

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

Школа Инженерная школа ядерных технологий  
Направление подготовки 03.04.02 «Физика»  
Отделение школы (НОЦ) Экспериментальной физики

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**

Тема работы
Модифицирование поверхности полученного с помощью аддитивной технологии титанового сплава Ti-6Al-4V

УДК 539.211:669.295.018-048.25

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
ОБМ91	Николаева Александра Владимировна		

Руководитель ВКР

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

Со-руководитель (по разделу «Концепция стартап-проекта»)

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ШИП ТПУ	Шамина О.Б.	К. Т. Н., доцент		

**КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:**

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ООД ИШНКБ ТПУ	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		

## Запланированные результаты освоения ООП

Код	Результат освоения ООП
<b>Общекультурные компетенции</b>	
ОК-1	Способность к абстрактному мышлению, анализу, синтезу
ОК-2	Готовность действовать в нестандартных ситуациях, нести социальную и этическую ответственность за принятые решения
ОК-2	Готовность действовать в нестандартных ситуациях, нести социальную и этическую ответственность за принятые решения
ОК-3	Готовность к саморазвитию, самореализации, использованию творческого потенциала
<b>Общепрофессиональные компетенции</b>	
ОПК-1	Готовность к коммуникации в устной и письменной формах, на русском и иностранном языках для решения задач профессиональной деятельности
ОПК-2	Готовность руководить коллективом в сфере своей профессиональной деятельности, толерантно воспринимая социальные, этнические, конфессиональные и культурные различия
<b>Общепрофессиональные компетенции</b>	
ОПК-3	Способность к активной социальной мобильности, организации научно-исследовательских и инновационных работ
ОПК-4	Способность адаптироваться к изменению научного профиля своей профессиональной деятельности, социокультурных и социальных условий деятельности
ОПК-5	Способность использовать свободное владение профессионально-профилированными знаниями в области компьютерных технологий для решения задач профессиональной деятельности, в том числе находящихся за пределами направленности (профиля) подготовки
ОПК-6	Способность использовать знания современных проблем и новейших достижений физики в научно-исследовательской работе
ОПК-7	Способность демонстрировать знания в области философских вопросов естествознания, истории и методологии физики
<b>Профессиональные компетенции</b>	
ПК-1	Способность самостоятельно ставить конкретные задачи научных исследований в области физики и решать их с помощью современной аппаратуры и информационных технологий с использованием новейшего отечественного и зарубежного опыта

<b>Код</b>	<b>Результат освоения ООП</b>
ПК-2	Способность свободно владеть разделами физики, необходимыми для решения научно-инновационных задач, и применять результаты научных исследований в инновационной деятельности
ПК-3	Способность принимать участие в разработке новых методов и методических подходов в научно-инновационных исследованиях и инженерно-технологической деятельности
ПК-6	Способность методически грамотно строить планы лекционных и практических занятий по разделам учебных дисциплин и публично излагать теоретические и практические разделы учебных дисциплин в соответствии с утвержденными учебно-методическими пособиями при реализации программ бакалавриата в области физики
ПК-7	Способность руководить научно-исследовательской деятельностью в области физики обучающихся по программам бакалавриата
<b>Профессиональные компетенции университета</b>	
ДПК(У)-1	Способность планировать и проводить фундаментальные исследования в проектах в области ядерно-физических исследований, взаимодействия излучения с веществом, а также модернизация современных и создание методов изучения механических, электрических, магнитных, тепловых свойств твердых тел
ДПК(У)-2	Способность обрабатывать, анализировать и обобщать научно-техническую информацию, передовой отечественный и зарубежный опыт в профессиональной деятельности, осуществлять презентацию научной деятельности

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

Школа Инженерная школа ядерных технологий  
 Направление подготовки (специальность) 03.04.02 «Физика»  
 Отделение школы (НОЦ) Экспериментальной физики

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

**ЗАДАНИЕ**  
**на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

Магистерской диссертации
--------------------------

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

Студенту:

Группа	ФИО
0БМ91	Николаевой Александре Владимировне

Тема работы:

Модифицирование поверхности полученного с помощью аддитивной технологии титанового сплава Ti-6Al-4V	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	27.01.2021, 27–32/с

Срок сдачи студентом выполненной работы:	17.06.2021
--	------------

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

<p><b>Исходные данные к работе</b></p> <p><i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</i></p>	<p>Объектом исследования являются образцы из титанового сплава Ti-6Al-4V, изготовленные методом электронно-лучевого сплавления.</p>
---	---

<p><b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b></p> <p><i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Обзор литературных источников;</li> <li>– Подготовка образцов к исследованию;</li> <li>– Исследование микроструктуры титанового сплава Ti-6Al-4V, изготовленного методом электронно-лучевого сплавления;</li> <li>– Установление закономерностей изменения микроструктуры, фазового состава и твердости образцов сплава Ti-6Al-4V в зависимости от модифицирования поверхности и наводороживания;</li> <li>– Анализ полученных результатов;</li> <li>– Концепция стартап-проекта;</li> <li>– Социальная ответственность;</li> <li>– Заключение.</li> </ul>
--	---

**Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы**

*(с указанием разделов)*

Раздел	Консультант
1. Литературный обзор; 2. Материалы и методы; 3. Экспериментальная часть	Пушилина Н.С.
4. Концепция стартап-проекта	Шамина О.Б.
5. Социальная ответственность	Антоневич О.А.
6. Раздел на английском языке	Зяблова Н. Н.

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

Основные технологии построения изделий в аддитивном производстве

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

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

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

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
ОБМ91	Николаева Александра Владимировна		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА  
«КОНЦЕПЦИЯ СТАРТАП-ПРОЕКТА»**

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
ОБМ91	Николаева Александра Владимировна

<b>Школа</b>	<b>Инженерная школа ядерных технологий</b>	<b>Направление</b>	03.04.02 «Физика»
<b>Уровень образования</b>	Магистратура		

<b>Перечень вопросов, подлежащих разработке:</b>	
<i>Проблема конечного потребителя, которую решает продукт, который создается в результате выполнения НИОКР (функциональное назначение, основные потребительские качества)</i>	Технология изготовления титановых сплавов с улучшенными физико-механическими свойствами, повышает коррозионную стойкость изделий, отвечая запросам потребителей в области судостроения, машиностроения, а также авиа- и ракетостроения.
<i>Способы защиты интеллектуальной собственности</i>	Коммерческая тайна, патентование
<i>Объем и емкость рынка</i>	Объем российского рынка: 589,3 млрд. USD
<i>Современное состояние и перспективы отрасли, к которой принадлежит представленный в ВКР продукт</i>	На сегодняшний день существуют способы обработки поверхности титановых сплавов, но лишь немногие повышают коррозионную стойкость изделий. Средний годовой темп роста рынка деталей, которые требуют обработки (на примере обработки лопаток газотурбинных двигателей) составляет 7,3%.
<i>Себестоимость продукта</i>	При условии обработки 36 изделий в месяц себестоимость обработки одного изделия составляет 14453 руб.
<i>Конкурентные преимущества создаваемого продукта</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– повышается коррозионная стойкость титановых сплавов;</li> <li>– повышаются надежность и долговечность изделия;</li> <li>– улучшается контроль качества изделия;</li> <li>– возможность обработки сложно-профильных деталей;</li> <li>– снижается время производства изделия;</li> <li>– снижаются финансовые затраты производства.</li> </ul>
<i>Сравнение технико-экономических характеристик продукта с отечественными и мировыми аналогами</i>	На основании конкурентных преимуществ

