) не содержащие агломерат порошка в объеме

#### 3.1.2 Ультразвуковое воздействие

Этап постобработки УЗВ был проведен для образцов со всеми значениями толщин стенок с помощью оборудования Sonic SwissBoster 35 кГц 1:1.5 Alu. Приводная головка УЗВ системы монтировалась на модифицированную стойку промышленного настольного сверла с добавленной армирующей нижней пластиной и креплением для ультразвуковой вибрационной головки. Электропитание от штатной системы УЗВ позволяло

регулировать мощность вибрации. Очистку выполняли в один этап путем осторожного сжатия плоских поверхностей образцов кубических образцов между лицевой стороной вибратора и нижней пластиной (эквивалентная сила ~ 5 Н) при переключении мощности в течение 15 секунд при 75% от максимальной мощности.

### **3.1.3 Химическое травление**

Основной целью проведения данного этапа было удаление агломерата порошка из центра образцов. Из-за разной толщины стенок порошки по-разному заполняют каналы. Необходимое количество погружений оценивалось для каждого образца индивидуально с учетом толщины их стенок и расстояния между стенками. Этим объясняется явная разница в общем времени и количестве погружений для разных образцов (0,2, 0,4, 0,6). Визуальная оценка центра конструкции производилась после каждого погружения и последующего промывания водой. Разделение общего времени травления на несколько отдельных частей было необходимо для уменьшения воздействия кислот на толщину стенки. Для повышения эффективности данного этапа использовалась магнитная перемешивающая машина.

## **3.2 Сканирующая электронная микроскопия**

Для изучения влияния методов постобработки морфологию и микроструктуру поверхности образцов был произведен этап сканирующей электронной микроскопии (Quanta 200 3D, FEI Company).

### **3.2.1 Морфология поверхности**

Влияние различных методов постобработки на морфологию поверхности исследуемых образцов показано на рисунке 23. Так как общий характер состояния морфологии для образцов, подверженных одному типу обработки, но

с разными толщинами стенок одинаков, ниже будут приведены результаты сканирующей электронной микроскопии для образцов с номинальной толщиной стенки равной 0,6 мм.

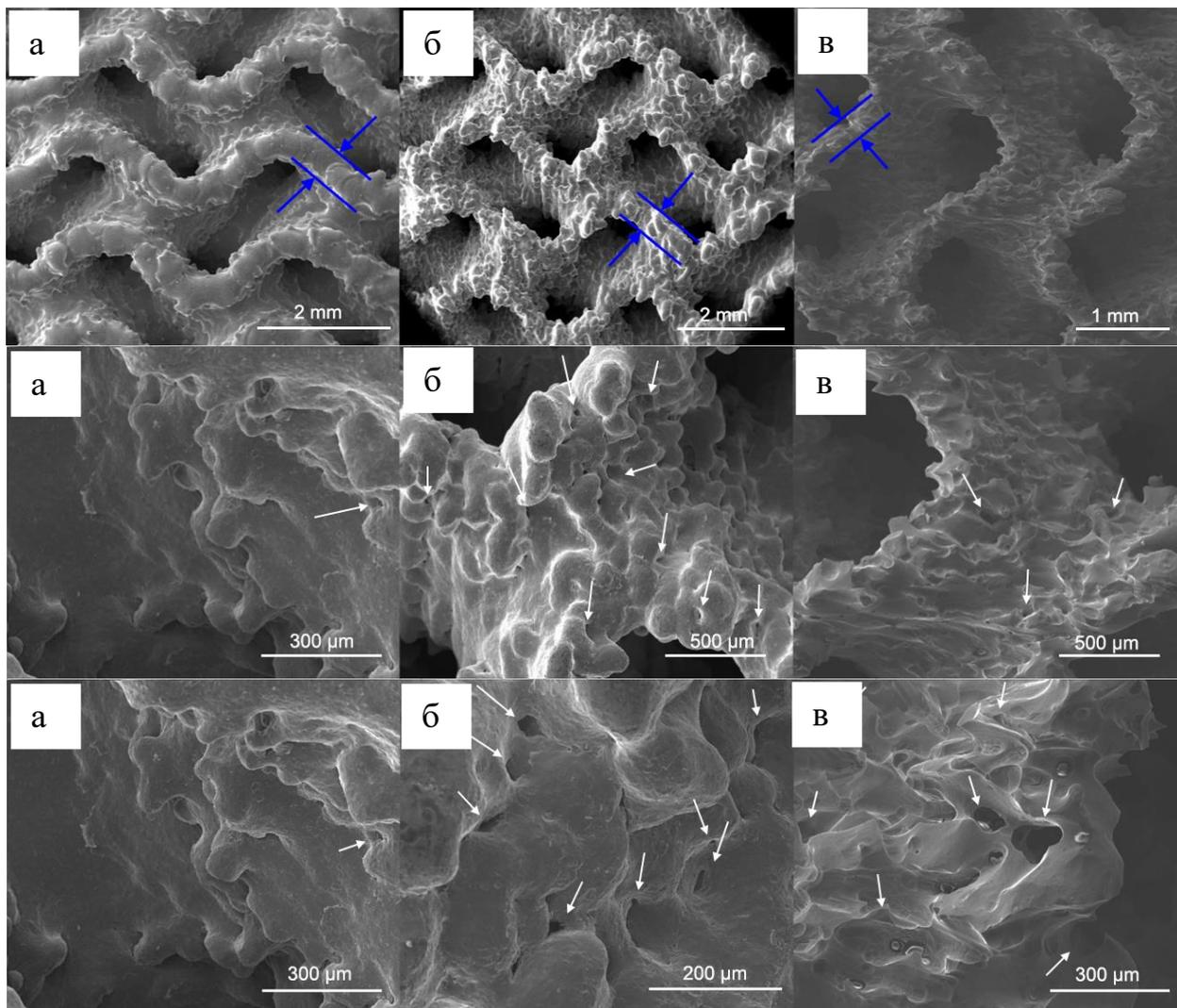


Рисунок 23 - Состояние морфологии поверхности после а) пескоструйной обработки, б) УЗВ, в) химического травления

Из рисунка 23, (а) можно видеть, что поверхность после пескоструйной обработки состоит из выступающих округлых областей, являющихся расплавленными крупными частицами порошка, используемыми в процессе ЭЛП. Однако, поверхность гладкая и однородная и не содержит остаточных спеченных частиц порошка. На стенках образцов заметны микропоры (отмечены белыми стрелками), которые являются результатом производственного

процесса. Образцы, обработанные данным методом, визуально, имеют наибольшую толщину стенки (отмечено синим).

Поверхность образцов, обработанных УЗВ, также содержит выступающие плавные участки, которые являются более выраженными на поверхности после УЗВ (рис. 23, б), чем при пескоструйной обработке. Поверхность после УЗВ выглядит более бугристой, однако толщина стенки визуально меньше, чем при пескоструйной обработке. Эти изменения могут быть связаны с изменениями размера, положения и ориентации зерен после воздействия ультразвуковой вибрации, как наблюдали авторы [49]. Под действием этого метода возможно движение дислокаций и механизмы скольжения микроструктуры, необходимые для минимизации энергии системы, что в свою очередь, приводит к изменению морфологии поверхности [49].

Химическое травление образцов с номинальной толщиной 0,6 мм привело к высокой степени повреждения поверхности, что можно заметить по появлению небольших углублений и острых краев, заметных при изучении морфологии (рис. 23, в). Кроме того, на стенках образцов были замечены микропоры (отмечены белыми стрелками), которые являются результатом производственного процесса, но при этом явно заметно, что их размер больше, чем при других методах. Из чего можно сделать вывод, что под действием химического травления посредством растворения диаметр данных пор был увеличен. Толщина стенок образцов, обработанных химическим травлением, по визуальной оценке, самая тонкая (отмечено синим).

### 3.2.2 Изучение микроструктуры

Для изучения состояния микроструктуры поверхности образцы были предварительно стабилизированы в эпоксидной смоле во всю высоту, после чего исследуемая плоскость была отшлифована на шлифовальной машине для получения плоскопараллельной поверхности. Шлифование происходило с последовательным применением наждачной бумаги с изменением дисперсности от крупной к мелкой. При смене положения образцов происходила смена направления шлифования с поворотом на  $90^\circ$ . Что было необходимо для исключения образования глубоких царапин, которое могло возникнуть при малой величине угла поворота, с наложением одной царапины от наждачной бумаги на уже образованную ранее.

Травление исследуемой поверхности в растворе Крола (92%  $H_2O$ , 6%  $HNO_3$ , 2%  $HF$ ) было осуществлено после шлифовки для достижения более явного проявления микроструктуры.

Так как режим химического травления для образцов с номинальной толщиной стенки равной 0,4 мм показал наиболее желаемый результат по удалению частиц порошка и сохранению целостности структуры, СЭМ-изображения микроструктуры образцов после всех трех видов обработки представлены именно для данной группы (рисунки 24–26).

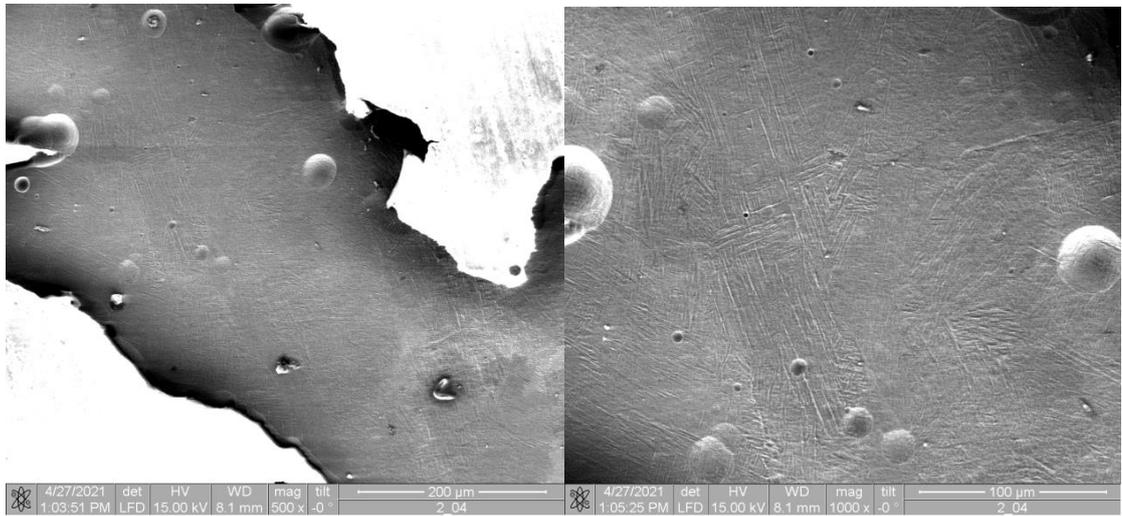


Рисунок 24 - СЭМ изображения микроструктуры образца с толщиной стенки 0,4 мм после пескоструйной обработки

Как видно из рисунка 24, микроструктура образца, прошедшего пескоструйную обработку, содержит удлиненные зерна с содержанием разнонаправленных ламелей. Также можно заметить наличие таких дефектов, как сферические углубления, которые являются следами пор, появившихся в результате производства.

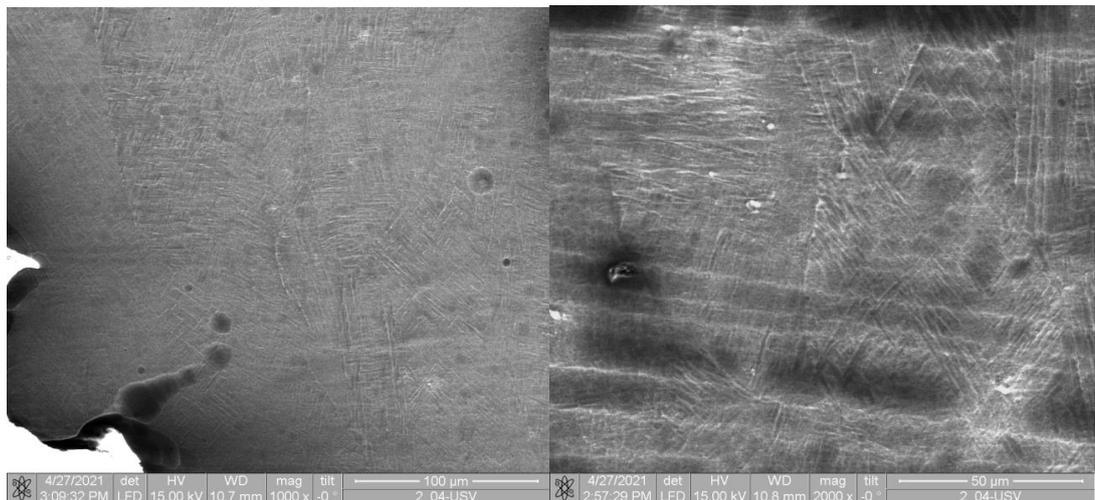


Рисунок 25 - СЭМ изображения микроструктуры образца после ультразвуковой обработки

На изображениях на рисунке 25 можно заметить наличие полос, пересекающих границы зерен, что может являться результатом движения

дислокаций и механизма скольжения, характерных для данного метода обработки [50,51], причиной которых является наличие высоких попеременно сменяющихся сжимающих и растягивающих напряжений, возникающих в структуре при данном методе обработки [52,53].

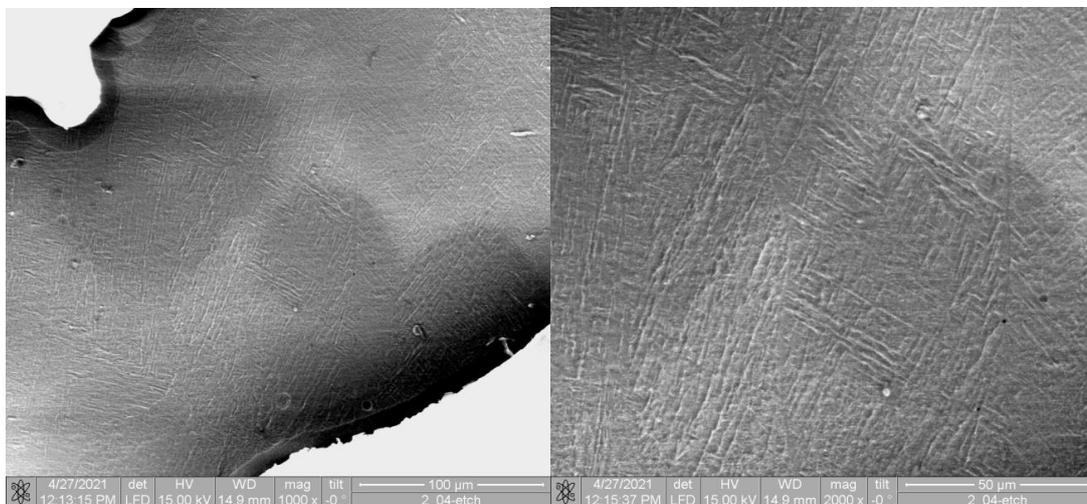


Рисунок 26 - СЭМ изображения микроструктуры образца с толщиной стенки 0,4 мм после химического травления

На изображениях микроструктуры образцов после химического травления можно заметить шероховатость краев образцов, как результат воздействия химического раствора кислот. Но микроструктура достаточно однородна и содержит крупные зерна с различным направлением светлых ламелей.

Также были замечены особенные участки исследуемой поверхности образцов после УЗВ, СЭМ-изображения которых представлены ниже, рисунок 27.

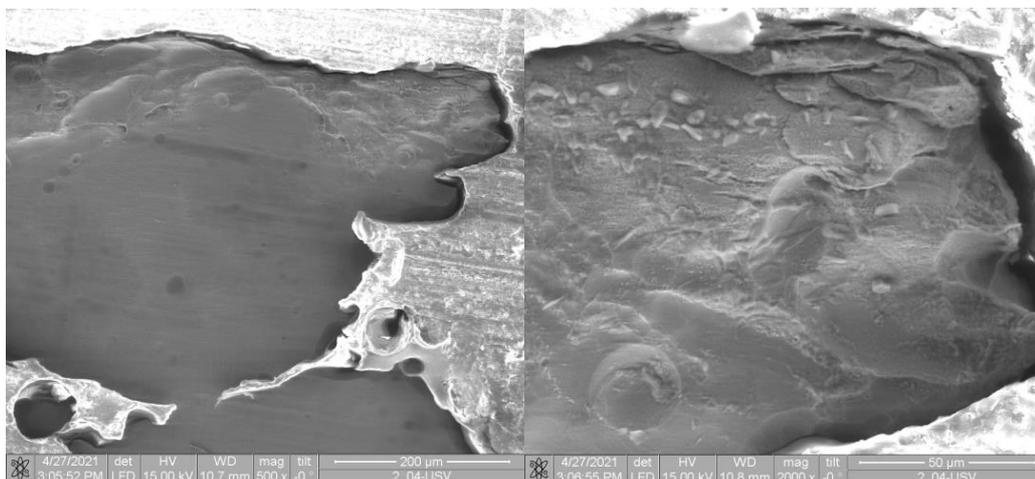


Рисунок 27 - Скол при ультразвуковой обработке

Скол на краевой поверхности образца с толщиной стенки равной 0,4 мм после УЗВ был замечен при проведении СЭМ – этапа. Как можно заметить из рисунка 27, дефект имеет хрупкий характер разрушения, что указывает на то, что это именно скол [51], причиной возникновения которого может являться накопление предельной величины внутренних напряжений в этой области, возникающих при данном методе обработки.

### 3.3 Компьютерная томография

Для демонстрации и расчета характеристик внутренней структуры гироидных образцов, таких как остаточное количество порошка и его пространственное распределение, толщина стенок, объем дефектов использовалась компьютерная томография.

На рисунке 28 показано типичное распределение порошка внутри образцов, обработанных пескоструйной обработкой: некоторое количество центрального объема кубического образца занято остаточным порошком. Количество остаточного порошка было количественно оценено методом компьютерной томографии и представлено на рисунке 29.