<i>Целевые сегменты потребителей создаваемого продукта</i>	Рынок B2B. Нишевой рынок – предприятия авиационной, космической и судостроительной промышленности, металлургии и машиностроения
<i>Бизнес-модель проекта</i>	Лаборатория при ТПУ
<i>Производственный план</i>	Планируемый ежемесячный объем производства: более 36 деталей.
<i>План продаж</i>	Планируемый годовой объем производства: 480 деталей
<b>Перечень графического материала:</b>	
<i>При необходимости представить эскизные графические материалы</i>	

<b>Дата выдачи задания для раздела по линейному графику</b>	15.03.2021
---	------------

Задание выдал консультант по разделу «Концепция стартап-проекта» (со-руководитель ВКР):

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ШИП ТПУ	Шамина Ольга Борисовна	к. т. н., доцент		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
ОБМ91	Николаева Александра Владимировна		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА  
«СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»**

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
0БМ91	Николаева Александра Владимировна

<b>Школа</b>	<b>Инженерная школа ядерных технологий</b>	<b>Отделение (НОЦ)</b>	<b>ОЭФ</b>
<b>Уровень образования</b>	Магистратура	<b>Направление/специальность</b>	03.04.02 «Физика»

Тема ВКР:

<b>Модифицирование поверхности полученного с помощью аддитивной технологии титанового сплава Ti-6Al-4V</b>	
<b>Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:</b>	
1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	Объект исследования: образцы из титанового сплава Ti-6Al-4V, изготовленные методом электронно-лучевого сплавления. Условия для работы: сидячее положение в лаборатории. Основные области применения: аэрокосмическая сфера и мелкосерийное производство.
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
<b>1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>– специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства;</li> <li>– организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– ГОСТ 12.2.032-78 ССБТ. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования.</li> <li>– СП 2.4.3648-20 "Санитарно-эпидемиологические требования к организациям воспитания и обучения, отдыха и оздоровления детей и молодежи"</li> </ul>
<b>2. Производственная безопасность:</b> <p>2.1. Анализ выявленных вредных и опасных факторов</p> <p>2.2. Обоснование мероприятий по снижению воздействия</p>	<p>При проведении исследования возможны проявления следующих вредных факторов:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– недостаточная освещенность рабочего места;</li> <li>– повышенная или пониженная температура рабочей зоны;</li> <li>– воздействие раздражающих химических веществ на органы дыхания и кожные покровы человека;</li> <li>– перенапряжение анализаторов, вызванное информационной нагрузкой;</li> <li>– монотонность работы</li> </ul> <p>При проведении исследования</p>



	возможны проявления следующих опасных факторов: – электрический ток, вызываемый разницей электрических потенциалов, под действие которого попадает работающий
<b>3. Экологическая безопасность:</b>	– Литосфера: утилизация люминесцентных ламп; – Атмосфера: выброс в атмосферу химических веществ
<b>4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:</b>	Наиболее типичная чрезвычайная ситуация: пожар

<b>Дата выдачи задания для раздела по линейному графику</b>	01.02.2021
---	------------

**Задание выдал консультант:**

<b>Должность</b>	<b>ФИО</b>	<b>Ученая степень, звание</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
Доцент ООД ИШНКБ ТПУ	Антоневич Ольга Алексеевна	к.б.н.		

**Задание принял к исполнению студент:**

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
ОБМ91	Николаева Александра Владимировна		

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

Школа Инженерная школа ядерных технологий  
 Направление подготовки (специальность) Физика конденсированного состояния  
 Уровень образования Магистратура  
 Отделение школы (НОЦ) Отделение экспериментальной физики  
 Период выполнения \_\_\_\_\_ (осенний / весенний семестр 2020 /2021 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:	17.06.2021
--	------------

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
01.03.2020	Аналитический обзор литературы	15
25.10.2020	Установление закономерностей изменения микроструктуры, фазового состава и твердости образцов сплава Ti-6Al-4V, изготовленного методом электронно-лучевого сплавления, в зависимости от модифицирования поверхности и наводороживания.	15
30.12.2020	Расчет скорости сорбции водорода сплавом Ti-6Al-4V, изготовленного методом электронно-лучевого сплавления.	20
30.03.2021	Анализ результатов	15
01.05.2021	Концепция стартап-проекта	15
01.05.2021	Социальная ответственность	15
30.05.2021	Заключение	5

**СОСТАВИЛ:**

**Руководитель ВКР**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЭФ ИЯТШ ТПУ	Пушилина Н.С.	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 109 страниц, 32 рисунка, 15 таблиц, 63 литературных источника, 1 приложение.

Ключевые слова: аддитивные технологии, электронно-лучевое сплавление, титановый сплав Ti-6Al-4V, микроструктура, микротвердость, модифицирование поверхности.

Объектом исследования являлись образцы из титанового сплава Ti-6Al-4V, изготовленные методом электронно-лучевого сплавления.

Цель работы: определение закономерностей влияния модифицирования поверхности импульсным электронным пучком и насыщения водородом на свойства титанового сплава Ti-6Al-4V, изготовленного методом электронно-лучевого сплавления.

Для достижения поставленной цели были определены следующие задачи:

1) Установление закономерностей изменения микроструктуры и фазового состава образцов сплава Ti-6Al-4V, изготовленного методом электронно-лучевого сплавления, в зависимости от модифицирования поверхности.

2) Исследование влияния модифицирования импульсным электронным пучком (ИЭП) на твердость титанового сплава Ti-6Al-4V, изготовленного методом электронно-лучевого сплавления.

3) Исследование влияние модифицирования поверхности на поглощение водорода сплавом Ti-6Al-4V, изготовленным методом электронно-лучевого сплавления.

4) Установление закономерностей изменения микроструктуры, фазового состава и твердости образцов сплава Ti-6Al-4V в зависимости от модифицирования поверхности и наводороживания.

В данной работе были изготовлены образцы из порошка титанового сплава Ti-6Al-4V методом электронно-лучевого сплавления. В процессе работы

проводились исследования микроструктуры титанового сплава Ti-6Al-4V до и после модифицирования поверхности импульсным электронным пучком, измерения твердости, рентгеноструктурные исследования и насыщение образцов водородом.

Область применения: аэрокосмическая сфера – производство элементов газовых турбин, двигателей и корпусов летательных аппаратов; мелкосерийное производство – изготовление пресс-форм, заготовок, вставок.

Экономическая эффективность/значимость работы заключается в разработке и создании образцов титанового сплава, характеризующихся более высокими механическими свойствами по сравнению с аналогами, изготовленными традиционными методами.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	17
1 Основные технологии построения изделий в аддитивном производстве .....	21
1.1 Электронно-лучевое сплавление .....	21
1.2 Селективное лазерное плавление .....	23
1.3 Прямое осаждение порошка (металла) .....	24
1.4 Микроструктура титанового сплава Ti-6Al-4V, изготовленного с помощью аддитивных технологий .....	26
1.5 Сравнительный анализ механических свойств титанового сплава Ti-6Al-4V, изготовленного с помощью аддитивных технологий .....	29
2 Влияние водорода на титановый сплав Ti-6Al-4V, изготовленный аддитивными технологиями.....	31
3 Способы модификации поверхности титановых сплавов, изготовленных аддитивными технологиями.....	36
3.1 Нанесение покрытий на титановые сплавы, изготовленные аддитивными технологиями .....	36
3.2 Обработка микродуговым окислением титанового сплава Ti-6Al-4V, изготовленного электронно-лучевым сплавлением .....	38
3.3 Модификация поверхности титанового сплава Ti-6Al-4V, изготовленного электронно-лучевым сплавлением, пучками заряженных частиц .....	40
4 Материалы и методы исследования .....	45
4.1 Материал для исследований .....	45
4.2 Модифицирование поверхности образцов .....	45
4.3 Исследование микроструктуры поверхности .....	46
4.4 Измерение микро- и нанотвердости.....	46

4.5 Рентгеноструктурный анализ.....	46
4.6 Насыщение образцов водородом.....	48
5 Влияние модифицирования импульсным электронным пучком на микроструктуру и свойства сплава Ti-6Al-4V, изготовленного с помощью аддитивных технологий.....	49
6 Влияние насыщения водородом на микроструктуру и свойства сплава Ti-6Al-4V, изготовленного с помощью аддитивных технологий и модифицированного импульсным электронным пучком .....	56
7 Концепция стартап-проекта .....	62
7.1 Название проекта .....	62
7.2 Основные качества продукта, решаемая продуктом проблема.....	62
7.3 Защита интеллектуальной собственности .....	63
7.4 Объем и емкость рынка .....	63
7.5 Анализ современного состояния и перспектив отрасли .....	64
7.6 Расчет себестоимости продукта .....	65
7.6.1 Материальные затраты .....	65
7.6.2 Затраты на оборудование .....	66
7.6.3 Основная заработная плата научных сотрудников и техперсонала .....	67
7.7 Конкурентные преимущества продукта и обзор технико-экономических характеристик аналогов.....	69
7.8 Бюджет проекта.....	71
7.9 Описание целевых сегментов потребителей.....	71
7.10 Бизнес-модель проекта .....	72
7.11 Стратегия продвижения продукта на рынок .....	73
Выводы.....	74
8 Социальная ответственность .....	75

Введение.....	75
8.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности .....	76
8.1.1 Специальные правовые нормы трудового законодательства.....	76
8.1.2 Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны оператора.....	77
8.2 Производственная безопасность .....	77
8.3 Анализ вредных и опасных факторов, которые могут возникнуть в лаборатории при проведении исследований .....	79
8.3.1 Анализ вредных факторов.....	79
8.3.1.1 Недостаточная освещенность рабочего места .....	79
8.3.1.2 Пониженная или повышенная температура воздуха рабочей зоны ....	82
8.3.1.3 Воздействие раздражающих химических веществ на органы дыхания и кожные покровы человека .....	83
8.3.1.4 Перенапряжение анализаторов, вызванное информационной нагрузкой.....	84
8.3.1.5 Монотонность работы .....	85
8.3.2 Анализ опасных факторов.....	86
8.3.2.1 Электрический ток, вызываемый разницей электрических потенциалов, под действие которого попадает работающий.....	86
8.4 Экологическая безопасность.....	87
8.5 Безопасность в чрезвычайных ситуациях.....	88
8.5.1 Анализ вероятных ЧС, которые могут возникнуть в лаборатории при проведении исследований .....	88
8.5.2 Обоснование мероприятий по предотвращению ЧС и разработка порядка действия в случае возникновения ЧС .....	89
Выводы.....	91
<b>ВЫВОДЫ.....</b>	<b>92</b>
	15

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ .....	93
Приложение А .....	100
1 The main technologies for building products in additive manufacturing .....	101
1.2 Electron Beam Melting .....	101
1.3 Selective Laser Melting.....	102
1.4 Directed energy deposition of powder (metal) .....	104
1.5 Microstructure of titanium alloy Ti-6Al-4V, manufactured by additive technologies.....	105
1.6 Comparative analysis of mechanical properties of titanium alloy Ti-6Al-4V, manufactured by additive technologies.....	108



## ВВЕДЕНИЕ

Титановые сплавы обладают высокой прочностью, трещиностойкостью, низким удельным весом и поэтому широко используются в различных отраслях промышленности. Основное применение титанового сплава Ti-6Al-4V, изготовленного аддитивными технологиями (АТ) – ракетостроение и мелкосерийное производство сложных деталей. Изготовление тонкостенных конструкций из титановых сплавов широко распространено в изделиях аэрокосмической промышленности [1]. В настоящее время одной из важнейших задач производства является разработка методов изготовления высококачественных компонентов из титановых сплавов экономически эффективным способом. Аддитивные технологии производят трехмерные детали, используя цифровые САД-модели за счет послойного синтеза, что позволяет создавать сложные геометрические детали в кратчайшие сроки [2].

Наиболее существенными преимуществами аддитивного производства, являются снижение материальных потерь и времени производства изделия, а также способность изготавливать сложные детали без привлечения традиционных методов производства, таких как литье и вторичная механическая обработка, для достижения желаемых форм [3]. Аддитивные технологии позволяют изготавливать легкие объекты сложной геометрии, цепные и зубчатые механизмы, детали с более продолжительным сроком службы. В области защиты металлов ведутся разработки по достижению надлежащих механических свойств и эксплуатационных характеристик деталей [4].

Анизотропия свойств, специфика структуры и наличие специфических дефектов, обусловленных технологией аддитивного производства в материалах, могут оказывать существенное влияние на взаимодействие материалов с агрессивной средой и, в частности, с водородом. Микроструктура материалов, полученных электронно-лучевым сплавлением (ЭЛС), отличается от микроструктуры материалов, полученных традиционными методами.

Пластинчатая микроструктура сплава Ti-6Al-4V, изготовленного ЭЛС, может значительно влиять на поглощение водорода, структурные и фазовые состояния. В связи с этим изучение закономерностей взаимодействия водорода с металлическими изделиями, изготовленными с использованием АТ, представляет не только фундаментальный, но и практический интерес.