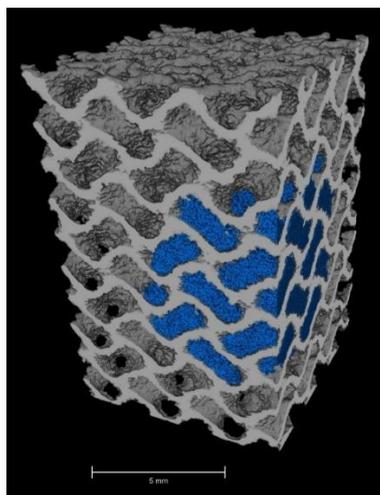


Рисунок 28 – Типичное распределение порошка после пескоструйной обработки, характерное для образцов со всеми величинами толщин стенки

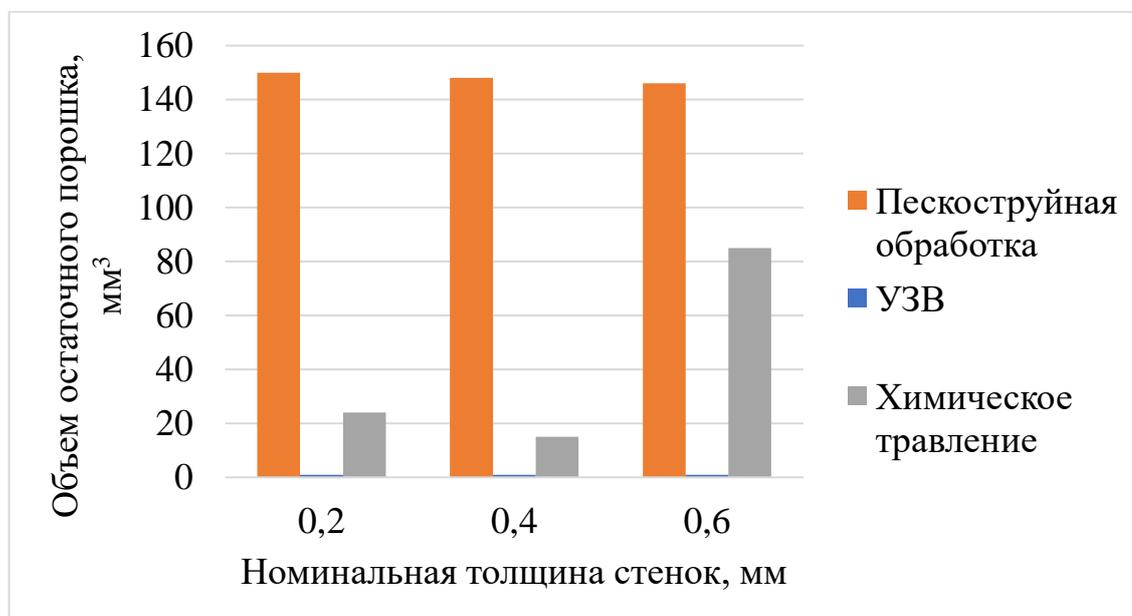


Рисунок 29 – Гистограмма объемного содержания порошка в образцах

Результаты оценки толщин стенок и наличия порошка в объеме образцов с помощью компьютерной томографии для всех образцов на середине высоты представлены на рисунке 30.

Из рисунка 30 видно, что наличие порошка для образцов после пескоструйной обработки сконцентрировано в центре объема, что может объясняться недостаточной эффективностью данного метода при работе со сложными конструкциями. В то время как, после УЗВ наблюдается

незначительное неравномерное распределение порошка по объему, количество которого, по визуальной оценке, явно меньше, чем при пескоструйной обработке. При этом, порошок в образцах, прошедших химическое травление, находится так же в центре, как и после пескоструйной обработки, но количество его явно меньше.

Толщина стенок при обработке пескоструйным методом достаточно однородна, а края стенок имеют неровности и выступы. То же состояние можно наблюдать для стенок образцов, прошедших УЗВ, однако неоднородность поверхности по шероховатости более явная, что также было замечено и описано при анализе СЭМ изображений. Что касается стенок образцов, прошедших химическое травление, их поверхность достаточно однородна, по визуальной оценке, но для образцов с номинальной толщиной стенки равной 0,6 мм заметен явный градиент в данной величине. Полученный эффект может быть объяснен наличием активно выделяющегося водорода в ходе химической реакции, благодаря чему происходило блокирование пор для проникновения кислоты в более глубокие объемные структурные отверстия, а действие кислоты сохранялось преимущественно на периферии, что также может являться причиной наличия остаточного порошка в центральной области.

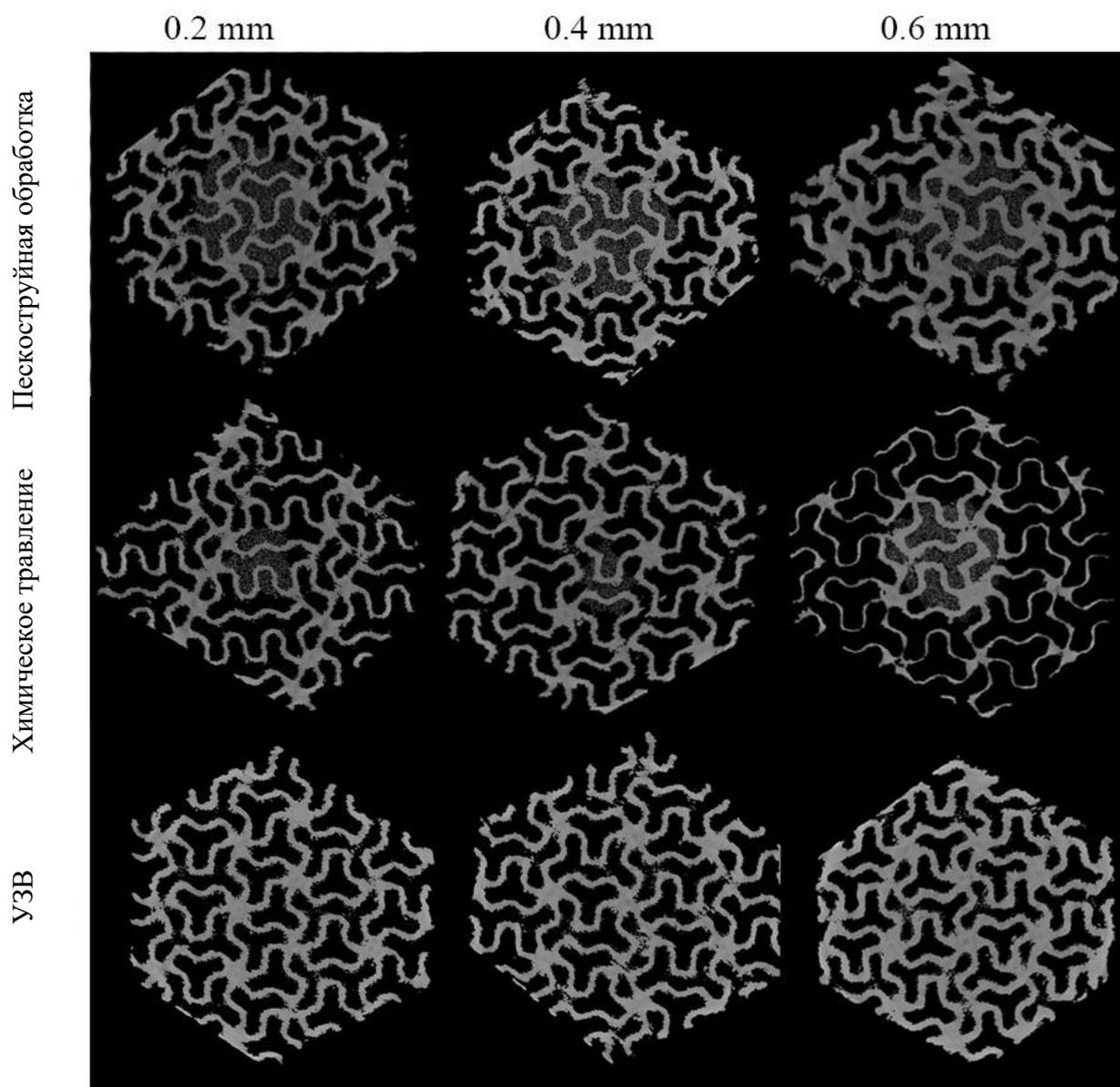


Рисунок 30 – Результаты компьютерной томографии

Установлены средняя и максимальная толщины стенки, а также объем материала после того, как была произведена постобработка для удаления порошка из всех образцов (табл. 1).

Таблица 1 - Свойства образцов, полученные методом КТ

Номинальная толщина, мм	Метод постобработки	Средняя толщина стенки, мм	Наибольшая толщина стенки, мм	Объемная доля материала, мм <sup>3</sup>
0,2	Пескоструйная обработка	0,35±0,07	0,51	1450,67
	УЗВ	0,35±0,07	0,50	1434,98
	Химическое травление	0,33±0,06	0,47	1249,97
0,4	Пескоструйная обработка	0,37±0,07	0,56	1443,53
	УЗВ	0,36±0,08	0,59	1482,24
	Химическое травление	0,33±0,06	0,55	1256,70
0,6	Пескоструйная обработка	0,45±0,11	0,71	1705,25
	УЗВ	0,45±0,11	0,72	1726,27
	Химическое травление	0,26±0,10	0,68	669,45

Из таблицы 1 видно, что наименьшее значение средней толщины стенки имеют образцы с номинальной толщиной 0,6 мм после химического травления. В то время как, при остальных способах обработки значения данного параметра, примерно, одинаковы.

### 3.4 Механические испытания

Результаты данного этапа для каждой группы образцов с разной номинальной толщиной стенок представлены ниже на кривых деформации и сравнительных фотографиях процессов нагружения.

Образцы, после постобработки пескоструйным воздействием и УЗВ с номинальной толщиной 0,2 мм, на кривых деформации ведут себя относительно одинаково до достижения предела прочности на сжатие. При разрушении этих образцов наблюдается распространения трещин вдоль диагонали при 30%

деформации, обозначенные красными линиями на рисунке 31. Данные трещины являются причиной разрушения образцов, что происходит в нескольких областях, и каждая область разрушается по отдельности. Существует ощутимый разрыв между механическими свойствами образца, обработанного химическим травлением и двумя другими методами. Более того, образцы, обработанные химическим травлением, при разрушении имеют одну главную диагональную трещину, возникающую при 20% деформации, когда достигается предел прочности на сжатие для всех трех типов образцов, рис. 31. Также можно заметить, что образцы по всему объему имеют хрупкий характер разрушения в результате последовательного схлопывания слоев элементарной ячейки.

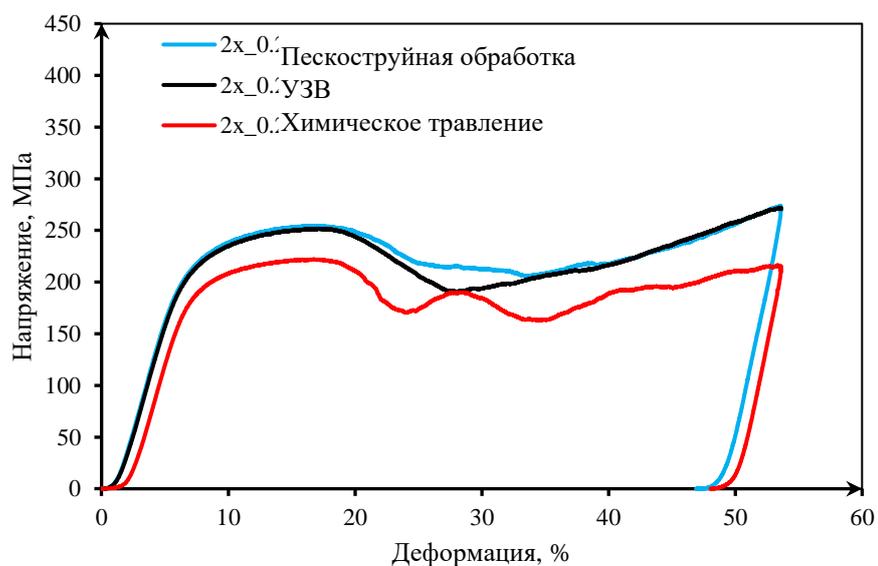


Рисунок 31 – Кривые «напряжение - деформация» для образцов с номинальной толщиной стенки 0,2 мм, после этапа постобработки

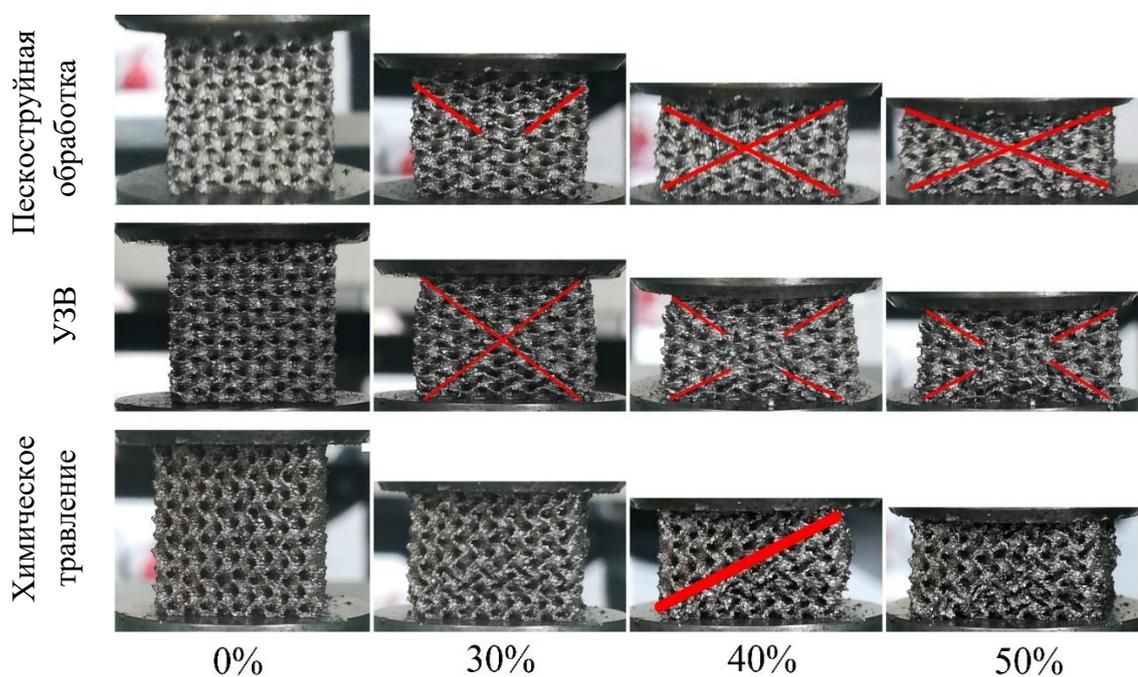


Рисунок 32 – Фотографии процесса сжатия на разных этапах прохождения для образцов с номинальной толщиной стенки 0,2 мм

На кривых напряжение-деформация (рисунок 31), можно наблюдать определенные неровности между 25 и 35% для образцов, обработанных пескоструйным воздействием и химическим травлением.

Наличие остаточных агломераций порошка внутри образцов, обработанных пескоструйной обработкой, увеличивает поглощённую энергию по сравнению с образцами, обработанными УЗВ. Предположительно, остаточный порошок влияет на механические характеристики всей гироидной структуры, оставаясь сжатым между деформированными стенками, которые давят друг на друга. Как было сказано ранее, порошок из образцов был полностью удалён методом УЗВ, и на кривой напряжения-деформации не наблюдалось никаких выступов, в отличие от кривых, полученных для образцов после пескоструйной обработки. Стоит отметить, что для образцов, обработанных пескоструйным воздействием и УЗВ, во время сжатия может наблюдаться явление округления внешних стенок конструкции под действием давления, в то время как для образцов, обработанных химическим травлением, данный эффект не наблюдался, что может быть связано с охрупчиванием стенок

из-за их утоньшения, что, в свою очередь, привело к неравномерному распределению напряжения в конструкции образца.

Похожий результат наблюдался для образцов с номинальной толщиной 0,4 мм. Диагональные трещины возникают при 20% деформации в образцах, обработанных пескоструйным воздействием и УЗВ. Влияние порошка внутри структур можно наблюдать на кривых деформации в областях выступов между 25 и 35%, рис. 33. В этом же диапазоне кривая для образца с химическим воздействием более плавная по высоте из-за меньшего количества остаточного порошка после обработки. После 35% деформации значения напряжений для пескоструйной обработки и УЗВ примерно равны. Однако слои образцов, обработанные химическим травлением, складывались вплоть до контакта друг с другом, рис. 12, что довольно хорошо соответствует плато на кривой напряжение-деформация после 22% деформации, рис. 34. Образцы после пескоструйной обработки и химического травления, деформировались послойно, тогда как образцы после УЗВ разрушались по диагональным направлениям.