Водородная хрупкость – это ухудшение одной или нескольких механических характеристик металла под действием водорода. Развитие водородного охрупчивания (включая замедленное разрушение) в титановых сплавах будет зависеть от концентрации и распределения водорода в материале, внешних воздействий, наличия дефектов и примесей, оксидных пленок и т. д. [5,6]. На сегодняшний день не проводились исследования, связанные с влиянием водорода на свойства титановых сплавов, изготовленных электронно-лучевым сплавлением и модифицированных импульсным электронным пучком. Такие исследования актуальны для металлических материалов, в частности титановых сплавов, работающих в водородсодержащей среде, разработки технологий изготовления конструкционных материалов с улучшенными физико-механическими свойствами, а также для развития аддитивных технологий.

**Целью настоящей работы являлось** определение закономерностей влияния модифицирования поверхности импульсным электронным пучком и насыщения водородом на свойства титанового сплава Ti-6Al-4V, изготовленного методом электронно-лучевого сплавления.

**Для достижения этой цели были поставлены следующие задачи:**

1) Установление закономерностей изменения микроструктуры и фазового состава образцов сплава Ti-6Al-4V, изготовленного методом электронно-лучевого сплавления, в зависимости от модифицирования поверхности.

2) Исследование влияния модифицирования импульсным электронным пучком на твердость титанового сплава Ti-6Al-4V, изготовленного методом электронно-лучевого сплавления.

3) Исследование влияние модифицирования поверхности на поглощение водорода сплавом Ti-6Al-4V, изготовленным методом электронно-лучевого сплавления.

4) Установление закономерностей изменения микроструктуры, фазового состава и твердости образцов сплава Ti-6Al-4V в зависимости от модифицирования поверхности и наводороживания.

### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Закономерности влияния модифицирования импульсным электронным пучком при параметрах: плотность энергии 25 Дж/см<sup>2</sup>, количество импульсов 3, длительностью 50 мкс на изменение микроструктуры и фазового состава сплава Ti-6Al-4V, изготовленного методом электронно-лучевого сплавления, заключающиеся в разложении β-фазы, увеличении микронапряжений, увеличении размеров зерен α-фазы.

2. Модифицирование импульсным электронным пучком при плотности энергии 25 Дж/см<sup>2</sup>, количество импульсов 3, длительностью 50 мкс приводит к снижению скорости поглощения водорода на 40% по сравнению с образцами сплава Ti-6Al-4V, изготовленными методом электронно-лучевого сплавления.

3. Наводороживание обработанного импульсным электронным пучком при плотности энергии 25 Дж/см<sup>2</sup>, количество импульсов 3, длительностью 50 мкс сплава Ti-6Al-4V, изготовленного методом электронно-лучевого сплавления, приводит к изменению микроструктуры сплава, увеличению доли β-фазы титана до 33,1 об.% и незначительному увеличению микро- и нанотвердости.

**Научная новизна работы** заключается в том, что впервые были изучены закономерности изменения свойств титанового сплава Ti-6Al-4V, изготовленного методом электронно-лучевого сплавления, при модифицировании поверхности импульсным электронным пучком и наводороживании из газовой среды.

**Практическая значимость результатов ВКР** заключается в разработке и создании образцов титанового сплава, характеризующихся более высокими механическими свойствами по сравнению с аналогами, изготовленными традиционными методами.

**Реализация и апробация работы:** результаты, полученные в рамках выполнения выпускной квалификационной работы, были представлены на XVII и XVIII Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Перспективы развития фундаментальных наук», а также на VIII Международной молодежной научной конференции Физика. Технологии. Инновации ФТИ-2021.

# **1 Основные технологии построения изделий в аддитивном производстве**

Аддитивные методы построения изделий из титановых сплавов классифицируются по способу нанесения слоев для создания деталей, по виду и форме используемого материала. Используемый материал может находиться в виде проволоки или порошка, причем методы с порошком дополнительно подразделяют по способу его подачи в зону взаимодействия с источником нагрева. Это может быть как «послойное» выращивание, так и метод «прямого» выращивания. Для аддитивных технологий производства изделий из титановых сплавов используется тепловой источник: лазерный луч, электронный луч, электрическая или плазменная дуга [7].

## **1.1 Электронно-лучевое сплавление**

Перспективным методом аддитивного изготовления трехмерных металлических деталей является электронно-лучевое сплавление [8], которое представляет собой образование последовательных слоев путем сплавления металлического порошка в вакуумной камере. Изготовленное изделие требует небольшой последующей обработки [9]. Данная технология использует мощный электронный пучок, который обеспечивает энергию, необходимую для высокой производительности и высокой плавильной способности металлического порошка толщиной слоя от 70 до 250 мкм [10,11]. Диаметр электронного пучка составляет (0,25–1) мм. Процесс происходит в камере высокого вакуума ( $5 \cdot 10^{-3}$  бар), чтобы избежать окисления материала (рисунок 1).



Рисунок 1 – Схема процесса электронно-лучевого сплавления [8]

Большая часть исследований метода ЭЛС проводится на титановом сплаве Ti-6Al-4V, который представляет собой ( $\alpha+\beta$ ) титановый сплав [3]. Температура перехода между двумя фазами для Ti-6Al-4V составляет 995 °С. Физические и механические свойства титан-алюминий-ванадиевого сплава превосходят свойства коммерчески чистого титана (СР Ti, 99,8% титана). По сравнению с СР Ti, Ti-6Al-4V имеет большую прочность на изгиб (890 МПа против 390 МПа), высокую твердость (350 VHN против 160 VHN) и немного более высокий коэффициент теплового расширения ( $11,8 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}$  против  $11,4 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}$ ).

Преимущество электронно-лучевого сплавления состоит в том, что процесс в вакууме позволяет получать высококачественные изделия из титановых сплавов с высокой прочностью. Однако, во время процесса 3D-печати, обычно образуется неоднородная микроструктура. Это происходит из-за быстрой кристаллизации, которая препятствует распределению легирующих элементов и увеличивает растворимость в твердом состоянии, что приводит к образованию метастабильных фаз. Интенсивная дегазация при

3D-печати может привести к появлению большого количества микропор и дефектов. Следовательно, необходима механическая и термическая постобработка деталей из титанового сплава, изготовленных методом ЭЛС [12]. Метод ЭЛС подходит только для изготовления металлических деталей.

## 1.2 Селективное лазерное плавление

Технология селективного лазерного плавления (СЛП) представляет собой послойное сплавление деталей из металлического или полимерного порошка, используя лазерный источник (средний размер порошка от 10 до 40 мкм) при малой толщине порошкового слоя (20–40) мкм [13]. Процесс происходит в герметичной камере, в среде аргона или азота. Исходными материалами являются порошки из нержавеющей стали и кобальтохромовые сплавы, а также порошки Ti и Al [9]. Процесс обычно характеризуется высокими скоростями сканирования и высокими скоростями охлаждения. Сканирующая оптика используется для управления лазерным лучом в плоскости  $xy$ , в то время как стол движется в направлении  $z$  (рисунок 2).

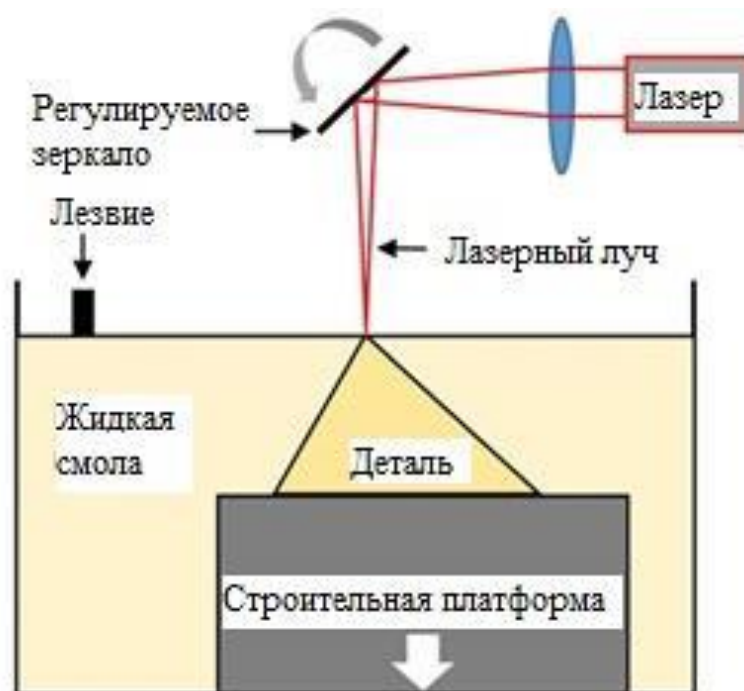


Рисунок 2 – Схема процесса селективного лазерного плавления [8]

Т. к. формирование детали в процессе СЛП происходит в результате плавления порошка, то мощность лазерного луча примерно равна 400 Вт. Для построения используются жесткие поддержки, которые кроме функции поддерживания еще и выполняют функцию теплоотвода.

В результате технологии селективного лазерного плавления получают детали с высокой точностью, которые не требуют значительной механической обработки. В процессе СЛП происходит полное расплавление порошка, что существенно улучшает микроструктуру и характеристики изделия. К плюсам данного метода относятся создание изделий с множеством закрытых полостей и практически неограниченная область применения.

К минусам селективного лазерного плавления относятся низкая производительность, высокая вероятность образования трещин, внутренние напряжения в изделии, сфероидизация для некоторых видов сплавов (Sn, Cu, Zn, Pb), ограничение в использовании материалов с высокой температурой плавления.

### **1.3 Прямое осаждение порошка (металла)**

Прямое осаждение порошка (ПОП) – тип процесса аддитивного производства, в котором энергия от внешнего источника используется для соединения материалов путем их сплавления в процессе нанесения порошка (средний размер порошка от 50 до 150 мкм). ПОП – это метод выдувного порошка, поскольку металлические порошки доставляются непрерывной подачей через сопла (рисунок 3), в то время как при методах СЛП и ЭЛС отдельные предварительно расположенные порошковые слои плавятся избирательно.



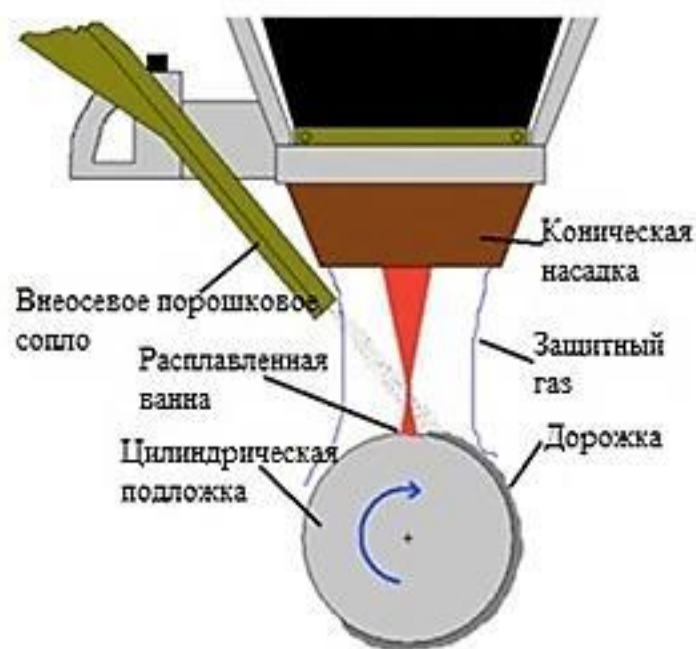


Рисунок 3 – Принцип работы прямого осаждение порошка [13]

Процесс печати начинается с создания трехмерной детали по цифровой CAD-модели. Далее материал разрезается на слои с помощью специального программного обеспечения для формирования детали. Металлический порошок подается в сопло и наносится на подложку – основа, на которой будет изготовлена деталь. Далее источник тепла плавит материал одновременно с помощью лазера, электронного пучка или плазменной дуги. Подложка сканируется в поперечных направлениях, чтобы сформировать требуемую геометрию. Послойное нанесение порошка происходит до формирования трехмерного изделия. Процесс ПОП обычно проводится в инертной среде, заполненной газообразным аргоном, где уровень кислорода можно регулировать до уровня ниже (5–10) ppm. После осаждения неиспользованные порошки могут быть переработаны [14].

В методе ПОП можно использовать полимеры и керамику. По сравнению с другими технологиями порошкового слоя, ПОП обладает большими возможностями при проектировании детали, поскольку данный метод может одновременно подавать различные виды порошков через

несколько сопел, что делает его применимым к строительным композиционным материалам. Метод ПОП способен точно добавлять материалы на изношенные или поврежденные участки с минимальными отходами. Эта возможность позволяет ремонтировать тонкостенные детали, такие как газовые турбины и лопасти турбины. Отремонтированные детали обычно имеют эквивалентные или даже лучшие механические свойства, чем исходные детали [15].

#### **1.4 Микроструктура титанового сплава Ti-6Al-4V, изготовленного с помощью аддитивных технологий**

Известно, что при изготовлении образцов методом ЭЛС, получается разная микроструктура: игольчатая, пластинчатая и глобулярная (равноосная). На микроструктуру выращенных образцов влияют параметры печати: стратегия сканирования, скорость печати, размер порошка и диаметр электронного луча.

Качественный и количественный анализ микроструктуры титанового сплава Ti-6Al-4V в исходном состоянии показал, что она негетогенная мелкозернистая, содержащая  $\alpha$ - однофазные и  $(\alpha+\beta)$ -двухфазные области (рисунок 4). Размеры однофазных  $\alpha$  областей составляют (10–40) мкм. Двухфазные  $(\alpha+\beta)$ -области окружают, как правило, однофазные области.