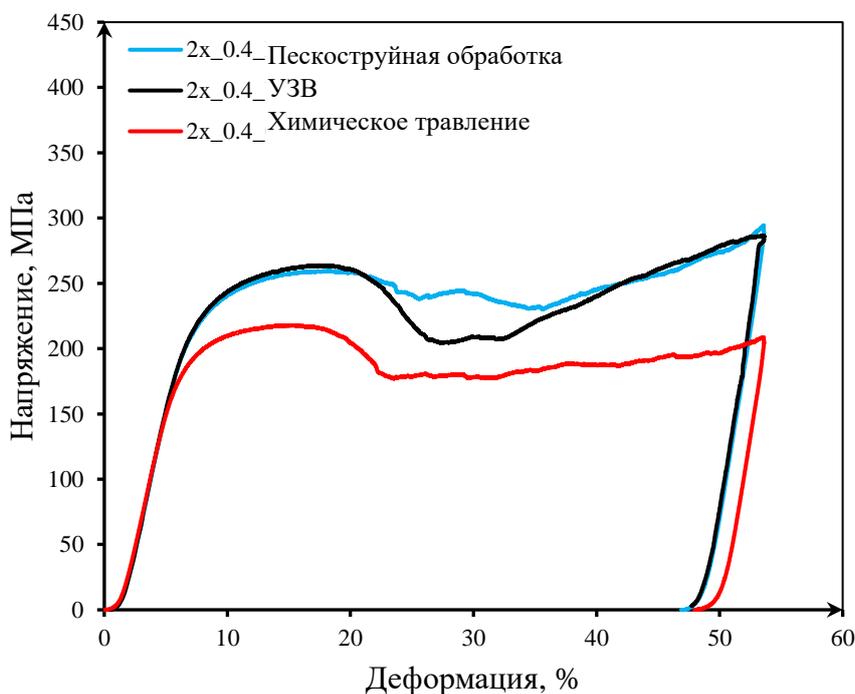


Рисунок 33 – Кривые «напряжение - деформация» для образцов с номинальной толщиной стенки 0,4 мм, после этапа постобработки

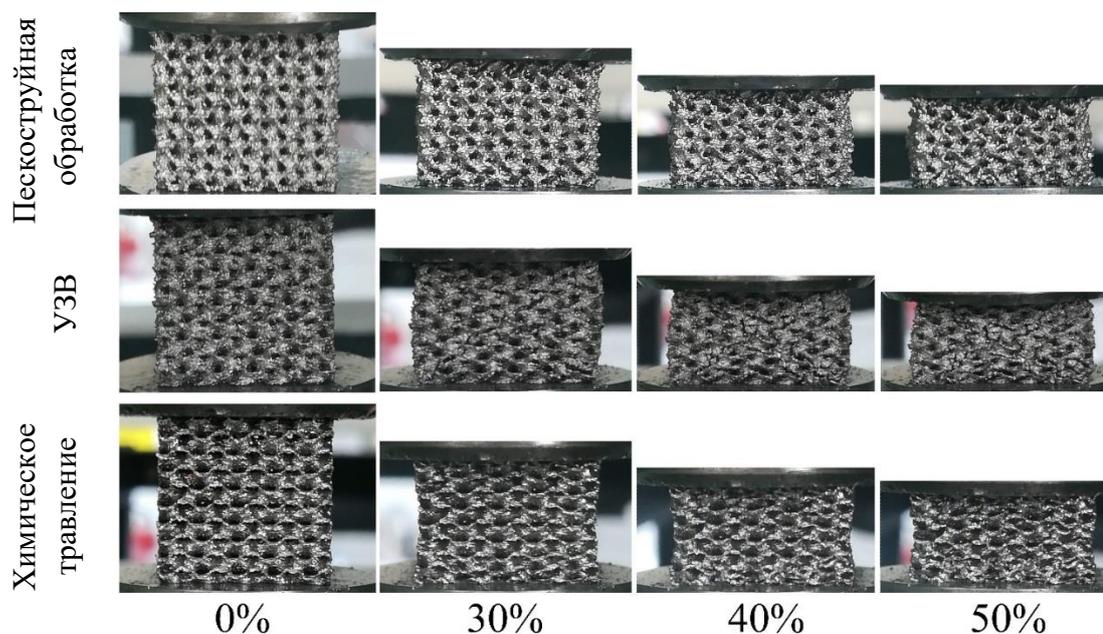


Рисунок 34 – Фотографии процесса сжатия на разных этапах прохождения для образцов с номинальной толщиной стенки 0,4 мм

Образцы после пескоструйной и ультразвуковой обработки с номинальной толщиной стенки 0,6 мм, ведут себя одинаково только в линейной части кривой деформации. Также, можно наблюдать разницу между кривыми напряжения-деформации для данных образцов, начинающуюся после 10% и уменьшающуюся после 30% деформации. Разница вызвана наличием остаточного порошка, который не удалось удалить. Деформированные стенки сжимают порошок, поэтому на рисунке 35 можно наблюдать разницу между двумя кривыми. Это комбинированное воздействие остаточного порошка, более толстых стенок и более узких каналов. Диагональные трещины возникают при 20% деформации в образцах, обработанных данными методами. Деформация образца, прошедшего пескоструйную обработку, происходила слой за слоем, в то время как деформация образца, прошедшего УЗВ, проходила по диагоналям, рис. 36. Механические свойства образцов, обработанных химическим травлением, резко ухудшились по сравнению с любыми другими образцами,

исследуемыми в данной работе. Однако в данных образцах, сначала происходило «сложение» слоев, контактирующих со сжимающимися поверхностями, рис. 36, что довольно хорошо соответствует неровной области плато на кривой напряжение-деформация, рис. 35. Также, стоит отметить, что ни для одного из образцов, обработанных химическим травлением, не происходило деформации через округление внешних стенок конструкции.

Для удобства сравнения результатов постобработок и их влияния на изменение массы, пористости и механических показателей, все данные были занесены в таблицу 2.

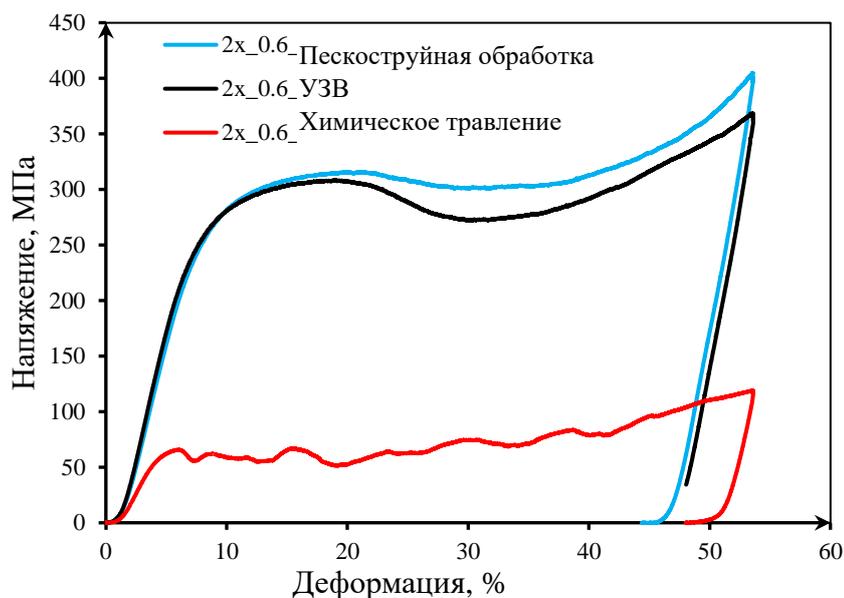


Рисунок 35 – Кривые «напряжение - деформация» для образцов с номинальной толщиной стенки 0,6 мм, после этапа постобработки

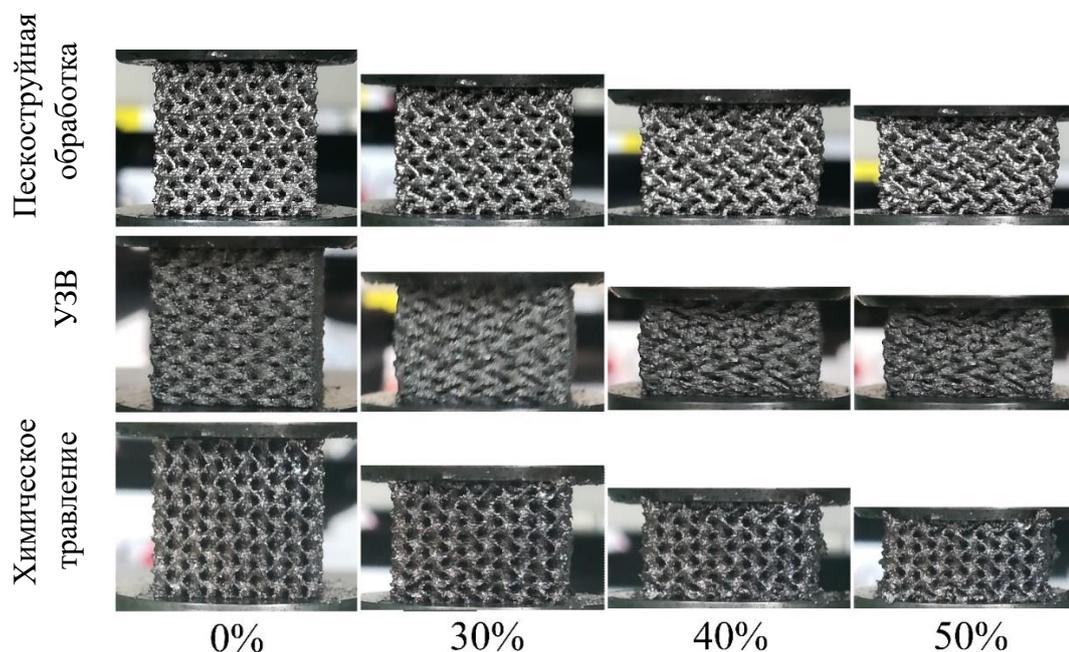


Рисунок 36 – Фотографии процесса сжатия на разных этапах прохождения для образцов с номинальной толщиной стенки 0,6 мм

Таблица 2 – Результаты проведения этапа постобработки

Номинал. толщина, мм	Метод пост-обработки	Изменение массы, %	Начальная пористость, %	Конечная пористость, %	Модуль Юнга, ГПа	Предел текучести, МПа	$\sigma_{\text{ПС}}$ , МПа
0,2	Пескостр. обработка	-	52	57	4,1	183	254
	УЗВ	4,4	53	57	4,1	180	252
	Химическое травление	26,7	51	63	3,5	168	222
0,4	Пескостр. обработка	-	50	57	4,4	186	260
	УЗВ	4,3	52	56	4,4	181	263
	Химическое травление	25,1	50	63	4,0	160	217
0,6	Пескостр. обработка	-	42	49	4,6	204	315
	УЗВ	4,8	44	49	4,6	206	308
	Химическое травление	25,1	43	80	2,0	55	65

Изменение массы для образцов после пескоструйной обработки измерить не представлялось возможным, так как данная обработка производилась сразу после изготовления изделий. Соответственно, изменение массы, указанное для образцов после химического травления и УЗВ, было рассчитано с условием, что начальной массой была та, что получена после пескоструйной обработки. Как видно из таблицы 2, наибольшее изменение массы, как и пористости наблюдалось для образцов после химического травления с номинальной начальной толщиной стенок, равной 0,6 мм.

Предел прочности на сжатие ( $\sigma_{\text{ППС}}$ ) также, как и предел текучести, является наибольшим для образцов с номинальной толщиной стенок равной 0,6 мм после УЗВ и наименьшим для образцов с номинальной толщиной стенок равной 0,6 мм после химического травления, что напрямую связано с итоговым значением толщины стенки, полученным после обработки.

## Заключение

В данной работе было исследовано влияние методов постобработки на микроструктуру и механические свойства образцов ТППМЭ структуры «Гироид», изготовленных с помощью ЭЛП из порошка титанового сплава Ti-6Al-4V.

Пескоструйная обработка — это важная процедура для удаления порошка с внешней поверхности готового образца сразу после его изготовления. Но данный метод неэффективен для удаления порошка с внутренних частей плотных решеток. Каждый образец после пескоструйной обработки содержал примерно одинаковое количество порошка.

Делая вывод об эффективности УЗВ и химического травления, стоит отметить, что данные методы значительно изменяют морфологию образца. Морфология поверхности после УЗВ выглядит менее однородной, чем после пескоструйной обработки. По изображениям СЭМ выявлено наличие кратеров и острых пиков на поверхности после обработки химическим травлением. Кроме того, травление приводило к образованию мелких и неглубоких ямок на поверхности изделий. Однако протравленная поверхность более однородная по высоте, чем образцы, обработанные УЗВ.

Химическое травление рекомендуется использовать для обработки морфологии поверхности, но не для удаления порошка. Согласно результатам компьютерной томографии, химическое травление изменяет морфологию поверхности и толщину стенок исследуемых изделий. Можно предположить, что периодическая смена химического раствора приводит к более интенсивному травлению и потере массы образцов, но не порошка.

Образцы ТППМЭ, обработанные УЗВ, показали однородную плотность без накопления порошка во внутреннем объеме структуры образца. Однако полное удаление остаточного порошка сопровождалось небольшими морфологическими изменениями.

В ходе механических испытаний оценивались механические свойства исследуемых структур после различных видов постобработок. Механические свойства листовых гироидов после обработки УЗВ и пескоструйной обработкой одинаковы в упругой области частично отличаются в области пластических деформаций. На модуль упругости и предел прочности пористой структуры больше всего влияет химическое травление. Для образцов, обработанных химическим травлением, не наблюдается пиков в центральной области значений деформации на кривых напряжение-деформация. Образцы в данном случае разрушаются вдоль главной диагонали при деформации больше 25%. Образцы, обработанные данным методом, обладают худшими механическими свойствами по сравнению с образцами, обработанными другими способами.

Таким образом, в результате данного исследования можно сделать вывод, что самым эффективным методом для образцов ТППМЭ структуры «гироид», полученных методом электронно-лучевого плавления из титанового сплава Ti-6Al-4V, по удалению остаточного порошка, и при этом сохранению механических свойств, является ультразвуковое воздействие. А комбинация таких методов, как УЗВ и химическое травление, может быть решением для более эффективной обработки плотных решеток.

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

Коммерческая целесообразность выполнения любых исследований определяется их финансовой выгодностью. Оценка коммерческой ценности, т.е. потенциала исследований является важным этапом в поиске источников финансирования для проведения научной работы и ее коммерциализации. Что представляет важность для исследовательских организаций, помогая в оценке перспективы проводимых научных исследований.

Благодаря такой оценке учёный может рассматривать поиски партнеров для дальнейшего проведения научного исследования, планировать коммерциализацию результатов и возможный запуск собственного производства.

Коммерческая ценность, как правило, определяется не только наличием более высоких технических характеристик над конкурентными разработками, но и тем, насколько точно разработчик сможет ответить на возникающие вопросы – будет ли продукт востребован на рынке, какова будет его цена, каков бюджет научного исследования, какое время будет необходимо для продвижения разработанного продукта на рынок.

Целью данного раздела является: Оценка разработки способов постобработки сетчатых металлических метаматериалов, полученных электронно-лучевым плавлением позиции ресурсоэффективности и конкурентоспособности.

Данный раздел, предусматривает выполнение следующих задач:

- проанализировать конкурентные технические решения проекта;
- провести SWOT-анализ;
- выполнить планирование и организацию научного исследования;
- создать диаграмму Гантта;
- определить бюджет затрат на проведение проектной работы;

- провести планирование проектно-конструкторских работ;
- определить ресурсоэффективность проекта.

## **4.1 Предпроектный анализ**

### **4.1.1 Потенциальные потребители результатов исследований**

Продукт: трижды периодические поверхности минимальных энергий, полученные электронно-лучевым синтезом из порошка титанового сплава Ti6Al4V.

Целевой рынок: фирмы-производители имплантатов

### **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 и определить направления для ее будущего повышения. Целесообразно проводить данный анализ с помощью оценочной карты, для этого были отобраны 2 конкурентные разработки.

Расчет показателя конкурентоспособности производился по формуле:

$$K = \sum_i B_i \cdot V_i$$

где  $B_i$  – бал  $i$ -го показателя,

$V_i$  – вес показателя (в долях единицы).

Таблица 3 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений (разработок)

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		Б <sub>ф</sub>	Б <sub>к1</sub>	Б <sub>к2</sub>	К <sub>ф</sub>	К <sub>к1</sub>	К <sub>к2</sub>
1	2	3	4	5	6	7	8
Эффективность	0,4	4	1	1	1,6	0,4	0,4
Легкость воспроизведения	0,15	5	5	2	0,75	0,75	0,3
Сохранение механических показателей	0,2	5	4	3	1	0,8	0,6
Сохранение целостности конструкции	0,15	5	4	3	0,75	0,6	0,45
Цена	0,05	4	2	4	0,2	0,1	0,2
Конкурентоспособность метода	0,05	5	3	3	0,25	0,15	0,15
Итого	1				4,55	2,8	2,1

Как видно из таблицы 3 конкурентоспособность исследуемых методов в данной работе выше, чем у шлифования и обработки поверхности с помощью лазерной полировки. Это связано с тем, что эффективность конкурентных методов для столь сложных конструкций практически равна нулю. В свою очередь методы, рассматриваемые в данной работе, имеют высокую проникающую способность, что значительно повышает их эффективность.

### 4.3 SWOT-анализ

SWOT – Strengths (сильные стороны), Weaknesses (слабые стороны), Opportunities (возможности) и Threats (угрозы) – представляет собой комплексный анализ научно-исследовательского проекта. Первый этап заключается в описании сильных и слабых сторон проекта, в выявлении

возможностей и угроз для реализации проекта, которые проявились или могут появиться в его внешней среде. Дадим трактовку каждому из этих понятий.

Таблица 4 – Матрица SWOT

	<p>Сильные стороны научно-исследовательского проекта:</p> <p>С1. Заявленная экономичность и энергоэффективность технологии</p> <p>С2. Экологичность технологии</p> <p>С3. Квалифицированный персонал</p> <p>С4. Маленький срок готовых результатов при проведении научного исследования</p>	<p>Слабые стороны научно-исследовательского проекта:</p> <p>Сл1. Отсутствие прототипа научной разработки</p> <p>Сл2. Недостаток финансовых средств</p> <p>Сл3. Большой срок поставок материалов и комплектующих,</p>
<p>Возможности:</p> <p>В1. Появление дополнительного спроса на новый продукт</p> <p>В2. Повышение стоимости конкурентных разработок</p> <p>В3. Использование научно-исследовательские достижения ТПУ</p>		
<p>Угрозы:</p> <p>У1. Отсутствие спроса на новые технологии производства</p> <p>У2. Развитая конкуренция технологий производства</p> <p>У3. У руководства НИР проблемы</p>		

материально-техническим обеспечением		
--------------------------------------	--	--

Второй этап состоит в выявлении соответствия сильных и слабых сторон научно-исследовательского проекта внешним условиям окружающей среды. Эти соответствия или несоответствия должны помочь выявить степень необходимости проведения стратегических изменений. В рамках данного этапа необходимо построить интерактивную матрицу проекта. Ее использование помогает разобраться с различными комбинациями взаимосвязей областей матрицы SWOT. Возможно использование этой матрицы в качестве одной из основ для оценки вариантов стратегического выбора. Каждый фактор помечается либо знаком «+» (означает сильное соответствие сильных сторон возможностям), либо знаком «-» (что означает слабое соответствие); «0» – если есть сомнения в том, что поставить «+» или «-».