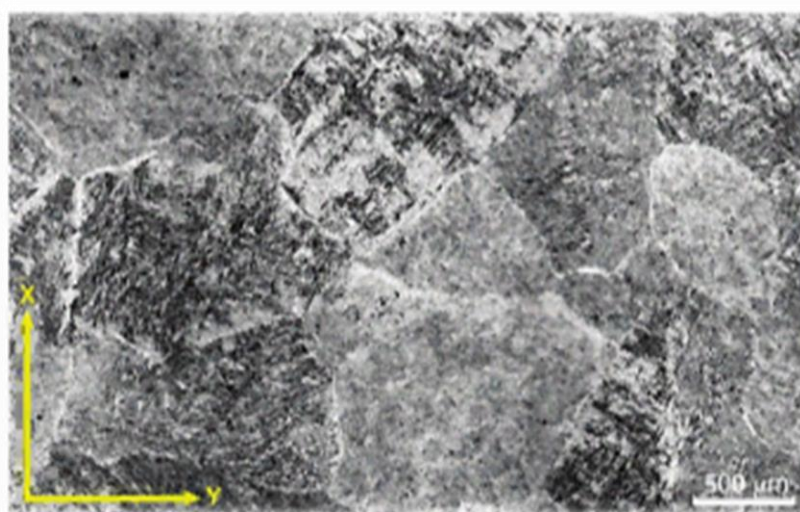


Рисунок 4 – Изображения микроструктуры выращенного образца Ti-6Al-4V

[16]

В работе [17] для исследования механических свойств титанового сплава Ti-6Al-4V использовались цилиндрические образцы, изготовленные методом ЭЛС (средний размер порошка 30 мкм). Изменения твердости соответствовали изменениям микроструктуры, наблюдаемым с помощью оптической металлографии. Твердость по Виккерсу исходных образцов составляла в среднем 5 ГПа. Значение предела прочности для образцов, изготовленных методом ЭЛС, составило в среднем 1,18 ГПа для удлинений в диапазоне от 16 до 25%. На рисунке 5 показаны игольчатые  $\alpha$ -пластины, средняя толщина которых составляет 3,2 мкм в верхней области образца.

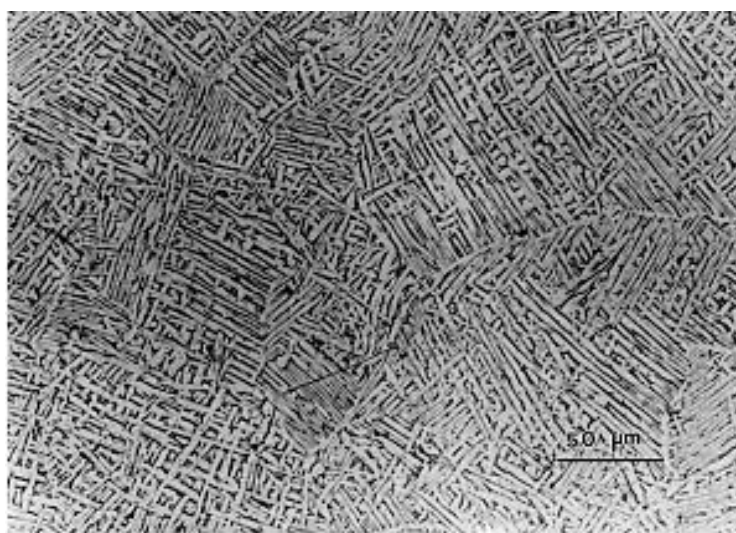


Рисунок 5 – Оптическое металлографическое изображение микроструктуры титанового сплава Ti-6Al-4V, изготовленного методом ЭЛС [17]

Было выяснено, что уменьшение размера порошка до 20 мкм привело к уменьшению размера спекаемого слоя до 100 мкм. На рисунке 6 показана смешанная глобулярно-пластинчатая структура. Сплав Ti-6Al-4V с бимодальным типом микроструктуры с долей пластинчатой структуры (70–80) %, достигает наилучшего сочетания пластичности, вязкости разрушения, жаропрочности и выносливости.

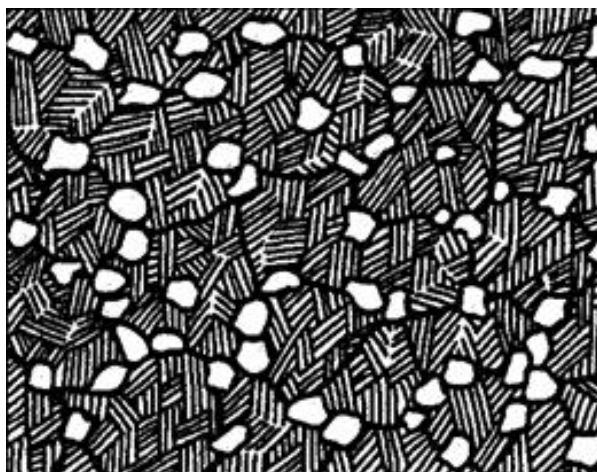


Рисунок 6 – Смешанная структура Ti-6Al-4V [18]

В работе [19] экспериментаторы исследовали образцы из титанового сплава Ti-6Al-4V, изготовленного методом СЛП. Высокие скорости охлаждения во время процесса печати существенно влияют на микроструктуру и свойства деталей. Образцы из титанового сплава Ti-6Al-4V, изготовленные методом СЛП имели мартенситную микроструктуру с низкой пластичностью и высокой твердостью. Для улучшения механических свойств рекомендуют проводить термообработку деталей.

Авторами статьи [20] было установлено, что микроструктура, шероховатость, плотность и микротвердость деталей Ti-6Al-4V тесно связаны с параметрами обработки. Из-за высокой скорости охлаждения в деталях из титанового сплава Ti-6Al-4V, изготовленных методом СЛП, в микроструктуре преобладают столбчатые  $\beta$ -зерна и  $\alpha$ -мартенсит. Деталь Ti-6Al-4V с высокой микротвердостью и гладкой поверхностью может быть изготовлена путем регулирования мощности и скорости сканирования лазера. Уровень пористости, как правило, снижается с увеличением мощности лазера и/или уменьшением скорости лазерного сканирования. Из-за твердого мартенсита детали, изготовленные методом СЛП, показали очень высокую прочность на разрыв, но низкую пластичность. Усталостная долговечность изделия, изготовленного методом СЛП, была ниже, чем у деформируемого материала, что объясняется микроструктурой, пористостью, чистотой поверхности и остаточным

напряжением внутри детали. Горячее изостатическое прессование (ГИП) значительно улучшает усталостную прочность. Процесс ГИП также увеличил пластичность, но привел к снижению прочности [21].

### **1.5 Сравнительный анализ механических свойств титанового сплава Ti-6Al-4V, изготовленного с помощью аддитивных технологий**

В настоящее время наиболее развитыми методами аддитивного производства на основе порошков являются прямое осаждение порошка, селективное лазерное плавление и электронно-лучевое сплавление. Отличием между ПОП и СЛП является способ подачи порошка. В СЛП металлические порошки равномерно распределяются по строительной платформе валиком, а при методе ПОП они выдуваются из форсунок. Сфокусированный лазерный луч сканирует поверхность в соответствии с заданной траекторией и выборочно расплавляет порошок в этом слое, после чего новый слой порошка распределяется после опускания строительной платформы на расстояние толщины слоя [22]. Электронно-лучевое сплавление отличается более высокой производительностью, чем ПОП и СЛП, благодаря высокой скорости сканирования [23].

Авторы статьи [20] исследовали механические свойства титанового сплава Ti-6Al-4V, изготовленного с помощью методов СЛП и ЭЛС с использованием порошка сферической формы со средним размером частиц 35 мкм и 77 мкм соответственно. Детали были построены на подложке из чистого титана, которая была нагрета до 473К. Образцы в основном состояли из ( $\alpha+\beta$ ) (ЭЛС) и  $\alpha'$ -фазы (СЛП). Из-за большого количества  $\alpha'$ -мартенсита в образце, изготовленного методом СЛП, его предел прочности значительно выше, чем у образцов ЭЛС, тогда как пластичность ниже. В таблице 1 приведены основные параметры печати ПОП, СЛП и ЭЛС.

Таблица 1 – Сравнение параметров печати ПОП, СЛП и ЭЛС [22]

Параметры печати	ПОП	СЛП	ЭЛС
Источник	Лазер	Лазер	Электронный пучок
Среда	Аргон	Аргон	Вакуум $10^{-4}$ – $10^{-5}$ мбар
Подача порошка	Выдувной порошок	Сплавление в порошковом слое	Сплавление в порошковом слое
Предварительный нагрев, °С	–	200	600–750 [24]
Максимальная мощность луча, Вт	500	120	3500
Пятно луча, мкм	660–900	30–250	200–1000
Скорость сканирования, м/с	0,001–0,04	0,3–1	>0,5
Толщина слоя, мкм	200–1000	20–100	50–200

В работе [25] было установлено, что механические свойства при растяжении и относительное удлинение практически не зависят от размера порошка (от 25 до 100 мкм) и толщины слоя (70 и 50 мкм для СЛП и ЭЛС соответственно). Также было обнаружено, что при изготовлении образцов с разным размером порошка образуется разный внешний вид поверхности. Из таблицы 2 видно, что свойства при растяжении деталей СЛП и ЭЛС показывают очень похожие значения. Из-за тонкой микроструктуры образцы, изготовленные ЭЛС, проявляли только немного более высокий предел прочности при растяжении ( $1132 \pm 11$ ) МПа и предел текучести ( $1074 \pm 14$ ) МПа. Относительно этого удлинение было на 10% ниже [26].

Таблица 2 – Механические свойства титанового сплава, изготовленного методами СЛП и ЭЛС, при испытаниях на растяжение [26]

Технология печати	Предел текучести (МПа)	Предел прочности на растяжение (МПа)	Относительное удлинение (%)
СЛП	$1010 \pm 18$	$1045 \pm 12$	$8,0 \pm 0,3$
ЭЛС	$1074 \pm 14$	$1132 \pm 11$	$7,2 \pm 0,2$

## 2 Влияние водорода на титановый сплав Ti-6Al-4V, изготовленный аддитивными технологиями

В статье [27] были исследованы дефектная структура и механические свойства образцов, изготовленных из титанового сплава Ti-6Al-4V методом электронно-лучевого сплавления до и после гидрирования. На рисунке 7 методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) были получены изображения образцов Ti-6Al-4V, изготовленных ЭЛС, в зависимости от концентрации водорода. Гидрирование титанового сплава до концентрации 470 ppm приводит к образованию  $\gamma$ -гидрида титана, объемное содержание которого составляет 2,2%. Дальнейшее увеличение концентрации водорода до 650 ppm сопровождается незначительным увеличением содержания гидридной фазы, в то время как доля  $\beta$ -фазы титана увеличивается (до 4,9%). Когда содержание водорода составляет 900 ppm, доля гидрида  $\gamma$  уменьшается, доля  $\beta$ -фазы уменьшается до 4,2%, и наблюдается образование гидридной фазы  $\delta$ .

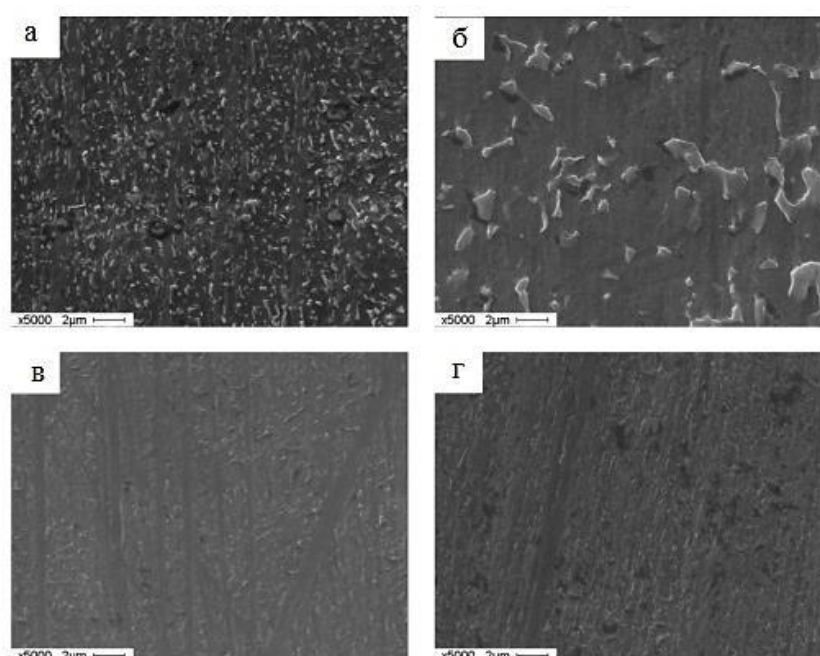


Рисунок 7 – Микроструктура поверхности сплава Ti-6Al-4V, изготовленного ЭЛС, по данным СЭМ в зависимости от содержания водорода: (а) – 65 ppm; (б) 470 ppm; (в) 650 ppm; (г) 900 ppm [27]

По данным микроструктурного анализа образцов Ti-6Al-4V, изготовленных ЭЛС, с использованием сканирующей микроскопии наблюдается тенденция к фрагментации  $\alpha$ -фазы с увеличением содержания водорода (рисунок 7). Имеет место механизм уменьшения размеров  $\alpha$ -пластин [28]. Это явление можно объяснить тем, что при более высоком содержании водорода образование гидридов и эвтектоидное разложение происходят намного интенсивнее, увеличивая тем самым скорость зародышеобразования эвтектоидных ламелей, что приводит к уменьшению их размеров. Содержание водорода, используемое в данной работе, ниже эвтектоидной точки, следовательно, увеличение содержания водорода от 100 до 900 ppm будет способствовать улучшению исходной структуры.