Таблица 5 – Интерактивная матрица проекта

<b>Сильные стороны проекта</b>				
Возможности		C1	C2	C3
	B1	+	+	-
	B2	+	-	0
	B3	+	0	-

<b>Слабые стороны проекта</b>				
Возможности		Сл.1	Сл.2	Сл.3
	B1	0	+	-

	B2	0	-	0
	B3	+	+	0

<b>Сильные стороны проекта</b>					
Угрозы		C1	C2	C3	C4
	У1	+	+	+	-
	У2	+	0	0	-
	У3	-	-	0	+

<b>Слабые стороны проекта</b>				
Угрозы		Сл.1	Сл.2	Сл.3
	У1	+	-	-
	У2	+	-	-
	У3	0	-	0

Анализ интерактивных таблиц представляется в форме записи сильно коррелирующих сильных сторон и возможностей, или слабых сторон и возможностей и т.д. следующего вида: B1C2; B2C3C4; B3C1C3. Каждая из записей представляет собой направление реализации проекта. В рамках третьего этапа должна быть составлена итоговая матрица SWOT-анализа, которая приводится в магистерской диссертации (таблица 6).

Таблица 6 – Итоговая матрица SWOT – анализа

	Сильные стороны научно-исследовательского проекта: С1. Заявленная экономичность и энергоэффективность технологии С2. Экологичность технологии С3. Квалифицированный персонал С4. Маленький срок готовых результатов при проведении научного исследования	Слабые стороны научно-исследовательского проекта: Сл1. Недостаток финансовых средств Сл2. Большой срок поставок материалов и комплектующих, используемые при проведении научного исследования
<p>Возможности:</p> <p>В1. Появление дополнительного спроса на новый продукт</p> <p>В2. Повышение стоимости конкурентных разработок</p> <p>В3. Использование научных исследований ТПУ</p> <p>В4. Отсутствие прототипа научной разработки дает возможность на появление дополнительного спроса на новый продукт.</p>	<p>1. Получить результаты НТИ</p> <p>2. Продвинуть НТИ на рынок</p>	<p>1. Разработать календарный план</p> <p>2. Создать команду единомышленников</p> <p>3. Обеспечить финансовую среду</p> <p>4. Привлечь базу научно-исследовательских достижений ТПУ, что в свою очередь дает возможность дополнительного финансирования.</p>
<p>Угрозы:</p> <p>У1. Отсутствие спроса на НТИ</p> <p>У2. Развитая</p>	<p>1. Создать спрос на НТИ</p> <p>2. Создать календарный план НТИ</p> <p>3. Устранить проблемы с</p>	<p>Недостаток финансовых средств приводит к отсутствию спроса на</p>

конкуренция технологий производства УЗ.У руководства НИР проблемы с материально-техническим обеспечением	материально-техническим обеспечением 4.Найти инвесторов 5.Подготовить презентацию НТИ, провести рекламинг	новые технологии производства.
--	---	--------------------------------

#### 4.4 Оценка готовности проекта к коммерциализации

Таблица 7 - Бланк оценки степени готовности научного проекта к коммерциализации

№	Наименование	Степень проработанности научного проекта	Уровень имеющихся знаний у разработчика
1	Определен имеющийся научно-технический задел	5	5
2	Определены перспективные направления коммерциализации научно-технического задела	5	4
3	Определены отрасли и технологии (товары, услуги) для предложения на рынке	5	5
4	Определена товарная форма научно-технического задела для представления на рынок	4	4
5	Определены авторы и осуществлена охрана их прав	5	5
6	Проведена оценка стоимости	4	4

	интеллектуальной собственности		
7	Проведены маркетинговые исследования рынков сбыта	4	4
8	Разработан бизнес-план коммерциализации научной разработки	3	4
9	Определены пути продвижения научной разработки на рынок	4	4
10	Разработана стратегия (форма) реализации научной разработки	4	4
11	Проработаны вопросы международного сотрудничества и выхода на зарубежный рынок	3	3
12	Проработаны вопросы использования услуг инфраструктуры поддержки, получения льгот	2	2
13	Проработаны вопросы финансирования коммерциализации научной разработки	5	4
14	Имеется команда для коммерциализации научной разработки	3	3
15	Проработан механизм реализации научного проекта	4	5
<b>ИТОГО БАЛЛОВ</b>		<b>60</b>	<b>60</b>

#### 4.4.1 Инициация проекта

Группа процессов инициации состоит из процессов, которые выполняются для определения нового проекта или новой фазы существующего. В рамках процессов инициации определяются изначальные цели и содержание и фиксируются начальные финансовые ресурсы. Определяются внутренние и внешние заинтересованные стороны проекта, которые будут взаимодействовать и влиять на общий результат научного проекта. Данная информация закрепляется в Уставе проекта.

Таблица 8 - Заинтересованные стороны проекта

<b>Заинтересованные стороны проекта</b>	<b>Ожидания заинтересованных сторон</b>
Фирмы-производители металлических конструкций сложных форм, с применением порошковых аддитивных технологий	Оптимизация/усовершенствование существующих технологий этапа очистки

Таблица 9 - Цели и результат проекта

<b>Цели проекта:</b>	Разработка способов постобработки сетчатых металлических метаматериалов, полученных электронно-лучевым плавлением
<b>Ожидаемые результаты проекта:</b>	Получение положительных результатов в результате проведения исследований
<b>Критерии приемки результата проекта:</b>	Адекватность результатов
<b>Требования к результату проекта:</b>	<b>Требование:</b>
	Стандартизация готового продукта

#### 4.4.2 Организационная структура проекта

Таблица 10– Рабочая группа проекта

<b>№</b>	<b>ФИО, основное место работы, должность</b>	<b>Роль в проекте</b>	<b>Функции</b>	<b>Трудозатраты, час.</b>
1	Сурменева Мария Александровна, НИ ТПУ, кафедра ЭФ, Центр технологий, с.н.с, к.ф.-м.н.	Руководитель	Координация деятельности проекта	80
2	Павельева Александра Андреевна, НИ ТПУ, кафедра ОФ, Инженер	Исполнитель	Выполнение НИР	485
<b>Итого:</b>				<b>565</b>

Таблица 11 - Ограничения проекта

<b>Фактор</b>	<b>Ограничения/ допущения</b>
3.1. Бюджет проекта	350 000 р.
3.1.1. Источник финансирования	НИ ТПУ
3.2. Сроки проекта: 10.09.16-31.05.17	01.10.19 - 31.05.21
3.2.1. Дата утверждения плана управления проектом	01.10.19
3.2.2. Дата завершения проекта	31.05.21

#### 4.5 Планирование управления научно-техническим проектом

В таблице 12 определены ключевые события проекта, определены их даты и результаты, которые были получены в указанные сроки. Календарный план-график проведения НИОКР по теме представлен в таблице 12.

Таблица 12 – Контрольные события проекта

№	Контрольное событие	Даты	Результат
1	Литературный обзор	10.19 - 12.19 гг.	Освоены общие понимания процессов
2	Пескоструйная обработка	02.20 - 03.20 гг.	Выполнен один из видов постобработок
3	Обработка ультразвуковой вибрацией	03.20 - 04.20 гг.	Выполнен один из видов постобработок
4	Химическое травление	04.20 - 05.20 гг.	Выполнен один из видов постобработок
5	Механические испытания, обработка результатов	05.20 - 06.20 гг.	Получены результаты влияния различных обработок на механические свойства
6	Компьютерная томография, обработка результатов	09.20-11.20 гг.	Получены результаты влияния различных обработок на целостность конструкции
7	Сканирующая электронная микроскопия, обработка результатов	11.20 - 12.20 гг.	Получены результаты влияния различных обработок на состояние микроструктуры
8	Итоговая обработка полученных результатов	02.21 - 03.21 гг.	Результаты всех этапов работы
9	Отчет о проделанной работе	04.21 г.	Отчет

№	Вид работ	Исполнители	Тк, кал. дн.	Продолжительность выполнения работ																															
				2019								2020								2021															
				09		10		11		12		02		03		04		05		09		10		11		12		02		03		04		05	
				1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
1	Составление технического задания	Руководитель	4																																
2	Изучение литературы	Инженер	30																																
3	Пескоструйная обработка	Инженер	4																																
4	Обработка ультразвуковой вибрацией	Инженер	4																																
5	Химическое травление	Инженер	4																																
6	Механические испытания	Инженер, лаборант	2																																
7	Обработка результатов	Инженер	6																																
8	Компьютерная томография	Инженер, лаборант	2																																
9	Обработка результатов	Инженер	10																																
10	Сканирующая электронная микроскопия	Лаборант, Инженер	2																																
11	Обработка результатов	Инженер	10																																
12	Итоговая обработка полученных результатов	Инженер	15																																
13	Подготовка отчета проделанной работе	Инженер	20																																
14	Написание ВКР	Инженер	40																																

#### 4.6 Бюджет научного исследования

Сырье, материалы, покупные изделия и полуфабрикаты (за вычетом отходов).

Таблица 14 – Группировка затрат по статьям

<b>Затраты по статьям</b>					
Сырье, материалы (за вычетом возвратных отходов), покупные изделия и полуфабрикаты	Специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ	Основная заработная плата	Дополнительная заработная плата	Отчисления на социальные нужды	Итого плановая себестоимость
1189,84	-	265542,8	6536,64	18377,91	291647,2

Таблица 15 – Сырье, материалы, комплектующие изделия и покупные полуфабрикаты

Наименование	Марка, размер	Кол-во	Цена за единицу, руб.	Сумма, руб.
Дистиллированная вода	мл	250	0,05	12,5
Плавиковая кислота	мл	50	1,03	5,15
Азотная кислота	мл	100	1,76	17,6
Дополнительные материалы				
Перчатки (пара)	шт	5	2,71	15,58
Халат	шт	1	459	527,85

Всего за материалы				611,16
Итого по статье С <sub>м</sub>				1189,84

Также, в стоимость материальных затрат включают транспортно-заготовительные расходы (3 – 5 % от цены).

#### **4.7 Специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ**

В ходе выполнения НТИ дополнительное оборудование для проведения исследований не было приобретено. Все использованные установки являлись собственностью «Центра технологий». Таким образом затраты на оборудование, за исключением компьютера, не учитывались.

#### **4.8. Основная заработная плата**

В настоящую статью включается основная заработная плата научных и инженерно-технических работников, непосредственно участвующих в выполнении работ по данной теме, и дополнительная заработная плата научно-производственного персонала. В состав основной заработной платы включается премия, выплачиваемая ежемесячно из фонда заработной платы. Баланс рабочего времени и расчет основной заработной платы представлены в таблице 16 и 17, соответственно.

Таблица 16 – Баланс рабочего времени

<b>Показатели рабочего времени</b>	<b>Руководитель</b>	<b>Инженер</b>
Календарное число дней	237	237

Количество нерабочих дней - выходные дни - праздничные дни	64 15	64 15
Потери рабочего времени - отпуск - невыходы по болезни	-	-
Действительный годовой фонд рабочего времени	158	158

Таблица 17 – Расчет основной заработной платы

№ этапа	Исполнители по категориям	Трудоемкость, чел.-дн.	Заработная плата, приходящ. на один чел.-дн., тыс.руб.	Всего заработная плата по тарифу (окладам), тыс. руб.
1	Руководитель	4	2718	10872
2	Инженер	30	1702,9	51087
3	Инженер	4		6811,6
4	Инженер	4		6811,6
5	Инженер	4		6811,6
6	Инженер	2		3405,8
	Лаборант			3405,8
7	Инженер	6		10217,4
8	Инженер	2		3405,8
	Лаборант			3405,8
9	Инженер	10		17029
10	Инженер	2		3405,8
	Лаборант			3405,8
11	Инженер	10		17029
12	Инженер	15		25543,5
13	Инженер	20	34058	
14	Инженер	40	68116	
Итого:			274821,5	

$$C_{ЗП} = Z_{осн} + Z_{доп},$$

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

Основная заработная плата  $Z_{\text{осн}}$  руководителя рассчитывается по следующей формуле:

$$Z_{\text{осн}} = Z_{\text{дн}} \cdot T_{\text{раб}},$$

где  $T_{\text{раб}}$  – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, раб.дн. (таблица 16);

$Z_{\text{дн}}$  – среднедневная заработная плата работника, руб.

Значит, для руководителя:

$$Z_{\text{осн}} = 2718 \cdot 4 = 10872 \text{ рублей}$$

Для инженера:

$$Z_{\text{осн}} = 1702,9 \cdot 149 = 254670,8 \text{ рублей}$$

Месячный должностной оклад работника рассчитывается по формуле:

$$Z_{\text{м}} = Z_{\text{б}} \cdot K_{\text{р}}$$

где  $Z_{\text{б}}$  – базовый оклад, руб;  $K_{\text{р}}$  – районный коэффициент, равный 1,3.

Значит, для руководителя:

$$Z_{\text{м}} = 25730 \cdot 1,3 = 33490 \text{ рублей}$$

Для инженера:

$$Z_{\text{м}} = 16140 \cdot 1,3 = 20982 \text{ рублей}$$

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{\text{дн}} = (Z_{\text{м}} \cdot M) / F_{\text{д}}$$

где  $Z_{\text{м}}$  – месячный должностной оклад работника, руб);

$M$  – количество месяцев работы без отпуска в течение года: при отпуске в 24 раб. дня  $M=11,2$  месяца, 5 - дневная неделя;

$F_{\text{д}}$  – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала (в рабочих днях) (табл.14).

Тогда, для руководителя:

$$Z_{\text{дн}} = 33490 \cdot 11,2/138 = 2718 \text{ рублей}$$

Для Инженера:

$$Z_{\text{дн}} = 20982 \cdot 11,2/138 = 1702,9 \text{ рублей}$$

Результаты расчета основной заработной платы представлены в таблице 18.

Таблица 18– Результаты расчета основной заработной платы

Исполнители	З <sub>б</sub> ,руб.	К <sub>р</sub>	З <sub>м</sub> ,руб.	З <sub>дн</sub> ,руб.	Т <sub>раб.раб.</sub> дн.	З <sub>осн</sub> ,руб
Руководитель	25730	1,3	33490	2718	4	10872
Инженер	16140	1,3	20982	1702,9	149	254670,8
Итого З <sub>осн</sub>						265542,8

#### 4.9 Дополнительная заработная плата научно-производственного персонала

Дополнительная заработная плата рассчитывается в пределах от 10% до 15% от основной заработной платы участников, непосредственно участвующих в выполнении:

$$Z_{\text{доп}} = Z_{\text{осн}} \cdot K_{\text{доп}},$$

где  $Z_{\text{доп}}$  - дополнительная заработная плата, руб;

$Z_{\text{осн}}$  - основная заработная плата, руб;

$K_{\text{доп}}$ ,- коэффициент дополнительной заработной платы = 12%.

Значит, для руководителя:

$$Z_{\text{доп}} = 33490 \cdot 0,12 = 4018,8 \text{ рублей}$$

Для инженера:

$$Z_{\text{доп}} = 20982 \cdot 0,12 = 2517,84 \text{ рублей}$$

Таблица 19 – Дополнительная заработная плата исполнителей НТИ

Заработная плата	Руководитель	Инженер
Основная зарплата	33490	20982
Дополнительная зарплата	4018,8	2517,84
Зарплата исполнителя	37508,8	23500,84
Итого по статье С <sub>зп</sub>	67009,64	

#### 4.10 Отчисления на социальные нужды

Величина отчисленной во внебюджетные фонды определяется по формуле:

$$З_{внеб} = k_{внеб} \cdot (З_{осн} + З_{доп}),$$

где  $k_{внеб} = 30,2\%$  коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд обязательного медицинского страхования и пр.)

Значит, для руководителя:

$$З_{внеб} = 37508,8 \cdot 0,302 = 11327,6576 \text{ рублей}$$

Для инженера:

$$З_{внеб} = 23500,84 \cdot 0,302 = 7050,252 \text{ рублей}$$

Таблица 20 – Отчисления на социальные нужды

	Руководитель	Инженер
Зарплата	37508,8	23500,84
Отчисления на социальные нужды	11327,6576	7050,252

#### 4.11 Накладные расходы

Накладные расходы – это затраты на управление и хозяйственное обслуживание и расходы по содержанию, эксплуатации и ремонту

оборудования, производственного инструмента и инвентаря, зданий, сооружений и др., что порядка 85% от заработной платы. Суммарно накладные расходы составляют 51858,194 рублей.

#### 4.12 Организационная структура проекта

Таблица 21– Выбор организационной структуры научного проекта

<b>Критерии выбора</b>	<b>Функциональная</b>	<b>Матричная</b>	<b>Проектная</b>
Степень неопределенности условий реализации проекта	Низкая	Высокая	Высокая
Технология проекта	Стандартная	Сложная	Новая
Сложность проекта	Низкая	Средняя	Высокая
Взаимозависимость между отдельными частями проекта	Низкая	Средняя	Высокая
Критичность фактора времени (обязательства по срокам завершения работ)	Низкая	Средняя	Высокая
Взаимосвязь и взаимозависимость проекта от организаций более высокого уровня	Высокая	Средняя	Низкая

Вывод: на основе проведенного анализа выбора организационной структуры научного проекта, было выявлено, что наиболее выгодной является функциональная структура.

#### **4.13 Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования**

Эффективность научного ресурсосберегающего проекта включает в себя социальную эффективность, экономическую и бюджетную эффективность. Показатели общественной эффективности учитывают социально-экономические последствия осуществления инвестиционного проекта как для общества в целом, в том числе непосредственные результаты и затраты проекта, так и затраты, и результаты в смежных секторах экономики, экологические, социальные и иные внеэкономические эффекты. Показатели экономической эффективности проекта учитывают финансовые последствия его осуществления для предприятия, реализующего данный проект. В этом случае показатели эффективности проекта в целом характеризуют с экономической точки зрения технические, технологические и организационные проектные решения. Бюджетная эффективность характеризуется участием государства в проекте с точки зрения расходов и доходов бюджетов всех уровней.

#### **4.14 Динамические методы экономической оценки инвестиций**

Динамические методы оценки инвестиций базируются на применении показателей:

- чистая текущая стоимость (NPV);
- срок окупаемости (DPP);
- внутренняя ставка доходности (IRR);
- индекс доходности (PI).

Все перечисленные показатели основываются на сопоставлении чистых денежных поступлений от операционной и инвестиционной деятельности, и их приведении к определенному моменту времени. Теоретически чистые денежные поступления можно приводить к любому моменту времени (к будущему либо

текущему периоду). Но для практических целей оценку инвестиции удобнее осуществлять на момент принятия решений об инвестировании средств.

#### 4.15 Чистая текущая стоимость (NPV)

Данный метод основан на сопоставлении дисконтированных чистых денежных поступлений от операционной и инвестиционной деятельности. Если инвестиции носят разовый характер, то NPV определяется по формуле:

$$NPV = \sum_{t=1}^n \frac{ЧДП_{опt}}{(1+i)^t} - I_0,$$

где ЧДП<sub>опt</sub> – чистые денежные поступления от операционной деятельности;

$I_0$  – разовые инвестиции, осуществляемые в нулевом году;

$t$  – номер шага расчета ( $t=0, 1, 2 \dots n$ );

$n$  – горизонт расчета;

$i$  – ставка дисконтирования (желаемый уровень доходности инвестируемых средств).

Чистая текущая стоимость является абсолютным показателем. Условием экономичности инвестиционного проекта по данному показателю является выполнение следующего неравенства:  $NPV > 0$ .

Чем больше NPV, тем больше влияние инвестиционного проекта на экономический потенциал предприятия, реализующего данный проект, и на экономическую ценность этого предприятия.

Таким образом, инвестиционный проект считается выгодным, если NPV является положительной.

Таблица 22–Расчет чистой текущей стоимости по проекту в целом

№	Наименование показателей	Шаг расчета				
		0	1	2	3	4
1.	Выручка от реализации, тыс.руб	0	252,9	252,9	252,9	252,9
2.	Итого приток	0	252,9	252,9	252,9	252,9
3.	Инвестиционные издержки, тыс.руб.	-209,9	0	0	0	0
4.	Операционные затраты, тыс. руб С+Ам+ФОТ	0	52,5	52,5	52,5	52,5
4.1	Налогооб. прибыль=1-4	0	200,4	200,4	200,4	200,4
5.	Налоги Выр-опер=донал .приб*20%	0	40,08	40,08	40,08	40,08
6.	Итого отток Опер.затр+налоги	-209,9	92,58	92,58	92,58	92,58
7.	Чистый денежный поток ЧДП=Пчист+Ам Пчист=Пдонал.-налог	-209,9	160,32	160,32	160,32	160,32
8.	Коэффициент дисконтирования (приведения при $i = 0,20$ )	1	0,833	0,694	0,578	0,482
9.	Дисконтированный чистый денежный поток ( $c7*c8$ ) -	-209,9	133,55	111,26	92,67	77,27
10.	То же нарастающим итогом (NPV =204,85)	-209,9	-76,35	34,91	127,57	204,85

Таким образом, чистая текущая стоимость по проекту в целом составляет **204 847** руб., что позволяет судить о его эффективности.

#### 4.16 Дисконтированный срок окупаемости

Как отмечалось ранее, одним из недостатков показателя простого срока окупаемости является игнорирование в процессе его расчета разной ценности денег во времени.

Этот недостаток устраняется путем определения дисконтированного срока окупаемости. Рассчитывается данный показатель примерно по той же методике, что и простой срок окупаемости, с той лишь разницей, что последний не учитывает фактор времени.

Наиболее приемлемым методом установления дисконтированного срока окупаемости является расчет кумулятивного (нарастающим итогом) денежного потока (см. табл. 23).

Таблица 23 – Дисконтированный срок окупаемости

№	Наименование показателя	Шаг расчета				
		0	1	2	3	4
1.	Дисконтированный чистый денежный поток, тыс. руб. ( $i=0,20$ )	-209,9	133,55	111,26	92,67	77,27
2.	То же нарастающим итогом, тыс. руб.	-209,9	-76,35	34,91	127,57	204,85
3.	Дисконтированный срок окупаемости	$PP_{дек} = 1 + 76,35/111,26 = 1,59$ месяца				

#### 4.17 Внутренняя ставка доходности (IRR)

Для установления показателя чистой текущей стоимости (NPV) необходимо располагать информацией о ставке дисконтирования, определение которой является проблемой, поскольку зависит от оценки экспертов. Поэтому, чтобы уменьшить субъективизм в оценке эффективности инвестиций на практике широкое распространение получил метод, основанный на расчете внутренней ставки доходности (IRR). Между чистой текущей стоимостью (NPV) и ставкой дисконтирования ( $i$ ) существует обратная зависимость. Эта зависимость следует из таблицы 24 и графика, представленного на рисунке 36.

Таблица 24– Зависимость NPV от ставки дисконтирования

№ п/п	Наименование показателя	0	1	2	3	4	NPV
1	Чистые денежные потоки	-209,9	160,32	160,32	160,32	160,32	
2	коэффициент дисконтирования						
	i=0,1	1	0,909	0,826	0,751	0,683	
	i=0,2	1	0,833	0,694	0,578	0,482	
	i=0,3	1	0,769	0,592	0,455	0,350	
	i=0,4	1	0,714	0,51	0,364	0,26	
	i=0,5	1	0,667	0,444	0,295	0,198	
	i=0,6	1	0,625	0,390	0,244	0,095	
	i=0,7	1	0,588	0,335	0,203	0,070	
3	Дисконтированный денежный поток						
	i=0,1		145,7	132,4	120,4	109,5	298,2
	i=0,2		133,5	111,3	92,7	77,3	204,8
	i=0,3		123,3	94,9	72,9	56,1	137,4
	i=0,4		114,5	81,8	58,4	41,7	86,4
	i=0,5		106,9	71,2	47,3	31,7	47,3
	i=0,6		100,2	62,5	39,1	15,2	7,2
	i=0,7		94,3	53,7	32,5	11,2	-18,2

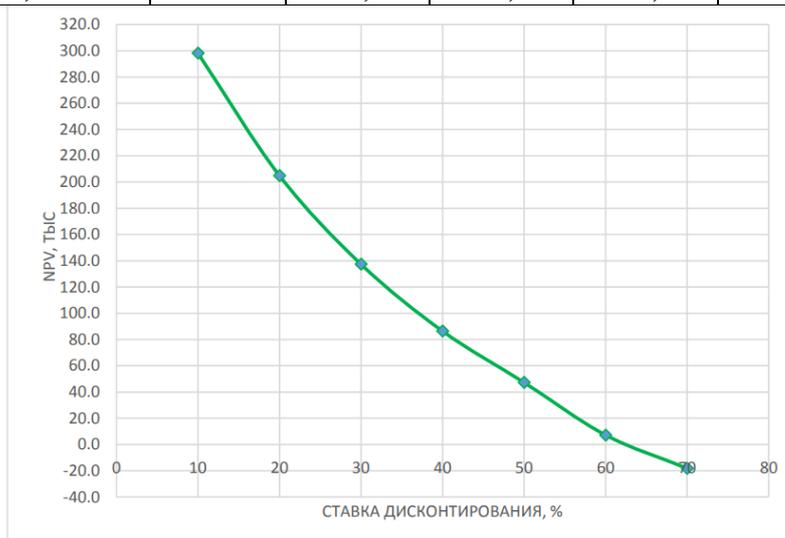


Рисунок 36 – Зависимость NPV от ставки дисконтирования

Из таблицы и графика следует, что по мере роста ставки дисконтирования чистая текущая стоимость уменьшается, становясь отрицательной. Значение ставки, при которой NPV обращается в нуль, носит название «внутренней ставки доходности» или «внутренней нормы прибыли». Из графика получаем, что IRR составляет 0,69.

#### **4.18 Индекс доходности (рентабельности) инвестиций (PI)**

Индекс доходности показывает, сколько приходится дисконтированных денежных поступлений на рубль инвестиций. Расчет этого показателя осуществляется по формуле:

$$PI = \sum_{t=1}^n \frac{ЧПД_t}{(1 + t)^t} / I_0,$$

где  $I_0$  – первоначальные инвестиции.

$$PI = (133547 + 111262 + 92665 + 77274) / 209997 = 1,98$$

$PI = 1,98 > 1$ , следовательно, проект эффективен при  $i=0,1$ ;  $NPV=204848$

#### **4.19 Оценка сравнительной эффективности исследования**

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

## 4.20 Оценка сравнительной эффективности исследования

Таблица 25 – Группировка затрат по статьям аналогов разработки

Вариант исполнения аналога №	Сырье, материалы (за вычетом возвратных отходов), покупные изделия и полуфабрикаты	Специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ	Основная заработная плата	Отчисления на социальные нужды	Итого плановая себестоимость
1	1500	150000	88365	26509,5	266374
2	2000	200000	104905	31471,5	338376,5

Интегральный финансовый показатель разработки определяется как:

$$I_{\Phi}^p = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{max}} = \frac{209997,2}{338376,5} = 0,62$$

$$I_{\Phi}^p = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{max}} = \frac{266374}{338376,5} = 1,79$$

$$I_{\Phi}^p = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{max}} = \frac{338376,5}{338376,5} = 1$$

где  $I_{\Phi}^p$  - интегральный финансовый показатель разработки;  $\Phi_{pi}$  – стоимость  $i$ -го варианта исполнения;  $\Phi_{max}$  – максимальная стоимость исполнения научно-исследовательского проекта (в т.ч. аналоги).

Полученная величина интегрального финансового показателя разработки отражает соответствующее численное удешевление стоимости разработки в разы.

Интегральный показатель ресурсоэффективности вариантов исполнения объекта исследования можно определить следующим образом:

$$I_m^a = \sum_{i=1}^n a_i b_i^a, \quad I_m^p = \sum_{i=1}^n a_i b_i^p$$

где  $I_m$  – интегральный показатель ресурсоэффективности вариантов;  $a_i$  – весовой коэффициент  $i$ -го параметра;  $b_i^a, b_i^p$  – бальная оценка  $i$ -го параметра для аналога и разработки, устанавливается экспертным путем по выбранной шкале оценивания;  $n$  – число параметров сравнения.

Расчет интегрального показателя ресурсоэффективности рекомендуется проводить в форме таблицы, пример которой приведен ниже.

Таблица 26 – Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта.

Критерии	Весовой коэфф. параметра	Текущий проект	Аналог 1	Аналог 2
1.Экономичность	0,1	5	4	3
2. Экологичность	0,15	5	3	3
3.Надежность	0,2	5	4	3
4.Безопасность	0,3	5	3	3
5.Простота эксплуатации	0,25	5	3	3
ИТОГО	1	25	17	15

$$I_m^p = 5 \cdot 0,1 + 5 \cdot 0,15 + 5 \cdot 0,2 + 5 \cdot 0,3 + 5 \cdot 0,25 = 5$$

$$I_1^A = 4 \cdot 0,1 + 3 \cdot 0,15 + 4 \cdot 0,2 + 3 \cdot 0,3 + 3 \cdot 0,25 = 3,3$$

$$I_2^A = 3 \cdot 0,1 + 3 \cdot 0,15 + 3 \cdot 0,2 + 3 \cdot 0,3 + 3 \cdot 0,25 = 3$$

Интегральный показатель эффективности разработки ( $I_{финр}^p$ ) и аналога ( $I_{финр}^a$ ) определяется на основании интегрального показателя ресурсоэффективности и интегрального финансового показателя по формуле:

$$I_{финр}^p = \frac{I_m^p}{I_{\phi}^p} = \frac{5}{0,62} = 8,06$$

$$I_{финр}^{a_1} = \frac{I_m^{a_1}}{I_{\phi}^{a_1}} = \frac{3,3}{1,79} = 1,84$$

$$I_{финр}^{p_2} = \frac{I_m^{a_2}}{I_{\phi}^{a_2}} = \frac{3}{1} = 3$$

Сравнение интегрального показателя эффективности текущего проекта и аналогов позволит определить сравнительную эффективность проекта. Сравнительная эффективность проекта:

$$\mathcal{E}_{\text{ср}} = \frac{I_{\text{финр}}^p}{I_{\text{финр}}^{a_1}} = \frac{8,06}{1,84} = 4,38$$

$$\mathcal{E}_{\text{ср}} = \frac{I_{\text{финр}}^p}{I_{\text{финр}}^{a_2}} = \frac{8,06}{3} = 2,69$$

где  $\mathcal{E}_{\text{ср}}$  – сравнительная эффективность проекта;  $I_{\text{тэ}}^p$  – интегральный показатель разработки;  $I_{\text{тэ}}^a$  – интегральный технико-экономический показатель аналога.

Таблица 27– Сравнительная эффективность разработки

№ п/п	Показатели	Аналог 1	Аналог 2	Разработка
1	Интегральный финансовый показатель разработки	1,79	1	0,62
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	3,3	3	5
3	Интегральный показатель эффективности	1,84	3	8,06
4	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	4,38		2,69

Сравнение значений интегральных показателей эффективности позволяет судить о приемлемости существующего варианта решения поставленной в магистерской диссертации технической задачи с позиции финансовой и ресурсной эффективности.

## Вывод по разделу

В результате выполнения изначально сформулированных целей раздела, можно сделать следующие выводы:

1. Проведенный анализ конкурентных технических решений показал, что метод, который используется в настоящей магистерской диссертации, является наиболее предпочтительным, выгодным и эффективным методом изготовления изделий, по сравнению с остальными;

2. Разработан план-график выполнения этапов работ для руководителя и инженера, позволяющий оценить и спланировать рабочее время исполнителей. Общее количество календарных дней для выполнения исследования – 158, общее количество дней, в течение которых работал инженер – 149, и руководитель – 32;

3. Составлен бюджет проектирования, позволяющий оценить затраты на реализацию проекта, которые составляют 350000 руб.;

4. По факту оценки эффективности исследовательской работы, можно сделать выводы:

- Значение интегрального финансового показателя НИ составляет 0,62, что является показателем того, что НИ является финансово выгодной, по сравнению с аналогами;

- Значение интегрального показателя ресурсоэффективности НИ составляет 5, по сравнению с 3,3 и 3,;

- Значение интегрального показателя эффективности НИ составляет 8,06, по сравнению с 3 и 1,84, и является наиболее высоким, что означает, что техническое решение, рассматриваемое в НИ, является наиболее эффективным вариантом исполнения.

5. В ходе проведения анализа показателей эффективности инвестиций была получена чистая текущая стоимость (NPV) – 204,8тыс. руб. Таким образом, данный инвестиционный проект можно считать выгодным, NPV является положительной величиной. Дисконтированный срок окупаемости проекта (PPДСК) составляет 1,59 года. Внутренняя ставка доходности (IRR) – 0,69, что позволяет признать инвестиционный проект экономически оправданным, так как

выполняется условие неравенства  $IRR > i$ . Индекс доходности (PI) – 1,98, и, основываясь на том, что данная величина превышает единицу, можно утверждать, что данная инвестиция приемлема.

## **5 Социальная ответственность**

В современных условиях труда для снижения производственного травматизма и профессиональной заболеваемости важным является внедрение системы целенаправленных действий по защите и охране труда на всех стадиях производственного процесса.

Магистерская работа по разработке способов постобработки сетчатых металлических метаматериалов, полученных электронно-лучевым плавлением, предполагает проведение работ с установкой по ультразвуковому воздействию, а также с химическими реагентами.

Кроме того, в ходе работы использовалась персональная электронно-вычислительная машина (ПЭВМ). Следовательно, для внедрения определенных правил и мер предосторожности требуется разработать комплекс мероприятий технического, организационного, режимного и правового характера, минимизирующих негативные последствия.

Работы проводились в научной лаборатории № 018 третьего корпуса ТПУ.

Рассмотрение безопасности и гигиены труда при осуществлении работ по разработке способов важно, так как необходимо исключить несчастные случаи и профессиональные заболевания в производстве, обеспечивающих снижение вредных воздействий на окружающую среду и безопасность в чрезвычайных ситуациях.

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

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

Весь персонал обязан знать и строго соблюдать правила техники безопасности. Обучение персонала технике безопасности и производственной санитарии состоит и в вводном инструктаже, и инструктаже на рабочем месте ответственным лицом [53].

Проверка знаний правил техники безопасности проводится квалификационной комиссией после обучения на рабочем месте. Проверяемому, присваивается соответствующая его знаниям и опыту работы квалификационная группа по технике безопасности и выдается специальное удостоверение.

К работе с установкой для электроформования и всеми узлами данной установки допускаются лица не моложе 18 лет, не имеющих медицинских противопоказаний, прошедших вводный инструктаж и инструктаж по безопасности труда на рабочем месте. К самостоятельной работе допускаются работники после специального обучения и проверки знаний правил электробезопасности, приобретенных навыков и безопасных способов выполнения работы с данной установкой, ознакомленные с инструкцией по эксплуатации прибора и имеющие не менее II группы по электробезопасности [54].

Повторная проверка знаний норм и правил электробезопасности, правил безопасной работы с химическими веществами проводится с работниками не реже 1 раза в 12 месяцев, повторный инструктаж на рабочем месте – не реже 1 раза в 3 месяца.

Проведение всех видов инструктажа должно оформляться в Журнале регистрации инструктажа установленного образца, с обязательными подписями получившего и проводившего инструктаж, с указанием даты проведения

инструктажа, наименования и номеров инструкции на виды работ, по которым проводится инструктаж.

При введении в эксплуатацию нового оборудования сотрудники, которые будут работать на нем, должны пройти внеплановый инструктаж по правилам эксплуатации и безопасной работе на данном оборудовании [55].

### 5.1.2 Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны исследователя

Рациональная планировка рабочего места предусматривает четкий порядок и постоянство размещения предметов, средств труда и документации. То, что требуется для выполнения работ чаще должно располагаться в зоне легкой досягаемости рабочего пространства, как показано на рисунке 37.

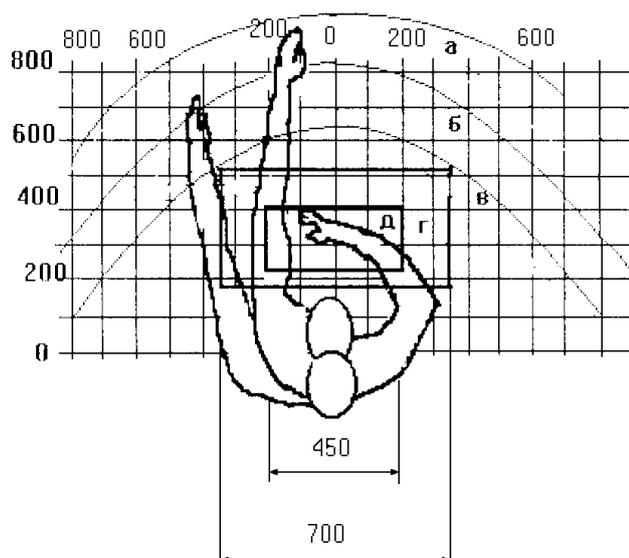


Рисунок 37 – Зоны досягаемости рук в горизонтальной плоскости: а – зона максимальной досягаемости рук; б – зона досягаемости пальцев при вытянутой руке – зона легкой досягаемости ладони; г – оптимальное пространство для грубой ручной работы; д – оптимальное пространство для тонкой ручной работы

Оптимальное размещение предметов труда и документации в зонах досягаемости рук: дисплей размещается в зоне а (в центре); клавиатура – в зоне

г/д; системный блок размещается в зоне б (слева); принтер находится в зоне а (справа); документация – в зоне легкой досягаемости ладони – в (слева) – литература и документация, необходимая при работе; в выдвижных ящиках стола – литература, не используемая постоянно.

При проектировании письменного стола должны быть учтены следующие требования. Высота рабочей поверхности стола рекомендуется в пределах 680-800 мм [56]. Высота рабочей поверхности, на которую устанавливается клавиатура, должна быть 650 мм. Рабочий стол должен быть шириной не менее 700 мм и длиной не менее 1400 мм. Должно иметься пространство для ног высотой не менее 600 мм, шириной – не менее 500 мм, глубиной на уровне колен – не менее 450 мм и на уровне вытянутых ног – не менее 650 мм.

Рабочее кресло должно быть подъёмно-поворотным и регулируемым по высоте и углам наклона сиденья и спинки, а также расстоянию спинки до переднего края сиденья [57]. Рекомендуется высота сиденья над уровнем пола 420-550 мм. Конструкция рабочего кресла должна обеспечивать: ширину и глубину поверхности сиденья не менее 400 мм; поверхность сиденья с заглаблённым передним краем. Монитор должен быть расположен на уровне глаз оператора на расстоянии 500-600 мм [58]. Согласно нормам, угол наблюдения в горизонтальной плоскости должен быть не более 45 градусов к нормали экрана. Лучше если угол обзора будет составлять 30 градусов. Кроме того, должна быть возможность выбирать уровень контрастности и яркости изображения на экране.

Клавиатуру следует располагать на поверхности стола на расстоянии 100-300 мм от края. Нормальным положением клавиатуры является её размещение на уровне локтя оператора с углом наклона к горизонтальной плоскости 15 градусов. Более удобно работать с клавишами, имеющими вогнутую поверхность, четырёхугольную форму с закруглёнными углами. Конструкция клавиши должна обеспечивать оператору ощущение щелчка. Цвет клавиш должен контрастировать с цветом панели.

## 5.2 Производственная безопасность

При работе с установкой для УЗВ, химическими реагентами и ПЭВМ на сотрудников могут воздействовать опасные и вредные факторы, приведенные в таблице 28.

Таблица 28 – Основные элементы производственного процесса, формирующие опасные и вредные факторы.

Факторы (ГОСТ 12.0.003– 2015)	Этапы работ			Нормативные документы
	Разработка	Изготовлен	Эксплуатац	
1. Повышенный уровень локальной вибрации	-	+	-	СН 2.2.4/2.1.8.566–96. Производственная вибрация, вибрация в помещениях жилых и общественных зданий
2. Повышенный уровень шума	-	+	-	ГОСТ 12.1.029-80 «Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Средства и методы защиты от шума. Классификация»
3. Недостаточная освещенность рабочего места	+	+	+	СП 52.13330.2016 Естественное и искусственное освещение
4. Отклонение показателей микроклимата	-	+	-	СанПиН 2.2.4.548-96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений
5. Повышенное значение напряжения в электрической цепи	-	+	+	ГОСТ ИЕС 61140-2012 Защита от поражения электрическим током. Общие положения безопасности установок и оборудования
6. Токсическое воздействие химических веществ	+	+	+	Техника безопасности при работе в химико-аналитических лабораториях ПНД Ф 12.13.1-02. Рабочее место при выполнении работ стоя ГОСТ 12.2.033-78.

## **5.2.1 Анализ вредных производственных факторов**

### **5.2.1.1 Повышенный уровень локальной вибрации**

Воздействие вибрации может приводить к нарушениям сердечной деятельности, расстройству нервной системы, спазму сосудов, изменению в суставах, приводящему к ограничению подвижности и изменению в вестибулярном аппарате [59]. Длительное воздействие вибрации приводит к вибрационной болезни. В качестве защиты от вибрационного воздействия при работе с установкой для УЗВ могут использоваться виброгасители для установки, а также СИЗ оператора (прорезиненный коврик) [60].

Помещение, в котором находится установка для осуществления УЗВ относится к категории 3 – технологического типа «а» [61].

Согласно требованиям, при среднегеометрической частоте полос 50 Гц, виброскорость должна соответствовать значениям меньше 0,11 м/с. Таким образом, используемое оборудование для обеспечения УЗВ полностью соответствует требованиям уровня локальной вибрации.

### **5.2.1.2 Повышенный уровень шума**

Шум ухудшает условия труда, оказывают вредное воздействие на организм человека, а именно, на органы слуха и на весь организм через центральную нервную систему. В результате этого ослабляется внимание, ухудшается память, снижается реакция, увеличивается число ошибок при работе. Шум может создаваться работающим оборудованием, установками кондиционирования воздуха, осветительными приборами дневного света, а также проникать извне. При выполнении работы на ПЭВМ уровень шума на рабочем месте не должен превышать 50 дБ [62].

Основным источником шума на рабочем месте является установка для осуществления УЗВ. В соответствии с нормами СН 2.2.4/2.1.8.562-96 допустимый уровень шума при работе, требующей сосредоточенности, работе с

повышенными требованиями к процессам наблюдения на рабочих местах в помещениях, не должен превышать 50 дБ. При работе в лабораториях с шумным оборудованием уровень шума не должен превышать 75 дБ[62]. Следовательно, средства и методы защиты от шума должны обеспечивать уровень шума на рабочем месте не выше 75 дБ.

Снижение шума, воздействующего на человека на рабочих местах до значений, не превышающих допустимые, достигается применением средств и методов коллективной защиты, применением средств индивидуальной защиты. В лаборатории применяются противошумовые наушники при работе на установке для электроформования.

### **5.2.1.3 Недостаточная освещенность рабочего места**

Уровень освещенности на рабочем месте должен соответствовать условиям работы и быть оптимальным по яркости (не более 500 кд/м<sup>2</sup> для площади рабочей поверхности более 0,1 м<sup>2</sup>) [63]. Световой спектр должен максимально соответствовать дневному освещению, так как оно оптимально соответствует человеческой физиологии. Очень высокий уровень освещенности, так же, как и недостаточный, приводит к быстрому утомлению зрения. Освещение должно быть равномерным на всей площади рабочего места, так как при переносе взгляда с более освещенных на менее освещенные участки рабочего места и наоборот происходит понижение остроты зрения на достаточно долгий промежуток времени. Помещение, в котором располагается установка для электроформования, имеет линейные размеры 6×5 м и высоту 3 м.

Учитывая особенности процесса работы на этапе химического травления (характеристика зрительной работы IV средней точности при норме наименьшего размера объекта различения от 0,5 до 1) возможно применение схемы общего равномерного освещения. Согласно нормам освещенности на рабочих местах производственных помещений при искусственном освещении в лаборатории требуется создать освещенность  $E=200$  лк [64].

В лаборатории применяется общая система освещения люминесцентными лампами ЛД. Интегральным критерием оптимальности расположения светильников является величина  $\lambda$ , которая для люминесцентных светильников с защитной решеткой лежит в диапазоне 1,1–1,3. Принимаем  $\lambda = 1,2$ , расстояние светильников от перекрытия (свес)  $h_c = 0,2$  м.

Высота светильника над рабочей поверхностью определяется по формуле:

$$h = h_n - h_p,$$

где  $h_n$  – высота светильника над полом,  $h_p$  – высота рабочей поверхности над полом.

Высота светильника над полом в помещении высотой  $H$  равной 3 м:

$$h_n = H - h_c = 3 - 0,2 = 2,8 \text{ м}$$

Высота рабочей поверхности  $h_{pp} = 0,8$  м. Высота светильника над рабочей поверхностью:

$$h = h_n - h_{pp} = 2,8 - 0,8 = 2,0 \text{ м.}$$

Расстояние между соседними светильниками или рядами определяется по формуле:

$$L = \lambda \cdot h = 1,2 \cdot 2,0 = 2,4 \text{ м.}$$

Количество рядов светильников с люминесцентными лампами определяется по формуле

$$n_{\text{ряд}} = \frac{(B - \frac{2}{3}L)}{L} + 1 = 2,4 \approx 2$$

где  $n_{\text{ряд}}$  – количество рядов;  $B$  – ширина помещения, м.

Длина светильника  $l_{\text{св}} = 1,23$  м.

Количество светильников с люминесцентными лампами определяется по формуле:

$$n_{\text{св}} = \frac{(A - \frac{2}{3}L)}{l_{\text{св}} + 0,5} = 2,41 \approx 2$$

где  $n_{\text{св}}$  – количество светильников в ряду;  $A$  – длина помещения, м.

Общее количество светильников с люминесцентными лампами в помещении определяется по формуле:

$$N = n_{\text{ряд}} \cdot n_{\text{св}} = 2 * 2 = 4$$

где  $N$  – общее количество светильников;  $n_{\text{ряд}}$  – количество рядов;  $n_{\text{св}}$  – количество светильников в ряду.

Светильники размещаются в два ряда. В каждом ряду можно установить 2 светильника типа ОД мощностью 40 Вт (с длиной 1,23 м), при этом разрывы между светильниками в ряду составят 2,4 м. План помещения и размещения на нем светильников представлен на рисунке 38. Учитывая, что в каждом светильнике установлено две лампы, общее число ламп в помещении равно  $N=8$ .

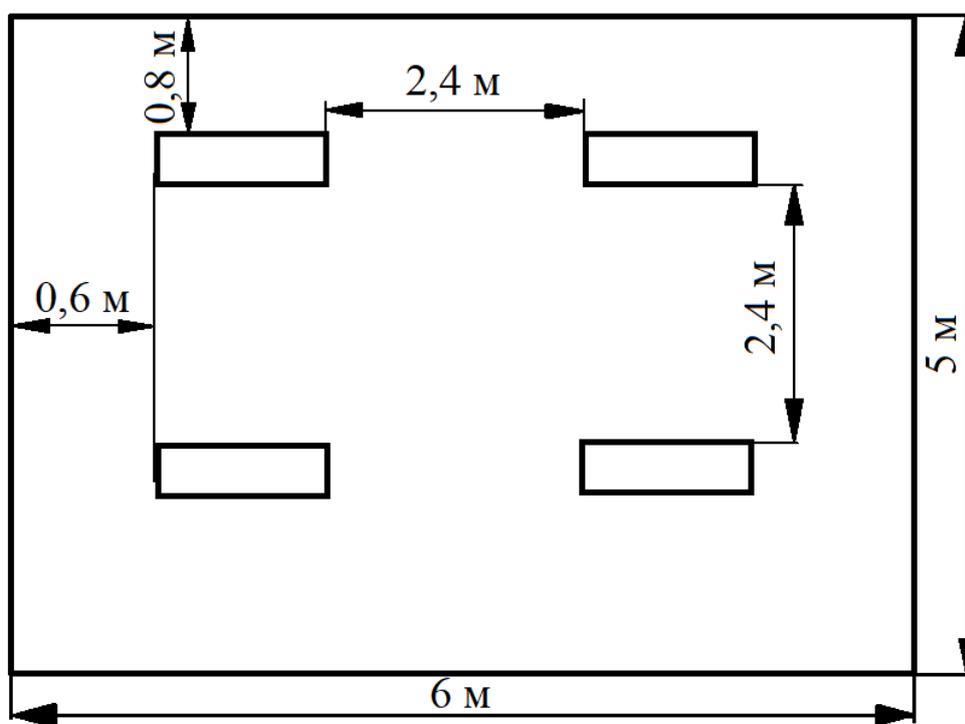


Рисунок 38 – План помещения и размещения светильников с люминесцентными лампами

Находим индекс помещения:

$$i = \frac{S}{h(A + B)} = \frac{30}{2,0 \cdot (6 + 5)} = 1,36$$

Для коэффициентов отражения берутся приблизительные значения: 30% для стен и 50% для потолка. Коэффициент использования светового потока  $\eta$

светильников с люминесцентными лампами с учетом индекса помещения соответственно равен 51 %.

Потребный световой поток ламп в каждом из рядов:

$$\Phi = \frac{E_H \cdot S \cdot K_3 \cdot Z}{N_{\text{л}} \cdot \eta} = \frac{200 \cdot 30 \cdot 1,5 \cdot 1,2}{8 \cdot 0,51} = 2647 \text{ лм}$$

Ближайшая стандартная лампа – ЛД 40 Вт с потоком 2500 лм. Делаем проверку выполнения условия:

$$-10\% \leq \frac{\Phi_{\text{л.станд}} - \Phi_{\text{л.расч}}}{\Phi_{\text{л.станд}}} \cdot 100\% \leq +20\%$$

$$-10\% \leq -5,88\% \leq +20\%$$

Таким образом, электрическая мощность осветительной установки:

$$P = 8 * 40 = 320 \text{ Вт.}$$

#### 5.2.1.4 Отклонение показателей микроклимата

Воздух рабочей зоны (микроклимат) производственных помещений определяют следующие параметры: температура, относительная влажность, скорость движения воздуха. Оптимальные значения характеристик микроклимата для категории Ia (уровень энергозатрат до 139 Вт) приведены в таблице 29, согласно СанПиН 2.2.4.548-96 Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений [65].

Таблица 29 – Оптимальные и допустимые параметры микроклимата

Период года	Температура воздуха, °С	Температура поверхностей, °С	Относительная влажность, %	Скорость движения воздуха, м/с
Холодный и переходный	22-24	21-25	60-40	0,1
Теплый	23-25	22-26	60-40	0,1

К мероприятиям по оздоровлению воздушной среды в производственном помещении относятся: правильная организация вентиляции и кондиционирования воздуха, отопление помещений. Вентиляция может осуществляться естественным и механическим путём. В помещение должны подаваться следующие объёмы наружного воздуха: при объёме помещения до 20 м<sup>3</sup> на человека – не менее 30 м<sup>3</sup> в час на человека; при объёме помещения более 40 м<sup>3</sup> на человека и отсутствии выделения вредных веществ допускается естественная вентиляция.

Система отопления должна обеспечивать достаточное, постоянное и равномерное нагревание воздуха. В помещениях с повышенными требованиями к чистоте воздуха должно использоваться водяное отопление. Параметры микроклимата в используемой лаборатории регулируются системой центрального отопления, и имеют следующие значения: влажность – 40%, скорость движения воздуха – 0,1 м/с, температура летом -20–25 °С, зимой -13–15 °С. В лаборатории осуществляется естественная вентиляция. Воздух поступает и удаляется через щели, окна, двери. Основной недостаток такой вентиляции в том, что приточный воздух поступает в помещение без предварительной очистки и нагревания.

#### **5.2.1.5 Токсической воздействию химических веществ**

Задачей химической безопасности является охрана внутренней среды человека от многочисленных вредных для организма химических агентов, способных проникать в ткани и органы, накапливаться в них и сохраняться длительное время.

В работе по разработке методов постобработки металлических метаматериалов одним из исследуемых методов является химическое травление. В качестве химических реагентов используются 65% водный раствор азотной и 45% водный раствор плавиковой кислот, ПДК которых равен 100 мг/м<sup>3</sup>, согласно документу ПНД Ф 12.13.1-02

При работе в химической лаборатории необходимо соблюдать следующие требования техники безопасности, согласно документу ПНД Ф 12.13.1-02:

- при работе с химическими реактивами в лаборатории должно находиться не менее двух сотрудников;
- приступая к работе, сотрудники обязаны осмотреть и привести в порядок свое рабочее место, освободить его от ненужных для работы предметов;
- перед работой необходимо проверить исправность оборудования, рубильников, наличие заземления и пр;
- работа с едкими и ядовитыми веществами, а также с органическими растворителями проводится только в вытяжных шкафах;
- запрещается набирать реактивы в пипетки ртом, для этой цели следует использовать резиновую грушу или другие устройства;
- при определении запаха химических веществ следует нюхать осторожно, направляя к себе пары или газы движением руки;
- работы, при которых возможно повышение давления, перегрев стеклянного прибора или его поломка с разбрызгиванием горячих или едких продуктов, также выполняются в вытяжных шкафах. Работающий должен надеть защитные очки (маску), перчатки и фартук;
- при работах в вытяжном шкафу створки шкафа следует поднимать на высоту не более 20 - 30 см так, чтобы в шкафу находились только руки, а наблюдение за ходом процесса вести через стекла шкафа;
- при работе с химическими реактивами необходимо включать и выключать вытяжную вентиляцию не менее чем за 30 минут до начала и после окончания работ;
- смешивание или разбавление химических веществ, сопровождающееся выделением тепла, следует проводить в термостойкой или фарфоровой посуде;
- при упаривании в стаканах растворов следует тщательно перемешивать их, так как нижний и верхний слои растворов имеют различную плотность, вследствие чего может произойти выбрасывание жидкости;

- во избежание ожогов, поражений от брызг и выбросов нельзя наклоняться над посудой, в которой кипит какая-либо жидкость;
- нагревание посуды из обычного стекла на открытом огне без асбестированной сетки запрещено;
- при нагревании жидкости в пробирке держать ее следует отверстием в сторону от себя и от остальных сотрудников;
- ни при каких обстоятельствах нельзя допускать нагревание жидкостей в колбах или приборах, не сообщающихся с атмосферой;
- нагретый сосуд нельзя закрывать притертой пробкой до тех пор, пока он не охладится до температуры окружающей среды. Это ваши собственные мысли или будут ссылки?

## **5.2.2 Анализ опасных факторов**

### **5.2.2.1 Повышенное значение напряжения в электрической цепи**

Работа установки для электроформования предполагает использование высокого напряжения блока питания (до 15 кВ) и напряжения сети 380\220 В, которое может привести к поражению электрическим током. Источником поражения электрическим током могут быть незащищенные и неизолированные электропровода, поврежденные электродвигатели, открытые коммутаторы, не заземленное оборудование и др.

Персональный компьютер работает при переменном токе частотой 50 Гц и напряжении 220 В. Таким образом согласно ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов [65], предельно допустимая продолжительность воздействия напряжения 220 В при частоте переменного тока 50 Гц составляет от 0,01 до 0,08 с.

Проходя через живые ткани, электрический ток оказывает термическое, электролитическое и биологическое воздействия. Это приводит к различным нарушениям в организме, вызывая как местное поражение тканей и органов, так и общее поражение организма. Самый опасный – переменный ток частотой 50 – 60 Гц.

Электрозащитные средства – это переносимые и перевозимые изделия, служащие для защиты людей, работающих с электроустановками, от поражения электрическим током, от воздействия электрической дуги. Эти средства должны обеспечивать высокую степень защиты и удобство при эксплуатации. Их выбирают с учетом требований безопасности для данного вида работ. В первую очередь безопасность обеспечивается применением средств коллективной защиты, а затем, если она не может быть обеспечена, применяют средства индивидуальной защиты.

К средствам индивидуальной защиты от поражения электрическим током относятся:

- оградительные устройства, которые могут быть стационарными и переносимыми. Ограждения могут быть заблокированы с устройствами, отключающими рабочее напряжение при снятии;
- изолирующие устройства и покрытия;

- устройства защитного заземления, зануления и защитного отключения;
- устройства дистанционного управления;
- предохранительные устройства и др.

Для обеспечения электробезопасности обслуживающего персонала необходимо предусмотреть:

- защитное заземление всех металлических нетоковедущих частей электрооборудования  $R_3 \leq 4 \text{ Ом}$ ;
- раздельное размещение аппаратуры с напряжением до 1000 В и свыше 1000 В;
- ограждение электронного источника, исключающее возможность прикосновения к токоведущим частям;

– полное ограждение от прикосновения к аппаратуре с напряжением выше 1000 В;

– отключение всех источников питания установки общим рубильником.

При поражении работника электрическим током необходимо:

1. освободить пострадавшего от действия электрического тока и оценить состояние пострадавшего;

2. вызвать скорую медицинскую помощь или врача, либо принять меры для транспортировки пострадавшего в ближайшее лечебное учреждение;

3. если пострадавший находится в сознании, но до этого был в состоянии обморока или продолжительное время находился под действием тока, ему до прибытия врача необходимо обеспечить полный покой и в дальнейшем медицинское наблюдение в течение 2-3 часов;

4. если пострадавший находится в бессознательном состоянии, но с сохранившимся дыханием, его следует ровно и удобно положить, расстегнуть одежду, создать приток свежего воздуха и обеспечить полный покой, дать понюхать нашатырный спирт. Если пострадавший плохо дышит, необходимо сделать искусственное дыхание и непрямой массаж сердца;

5. при отсутствии признаков жизни (отсутствие дыхания, пульса, реакции зрачка на свет) нельзя считать пострадавшего мертвым. Ему должна быть оказана первая медицинская помощь в виде искусственного дыхания и непрямой массаж сердца. Искусственное дыхание и непрямой массаж сердца следует делать непрерывно до прибытия врача;

6. переносить пострадавшего в другое место следует только в тех случаях, когда ему или лицу, оказывающему помощь, продолжает угрожать опасность или когда оказание помощи на месте невозможно.

### 5.3 Экологическая безопасность

Работа в лаборатории сопровождается образованием и выделением газообразных, жидких и твердых отходов, влияющих на атмосферу, гидросферу и литосферу.

К газообразным отходам, загрязняющие атмосферу помещения, относятся естественные выделения – углекислый газ, летучие соединения паров водных растворов кислот, с помощью которых осуществляется этап химического травления, а также бытовая пыль. Перед выбросом воздух помещений подвергается обязательной очистке в фильтровентиляционных системах, что предотвращает атмосферу от загрязнения.

К жидким отходам относятся отходы, образующиеся в результате химического травления, в процессе влажной уборки помещения лаборатории, при пользовании водопроводом. Растворы кислот, полученные после химического травления, проходят этап нейтрализации пищевой содой, после чего все жидкие отходы сбрасываются в городскую канализацию и далее поступают в системы централизованной очистки на городских очистных сооружениях.

При обращении с твердыми отходами такими, как отходы бумаги отработанные специальные ткани для протирки помещения; отработанные люминесцентные лампы; офисная техника, комплектующие и запчасти, утратившие в результате износа потребительские свойства: бытовой мусор после предварительной сортировки необходимо сложить в специальные контейнеры для бытового мусора (затем специализированные службы вывозят мусор на городскую свалку); утратившее потребительские свойства офисное оборудование передать специальным службам (предприятиям) для сортировки, вторичного использования или складирования на городских мусорных полигонах [66]. Отработанные люминесцентные лампы утилизируются в соответствии с Постановлением Правительства РФ от 03.09.2010 №681 (с

изменениями от 1.10.2013) [67]. Люминесцентные лампы, применяемые для искусственного освещения, являются ртутьсодержащими и относятся к 1 классу опасности. Ртуть люминесцентных ламп способна к активной воздушной и водной миграции. Интоксикация возможна только в случае разгерметизации колбы, поэтому основным требованием экологической безопасности является сохранность целостности отработанных ртутьсодержащих ламп. Отработанные газоразрядные лампы помещают в защитную упаковку, предотвращающую повреждение стеклянной колбы, и передают специализированной организации для обезвреживания и переработки. В случае боя ртутьсодержащих ламп осколки собирают щеткой или скребком в герметичный металлический контейнер с плотно закрывающейся крышкой, заполненный раствором марганцевокислого калия. Поверхности, загрязненные боем лампы, необходимо обработать раствором марганцевокислого калия и смыть водой. Контейнер и его внутренняя поверхность должны быть изготовлены из неадсорбирующего ртуть материала (винипласта). К сфере защиты окружающей среды и рационального использования природных ресурсов относится и экономия ресурсов, в частности, энергетических. Это сокращает расходы на электротепловую энергию и означает уменьшение выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух ТЭС.

## **5.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях**

### **5.4.1 Анализ вероятных ЧС, которые могут возникнуть в лаборатории при проведении исследований**

При обнаружении неисправностей работы установки для электроформования необходимо выполнить следующие действия:

- отключить питание установки для электроформования;
- отключить питание компьютера;
- отключить генератор азота;

- известить об этом вышестоящего руководителя.

При возникновении возгорания необходимо немедленно прекратить работу, отключить электрооборудование, позвонить в подразделение пожарной охраны по телефону 01 или 112, сообщить о случившемся руководителю подразделения и приступить к тушению огня первичными средствами пожаротушения согласно ГОСТ Р 51057-2001 Техника [68].

При поражении работника электрическим током необходимо как можно скорее освободить пострадавшего от воздействия электрического тока, проверить состояние пострадавшего и вызвать при необходимости скорую помощь, до приезда скорой помощи оказать пострадавшему необходимую первую помощь или, при необходимости, организовать доставку пострадавшего в ближайшее лечебное учреждение, о произошедшем несчастном случае поставить в известность руководителя структурного подразделения.

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

Самым распространенным видом ЧС является пожар. Причины возникновения пожара электрического характера: короткое замыкание, перегрузки по току, статическое электричество и т. д. Для устранения причин возникновения и локализации пожаров в помещении лаборатории должны проводиться следующие мероприятия:

- 1) использование только исправного оборудования;
- 2) проведение периодических инструктажей по пожарной безопасности;
- 3) отключение электрооборудования, освещения и электропитания при предполагаемом отсутствии обслуживающего персонала или по окончании работ;

4) содержание путей и проходов для эвакуации людей в свободном состоянии.

Для локализации или ликвидации загорания на начальной стадии используются первичные средства пожаротушения. Первичные средства пожаротушения обычно применяют до прибытия пожарной команды.

В общественных зданиях и сооружениях на каждом этаже должно размещаться не менее двух переносных огнетушителей. Огнетушители следует располагать на видных местах вблизи от выходов из помещений. Размещение первичных средств пожаротушения в коридорах, переходах не должно препятствовать безопасной эвакуации людей [69].



Рисунок 39 – План эвакуации при пожаре и других ЧС из помещений учебного корпуса № 3

Здание должно соответствовать требованиям пожарной безопасности, а именно, наличие охранно-пожарной сигнализации, плана эвакуации (рисунок 39), порошковых или углекислотных огнетушителей с поверенным клеймом, табличек с указанием направления к выходу.

## **Выводы по разделу**

В данной главе были определены вредные и опасные факторы, формируемые при производстве и модифицировании гибридных полимерных скэффолдов, среди которых можно выделить повышенное значение напряжения в электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело человека, повышенный уровень шума, пожаровзрывоопасность, химические и токсические факторы. Описаны методики снижения воздействия вредных факторов, а также регламент действий при возникновении чрезвычайных ситуаций, к которым могут привести опасные факторы.

## Используемая литература

1. Post processing and biological evaluation of the titanium scaffolds for bone tissue engineering/ Wysocki B. et al. //Materials. – 2016. – Т. 9. – №. 3. – С. 197.
2. Investigation of the influence of surface roughness modification of bone tissue engineering scaffolds/ Kerckhofs G. et al. //SkyScan User Meeting 2010, Location: Mechelen, Belgium. – SkyScan User Meeting 2010 Abstract Book, 2010.
3. Chemical polishing of scaffolds made of Ti–6Al–7Nb alloy by additive manufacturing/ Łyczkowska E. et al. //Archives of Civil and Mechanical Engineering. – 2014. – Т. 14. – №. 4. – С. 586-594.
4. Prediction of permeability of regular scaffolds for skeletal tissue engineering: a combined computational and experimental study/ Truscetto S. et al. //Acta biomaterialia. – 2012. – Т. 8. – №. 4. – С. 1648-1658.
5. Additive manufacturing of metal cellular structures: design and fabrication/ Yang L. et al. //Jom. – 2015. – Т. 67. – №. 3. – С. 608-615.
6. Correlation between Young's modulus and porosity in porous materials/ Kováčik J. //Journal of materials science letters. – 1999. – Т. 18. – №. 13. – С. 1007-1010.
7. Highly porous titanium scaffolds for orthopaedic applications/ Dabrowski B. et al. //Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials. – 2010. – Т. 95. – №. 1. – С. 53-61.
8. Powder removal from Ti-6Al-4V cellular structures fabricated via electron beam melting/ Hasib H., Harrysson O. L. A., West H. A. //Jom. – 2015. – Т. 67. – №. 3. – С. 639-646.
9. Microstructural and surface modifications and hydroxyapatite coating of Ti-6Al-4V triply periodic minimal surface lattices fabricated by selective laser melting/

- Yan C. et al. //Materials Science and Engineering: C. – 2017. – T. 75. – C. 1515-1524.
10. Surface modification of Ti6Al4V open porous structures produced by additive manufacturing/ Pyka G. et al. //Advanced Engineering Materials. – 2012. – T. 14. – №. 6. – C. 363-370.
  11. Laser polishing of parts built up by selective laser sintering/ Lamikiz A. et al. //International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2007. – T. 47. – №. 12-13. – C. 2040-2050.
  12. Review on powder-based electron beam additive manufacturing technology/ Gong X., Anderson T., Chou K. //International Symposium on Flexible Automation. – American Society of Mechanical Engineers, 2012. – T. 45110. – C. 507-515.
  13. Electron beam melting of Ti–48Al–2Cr–2Nb alloy: Microstructure and mechanical properties investigation /Biamino S. et al. //Intermetallics. – 2011. – T. 19. – №. 6. – C. 776-781.
  14. Additive manufacturing and postprocessing of Ti-6Al-4V for superior mechanical properties /Qian M. et al. //MRS Bulletin. – 2016. – T. 41. – №. 10. – C. 775-784.
  15. Additive manufactured metals /Ek K. //Master of Science thesis, KTH Royal Institute of Technology. – 2014.
  16. Anisotropic Ti-6Al-4V gyroid scaffolds manufactured by electron beam melting (EBM) for bone implant applications /Ataee A. et al. //Materials & Design. – 2018. – T. 137. – C. 345-354.
  17. Biomimetic porous titanium scaffolds for orthopaedic and dental applications /Nouri A., Hodgson P. D., Wen C.– InTech, 2010. – C. 415-450.
  18. Porous shape memory alloy scaffolds for biomedical applications: a review /C.E. Wen, J.Y. Xiong, Y.C. Li, P.D. Hodgson// 3rd International Symposium on Functional Materials 2009, ISFM 2009, Jinju, 2010.

19. Relationship between unit cell type and porosity and the fatigue behavior of selective laser melted meta-biomaterials / S. Amin Yavari et al. // *J. Mech. Behav. Biomed. Mater.*, vol. 43, pp. 91–100, 2015, doi: 10.1016/j.jmbbm.2014.12.015.
20. Large deformation response of additively-manufactured FCC metamaterials : From octet truss lattices towards continuous shell mesostructures / C. Bonatti and D. Mohr // *Int. J. Plast.*, vol. 92, pp. 122–147, 2017.
21. Bone tissue regeneration: the role of scaffold geometry / A. Zadpoor // *Biomater. Sci.*, no. October, 2014.
22. Additively manufactured metallic porous biomaterials based on minimal surfaces: A unique combination of topological, mechanical, and mass transport properties / F. S. L. Bobbert et al. // *Acta Biomater.*, vol. 53, pp. 572–584, 2017.
23. Gyroid porous titanium structures: A versatile solution to be used as scaffolds in bone defect reconstruction/ Yáñez, A. Cuadrado, O. Martel, H. Afonso, and D. Monopoli // *Mater. Des.*, vol. 140, pp. 21–29, 2018.
24. Topology-mechanical property relationship of 3D printed strut , skeletal , and sheet based periodic metallic cellular materials / O. Al-ketan, R. Rowshan, and R. K. A. Al-rub // *Addit. Manuf.*, vol. 19, pp. 167–183, 2018.
25. Compressive behaviour of gyroid lattice structures for human cancellous bone implant applications / Yáñez, A. Herrera, O. Martel, D. Monopoli, and H. Afonso // *Mater. Sci. Eng. C*, vol. 68, pp. 445–448, 2016.
26. Compressive failure modes and energy absorption in additively manufactured double gyroid lattices / Maskery, N. T. Aboulkhair, A. O. Aremu, C. J. Tuck, and I. A. Ashcroft // *Addit. Manuf.*, vol. 16, pp. 24–29, 2017.
27. How Linear Tension Converts to Curvature : Geometric Control of Bone Tissue Growth / M. Bidan et al. // *PLoS One*, vol. 7, no. 5, pp. 1–11, 2012.
28. Geometry as a Factor for Tissue Growth : Towards Shape Optimization of Tissue Engineering Scaffolds / C. M. Bidan, K. P. Kommareddy, M. Rumpler, P. Kollmannsberger, P. Fratzl, and J. W. C. Dunlop // *Adv. Healthc. Mater.*, vol. 2, pp. 186–194, 2013.

29. Manufacturing by combining selective laser melting and selective laser erosion/laser re-melting / Yasa E., Kruth J. P., Deckers J. // CIRP annals. – 2011. – Т. 60. – №. 1. – С. 263-266.
30. Laser polishing of selective laser melted components / Marimuthu S. et al. // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2015. – Т. 95. – С. 97-104.
31. The effect of laser remelting on the surface chemistry of Ti6Al4V components fabricated by selective laser melting / Vaithilingam J. et al. // Journal of Materials Processing Technology. – 2016. – Т. 232. – С. 1-8.
32. Investigation of powder removal of net-structured titanium parts made from electron beam melting / Drescher P., Reimann T., Seitz H. // International Journal of Rapid Manufacturing. – 2014. – Т. 4. – №. 2-4. – С. 81-89.
33. Bioinspired functionally graded gyroid sandwich panel subjected to impulsive loadings / Peng C., Tran P. // Composites Part B: Engineering. – 2020. – С. 107773.
34. Ультразвуковые виброударные процессы / Артемьев В. В., Клубович В. В., Сакевич В. Н. – 2004.
35. Теоретическое и экспериментальное исследование динамики ультразвуковой виброударной системы с промежуточным бойком / Вагапов И. К., Ганиев М. М., Шинкарев А. С. // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2008. – №. 5.
36. Scanning electron microscopy (SEM): A review / Mohammed A., Abdullah A. // Proceedings of the 2018 International Conference on Hydraulics and Pneumatics—HERVEX, Băile Govora, Romania. – 2018. – С. 7-9.
37. Computed tomography metrological examination of additive manufactured acetabular hip prosthesis cups / Kourra N. et al. // Additive Manufacturing. – 2018. – Т. 22. – С. 146-152.
38. X-ray computed tomography for additive manufacturing: a review / Thompson A., Maskery I., Leach R. K. // Measurement Science and Technology. – 2016. – Т. 27. – №. 7. – С. 072001.

39. Physical characterization and performance evaluation of an x-ray micro-computed tomography system for dimensional metrology applications / Hiller J., Maisl M., Reindl L. M. // Measurement Science and Technology. – 2012. – Т. 23. – №. 8. – С. 085404.
40. Fundamentals of computerized tomography: image reconstruction from projections / Herman G. T. // Springer Science & Business Media, 2009.
41. Computed tomography: principles, design, artifacts, and recent advances / Hsieh J. // SPIE press, 2003. – Т. 114.
42. An overview of industrial X-ray computed tomography / Sun W., Brown S. B., Leach R. K. – 2012.
43. Computed tomography for dimensional metrology / Kruth J. P. et al. // CIRP annals. – 2011. – Т. 60. – №. 2. – С. 821-842.
44. Uncertainty determination and quantification for dimensional measurements with industrial computed tomography / Dewulf W. et al. // CIRP Annals. – 2013. – Т. 62. – №. 1. – С. 535-538.
45. Patient-specific reconstruction with 3D modeling and DMLS additive manufacturing / Salmi M. et al. // Rapid Prototyping Journal. – 2012.
46. Design and mechanical properties of new  $\beta$  type titanium alloys for implant materials / K. Daisuke, N. Mitsuo, M. Masahiko, K. Yosihisa, Y. Toshiaki // Mater. Sci. Eng. 243 (1998) 244–249.
47. Ductility testing Compression test for porous and cellular metals / International organization for Standardization // Mechanical testing of metals, 2011.
48. The behaviour of titanium in nitric-hydrofluoric acid solutions / E.M.M. Sutter, G.J. Goetz-Grandmont // Corros. Sci. 30 (1990) 461–476.
49. Закономерности деформационного измельчения структуры металлов и сплавов / Сарафанов Г. Ф., Перевезенцев В. Н. // Нижний Новгород. – 2007. – Т. 96.
50. Исследование микроструктуры поверхностных слоев малоуглеродистой стали после точения и ультразвуковой финишной обработки / Ковалевская

- Ж. Г. и др. //Физика металлов и металловедение. – 2013. – Т. 114. – №. 1. – С. 47-47.
- 51.Изменение структуры и закономерности упрочнения меди при винтовой экструзии / Варюхин В. Н. и др. //Металлофизика и новейшие технологии. – 2013. – №. 35,№ 2. – С. 233-239.
- 52.Нанокристаллизация металлических поверхностей методами интенсивной пластической деформации (обзор) / Васильев М. А., Прокопенко Г. И., Филатова В. С. //Успехи физики металлов. – 2004.
- 53.ГОСТ 12.0.004-2015 ССБТ. Организация обучения безопасности труда. Общие положения
- 54.ПОТ Р М-016-2001, РД 153-34.0-03.150
- 55.ГОСТ Р 12.1.019-2009 ССБТ. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты
- 56.ГОСТ Р 50923-96 Дисплей. Рабочее место оператора. Общие эргономические требования и требования к производственной среде. Методы измерения
- 57.ГОСТ 21889-76 Система «Человек-машина». Кресло человека-оператора. Общие эргономические требования
- 58.ГОСТ 22269-76 Система «человек-машина». Рабочее место оператора. Взаимное расположение элементов рабочего места. Общие эргономические требования
- 59.Безопасность жизнедеятельности: учебное пособие / О.Б. Назаренко, Ю.А. Амелькович. — Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2013. — 178 с
- 60.ГОСТ 26568-85 Вибрация. Методы и средства защиты. Классификация
- 61.СН 2.2.4/2.1.8.566-96 Производственная вибрация, вибрация в помещениях жилых и общественных зданий
62. СН 2.2.4/2.1.8.562-96 Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки. Санитарные нормы

63. СП 52.13330.2016 Естественное и искусственное освещение
64. СП 52.13330.2011 «Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95\*»
65. СанПиН 2.2.4.548–96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений.
66. Постановление Администрации г. Томска от 11.11.2009 г. №1110 (с изменениями от 24.12.2014) "Об организации сбора, вывоза, утилизации и переработки бытовых и промышленных отходов на территории муниципального образования «Город Томск».
67. Постановление Правительства РФ от 03.09. 2010 №681 (с изменениями от 1.10.2013) «Об утверждении Правил обращения с отходами производства и потребления в части осветительных устройств, электрических ламп, ненадлежащие сбор, накопление, использование, обезвреживание, транспортирование и размещение которых может повлечь причинение вреда жизни, здоровью граждан, вреда животным, растениям и окружающей среде».
68. ГОСТ Р 51057-2001 Техника пожарная. Огнетушители переносные. Общие технические требования. Методы испытаний.
69. ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов.

## Приложение А

### Раздел №2 Materials and methods

---

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
ОБМ91	Павельева Александра Андреевна		

Консультант школы отделения (НОЦ) НИЦ ФМКМ ИШХБМТ :

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
С.н.с. НИЦ ФМКМ ИШХБМТ	Сурменова М.А.	к.ф.м.н.		

Консультант – лингвист отделения (НОЦ) школы ОИЯ :

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент	Зяблова Н.Н.	к.ф.н.		

## 2. Materials and methods

### 2.1 Obtaining samples

Samples of a cubic shape with a surface side of 15 mm and TPSME of the "gyroid" type were obtained by the EBM method on an ARCAMA2 EBM device from ARCAM, AB (Mölndal, Sweden) using Ti-6Al-4V titanium alloy powder using standard settings for the parameters of lattice structures with a layer thickness of 50  $\mu\text{m}$  and a preheating temperature of 720 ° C (Figure 20). The particle diameter of the powder was in the range from 45 to 100  $\mu\text{m}$ . Models were exported from Mathematica in STL format with default mesh density.

Using Wolfram Mathematica software, we rendered the appearance of the TPMES "gyroid" described by the following equation:

$$\sin(kx)\cos(ky) + \sin(ky)\cos(kz) + \sin(kz)\cos(kx) = 0 \quad (1)$$

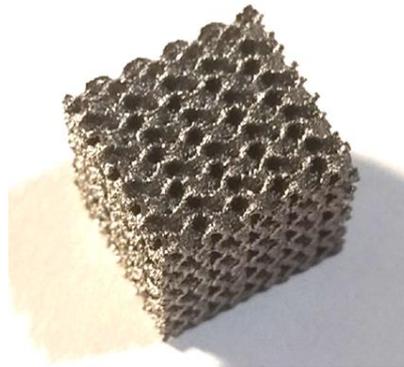


Figure 1 - Example of test samples

The surface limits were chosen from  $-5/2 \pi$  to  $5/2 \pi$  in all directions. The entire structure with  $k$  equal to 2 consists of six-unit cells, duplicated in each coordinate direction (X, Y, Z), respectively, which gives the total structure size 15 mm  $\times$  15 mm  $\times$  15 mm. Samples with thicknesses of 0.2, 0.4, and 0.6 mm were constructed based on the "gyroid" equation with  $k = 2$ . These thicknesses were chosen to avoid self-intersection of the structure. The wall thickness is 1.4, 1.2, 1.0 mm for structures with

a thickness of 0.2, 0.4, and 0.6 mm, respectively. Such a small distance leads to the appearance of trapped powder inside the samples.

## **2.2 Post-processing methods**

To remove the captured powder from the internal volume of a three-dimensional structure with the TPMES topology, three methods were used in this work: sandblasting post-treatment, ultrasonic treatment, and chemical etching.

### **2.2.1 Sandblasting post-processing**

One of the standard post-processing methods is the traditional method of cleaning porous structures proposed by the Arcam company, called a powder recovery system [8, 32]. The method of the powder recovery system in the Russian-language literature is called "sandblasting". The principle of operation of this method lies in the action on the required surface area by a directed, and under high pressure, the flow of a mixture of inert gas and abrasive particles. The abrasive particles for implants manufactured using the electron beam melting method are particles of titanium alloy Ti-6Al-4V powder, which is the starting material for the production of these implants. The use of this powder both as a material for the manufacture of implants and as abrasive particles during sandblasting allows to reduce powder consumption, since the released particles are subsequently used again as a material for production, and to exclude contamination of the treated surface by any other chemical elements. The applied flow is at a high division of 5 bar. Cleaning the surface from particles sintered with it occurs due to the presence of abrasive particles, the collision of the first with the second initiates the separation of the first from the surface, thereby cleaning it. The effectiveness of this method is significantly reduced when it is necessary to penetrate into narrow channels or elementary cells of small sizes, as well as when working with multilayer structures, a sharp decrease in pressure from the outer layers to the inner

ones is noticeable, which also significantly affects the effectiveness of this method [32].

A standard Arcam EBM powder recovery system (sandblasting), produced at an argon pressure of 5 bar, was applied to all samples after the production process.

Since sandblasting is a standard method for processing EBM products, produced after the manufacturing stage by Arcam, TPSME test samples processed by this method should be taken as a basis for comparison with samples, the surface of which has been additionally processed by other methods.

### **2.2.2 Chemical etching**

Chemical etching is a post-processing method that attracts a lot of attention from various researchers to reduce roughness and clean surfaces from sintered particles [3,5,33]. The main advantage of chemical etching in comparison with other classical methods is the possibility of filling implants with an acid solution through structural pores, which provides a uniform and almost one-time effect on the entire surface area. The result of this method directly depends on its parameters, which include: the material of the product, the density of the structure, the composition of the solution, the concentration of acids in the solution, the temperature of the solution and the environment, the contact time of the products and the pickling solution.

Etching of titanium and alloys based on it should be carried out in solutions of sufficiently strong acids such as HF and HNO<sub>3</sub>, which is necessary to remove the oxide film of titanium and aluminum from the surface, in the case of working with the Ti-6Al-4V alloy.

Also, in the chemical etching of porous products with a high structural density, in most cases, the use of a magnetic stirring machine is required to increase the mobility in the structural volume of the samples. This increases the efficiency of penetration into the structure.

In the process of chemical etching, it is possible to reduce the thickness of the walls of the implants. Changing wall thickness affects the overall porosity of the

sample. Therefore, this method requires a special selection of the parameters of the conduct.

In this work, the stage of chemical etching was carried out in 50 ml of an aqueous solution of an acid such as HF and HNO<sub>3</sub> using 1: 10% of the total volume, respectively. The composition was chosen to reduce the number of emissions generated during the chemical reaction, but to maintain the activity of acids along with the oxide films of titanium and aluminum [4]. Decrease in the liquid level, since its high capacity can lead to hydrogen embrittlement of the surface [8].

An acidic solution was prepared separately for each sample. The time of one immersion in the solution for each sample was 3 minutes.

For a sample with a nominal wall thickness of 0.2 mm, 8 was performed. At this stage, the total etching time was 24 minutes. After reducing the acidic solution for 20 minutes. The final etching time was 44 minutes.

For a sample with a total wall thickness of 0.4 mm, 14 were performed with a total etching time of 42 minutes.

For a specimen with a nominal wall thickness of 0.6 mm, the total time was 36 minutes, which corresponds to 12 dives. An important difference between this etching and the other 4 immersions. Thus, the solution was renewed after 12 and 24 minutes of etching. After each immersion, all samples were washed three times with distilled water.

### **2.2.3 Ultrasonic vibration**

Ultrasonic vibration (USV) is a post-processing method involving contact between a movable actuator tip and a sample. This method is carried out using profile tools, high-frequency mechanical movement of the tip of the mechanism. RAS does not include chemical reactions and does not belong to the thermal type, and is also suitable for machining, electrically non-conductive, and brittle workpiece materials that are usually difficult to machine with conventional machining methods.

The principle of operation of the method consists of ultrasonic vibrations, which is generated by converting low-frequency electrical energy into a high-frequency electrical signal using the corresponding generator signal, and then into mechanical vibrations of the order of 20 kHz using a magnetostrictive or piezoelectric transducer. These vibrations are transmitted to the sample due to the contact between the image and the vibrating tip. The tool vibrates at ultrasonic frequencies in a direction parallel to the tool axis, and the vibration stroke is only a few hundredths of a millimeter [34].

The aforementioned ultrasonic vibration waves cause alternating compressive and tensile stresses, resulting in a cleaning effect on the surface of the sintered powder particles. The contact area between the sintered parts and the scaffold surface is small and protrudes at the point that is the concentrator of the above stresses, this leads to the concentration of particles when the critical value for this region is reached [35].

The USV post-processing stage was carried out for samples with all wall thicknesses using Sonic SwissBoster 35 kHz 1: 1.5 Alu equipment. The drive head of the USV system was mounted on a modified stand of an industrial bench drill with an added reinforcing bottom plate and a mount for an ultrasonic vibration head. Power supply from the standard RAS system allows you to adjust the vibration power. Cleaning was performed in one step by gently compressing the flat surfaces of the specimen samples between the face of the bottom plate (equivalent force ~ 5 N) while switching power for 15 seconds at 75% of maximum power.

## **2.3 Research methods**

### **2.3.1 Scanning Electron Microscopy**

Scanning electron microscopy (SEM) is a research method that allows at high magnifications to obtain information about the state of the investigated surface and near-surface levels. In this method, the surface is analyzed in a high vacuum using a high-energy electron beam ranging from 100 to  $30 \times 10^3$  eV. The source of electrons

is a hot cathode, usually consisting of a tungsten wire. The size of the electron spot created by the gun is too large to obtain a clear image, which necessitates the use of focusing electromagnetic lenses, which also control the position of the beam on the surface. The final lens in the system is the collecting lens, which ensures the interaction of the electron beam with the sample and its penetration to a depth of 1  $\mu\text{m}$  to generate the signals used to create the image [36].

The image of the sample is formed point by point depending on the movement of the scanning coils, which leads to the movement of the electron beam in discrete points in the form of straight lines until a rectangular raster appears on the surface of the sample. The whole process depends on the required magnification. When the operator requests a larger image, the scanning coils force the beam to deflect over a smaller area. It should be noted that the working distance, that is, the distance from the last lens to the sample surface, affects the magnification, which in modern SEMs is solved using automatic adjustment.

An electron detector is designed to detect emitted electrons (signals) from a scanned sample. In the absence of detectors each signal generated by the interaction between the electron beam and the sample surface can generate an image, resulting in increased image noise. Both secondary electrons and backscattered electrons are used in SEM imaging [36].

When a positive voltage is applied to the collector screen, both secondary and backscattered electrons are collected. However, only the latter will be collected in the event of a negative voltage applied to the collector screen.

The signals are then displayed on a viewing screen and the operator adjusts the brightness, contrast, and intensity until a sufficiently clear image is obtained. The scanned image will contain a lot of surface information if low accelerating voltages of less than (5 kV) are used. On the contrary, high accelerating voltages in the range (15 - 30 kV), which penetrate under the surface, will provide, due to the signal reflected from the surface, detailed information about the state of the interior of the sample. The SEM image depends on the visualization of the sample topography in terms of the shape, size, and texture of the surface, as well as the number of two types of electrons

[36]. To study the effect of post-processing methods on the morphology and microstructure of the surface of the samples, a scanning electron microscopy stage was performed (Quanta 200 3D, FEI Company).

### **2.3.2 Computed tomography**

X-ray computed tomography has been used in recent years for non-destructive industrial studies of the quality of finished products [37]. The industrial application of this technology has been developed due to the growing need to study the quality of complex engineering components, such as parts obtained by AM methods [38]. Reconstruction of computed tomography data makes it possible to demonstrate the external and internal geometry of products, as well as inhomogeneities in the material [37].

The principle of operation of this method is based on a series of X-ray images obtained by rotating the product through 360 degrees, which are then reconstructed to create a 3D model of the object under study. The generated X-ray radiation must have sufficient energy to penetrate the object under study, and then reach the detector, where X-ray images are taken [39]. In a well-calibrated computed tomography system, the quality of the radiographs depends on the characteristics of the X-rays, the detector settings, and the exposure time per radiograph. Each pixel of the X-ray diffraction pattern has a gray percentage, which equates to the fraction of X-rays that were not absorbed by the product [40,41]. Once the scan is complete, the radiographs are reconstructed using a rear projection filtering algorithm that converts the radiographs into a three-dimensional representation of the object. The algorithm creates 2D slices through an object, which stack the object as a collection of 3D pixels called voxels [42–46]. Each voxel has a corresponding gray value that represents the atomic density of the material; the air has the lowest gray value (black), while materials with a higher atomic number are assigned a higher gray value (white). Three-dimensional data can be analyzed additionally to obtain information about dimensions, volumetric analysis, and other quantitative assessment [43].

Computed tomography was performed using the Sauerwein system using a 135 kV X-ray tube, 70 mA current, and a voxel size of 15.5  $\mu\text{m}$ . The data were processed using the Fiji ImageJ program. The VG Studio Max 3.1 software package was used to analyze images and three-dimensional parameters [44]. For each pore volume, a set of parameters, including volume and sphericity, were determined using the pore analysis tool from VG Studio Max 3.1.

## **2.4 Mechanical tests**

Quasi-static compression tests were performed using an INSTRON 3369 universal testing machine with a 50 kN strain gauge, Illinois Tool Works Inc. Samples were tested in accordance with ISO 13314: 2011 [47,48]. The direction of the compressive load for the specimens was perpendicular to the direction of the construction of the ELP. All mechanical tests were carried out at room temperature.

The lower plane of the samples was stationary, while the upper one shifted downward under pressure at a constant rate of 5 mm/min, i.e., with a deformation rate of the entire cellular structure equal to 0.1%. The applied loads and displacements were measured to calculate the compressive stress by dividing the load value by the effective area of the lattice structures. The fracture strain was set at 50% of the specimen height.