На рисунке 8 представлены результаты измерения микротвердости образцов Ti-6Al-4V, изготовленных ЭЛС. Твердость литых и отожженных образцов составляет 320 HV<sub>0,5</sub>. Высокая микротвердость сплава Ti-6Al-4V, изготовленного ЭЛС, по сравнению с литыми и отожженными образцами обусловлена тонкой пластинчатой структурой, а также высокими внутренними напряжениями в материале. Установлено, что гидрирование в диапазоне концентраций от 200 до 900 ppm увеличивает микротвердость образцов Ti-6Al-4V, изготовленных ЭЛС. Водород находится преимущественно в твердом растворе при концентрациях до 900 ppm, что подтверждается данными рентгеновской дифракции. Растворение водорода и образование гидридов приводят к искажению кристаллической решетки и росту микронапряжений в материале, что приводит к увеличению твердости сплава Ti-6Al-4V, изготовленного ЭЛС, и гидрированию. Другим упрочняющим фактором является улучшение микроструктуры под действием водорода (рисунок 7).



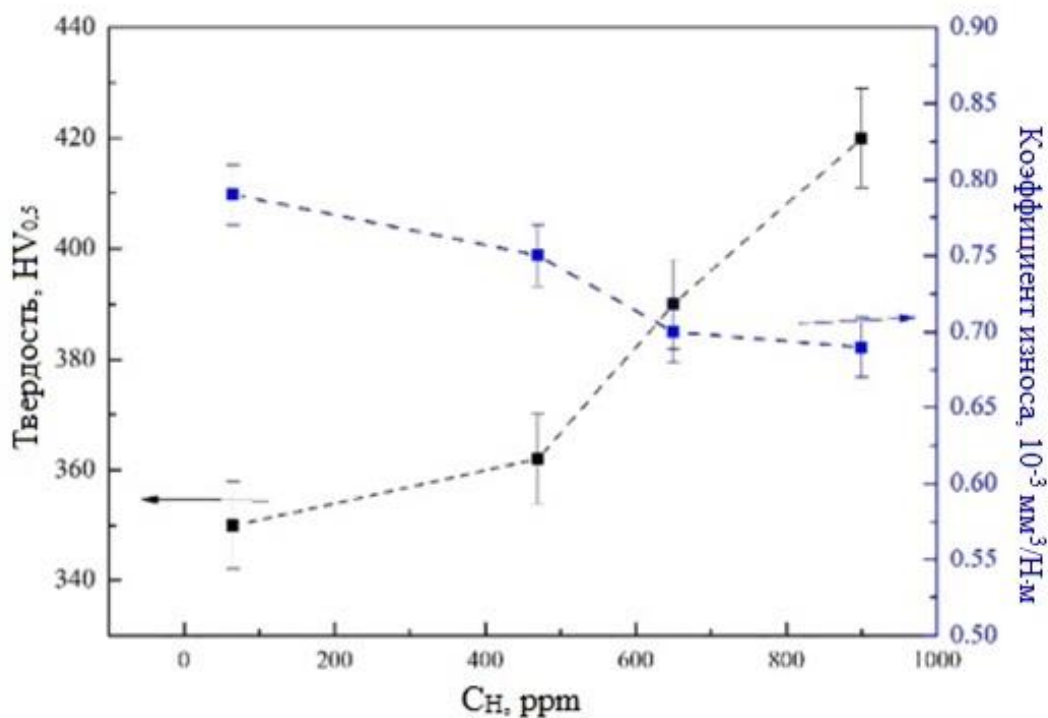


Рисунок 8 – Зависимость твердости и скорости износа от содержания водорода [27]

Дефекты исследовались методами позитронной спектроскопии, согласно которым преобладающим типом дефектов в сплаве Ti-6Al-4V, изготовленного ЭЛС, являются дислокации, также в образцах присутствуют вакансионные комплексы (концентрация порядка 0,003 ppm) и наноразмерные кластеры (Ti<sub>3</sub>Al). Т. о. с увеличением содержания водорода, линейно возрастают плотность дислокаций и концентрация комплексов водород-вакансия, что свидетельствует о том, что водород не только активно взаимодействует с существующими дефектами, но и индуцирует образование новых дефектов.

Измерение износостойкости было проведено при следующих параметрах: количество витков – 2000, индентор – карбид вольфрама, приложенная сила – 2Н. Введение водорода (в рассматриваемых концентрациях) приводит к снижению износа образцов Ti-6Al-4V, изготовленных ЭЛС, и увеличению твердости образцов.

Таким образом, коэффициент износа Ti-6Al-4V с концентрацией водорода 500 ppm составляет  $7 \cdot 10^{-4}$  мм<sup>3</sup>/(Н·м), значения коэффициента износа снижаются на 20% при дальнейшем увеличении концентрации водорода до 900 ppm. Это связано с улучшением микроструктуры под воздействием водорода и образованием вторичных фаз.

В статье [29] были исследованы эволюция микроструктуры и фазовые переходы в образцах из титана Ti-6Al-4V, изготовленных методом ЭЛС, в условиях гидрирования при 650 °С. Диффузия водорода в титановом сплаве Ti-6Al-4V определяется многими факторами, такими как температура гидрирования, давление водорода, микроструктура, фазовый состав, дефектная структура и другие. При указанных условиях гидрирования коэффициенты диффузии в  $\alpha$ - и  $\beta$ -фазах, рассчитанные по уравнениям [30]:  $D_{\alpha} = 1 \cdot 10^{-9}$  м<sup>2</sup>/с и  $D_{\beta} = 5,3 \cdot 10^{-9}$  м<sup>2</sup>/с, соответственно.

Микроструктура Ti-6Al-4V, изготовленного ЭЛС, может значительно влиять на поглощение водорода, структурные и фазовые состояния под действием водорода и, как следствие, на ухудшение механических свойств. Целью данной работы было изучение влияния водорода на фазовые переходы и эволюцию микроструктуры деталей из титана Ti-6Al-4V, изготовленных электронно-лучевым сплавлением.

На рисунке 9 показаны измеренные значения твердости деталей Ti-6Al-4V, изготовленных ЭЛС, до и после гидрирования. Видно, что гидрирование до 0,29 масс.% приводит к незначительному увеличению микротвердости образцов Ti-6Al-4V, в то время как тенденция разупрочнения наблюдается с увеличением содержания водорода от 0,29 до 0,9 масс.%. Высокое значение микротвердости полученной детали из Ti-6Al-4V (395 HV) обусловлено тонкой пластинчатой структурой, а также наличием в структуре сплава мартенситной  $\alpha''$ -фазы.

Микроструктура образца гидрированного до 0,29 масс.% улучшается, однако пластинчатая структура все еще присутствует. Кроме того, в структуре

образуются пластины твердой интерметаллической фазы  $Ti_3Al$ . Следовательно, как улучшенная микроструктура, так и выделения фаза  $\alpha_2$  могут повысить твердость гидрированных образцов  $Ti-6Al-4V$ , изготовленных ЭЛС, что также наблюдалось для литых сплавов в работе [31].

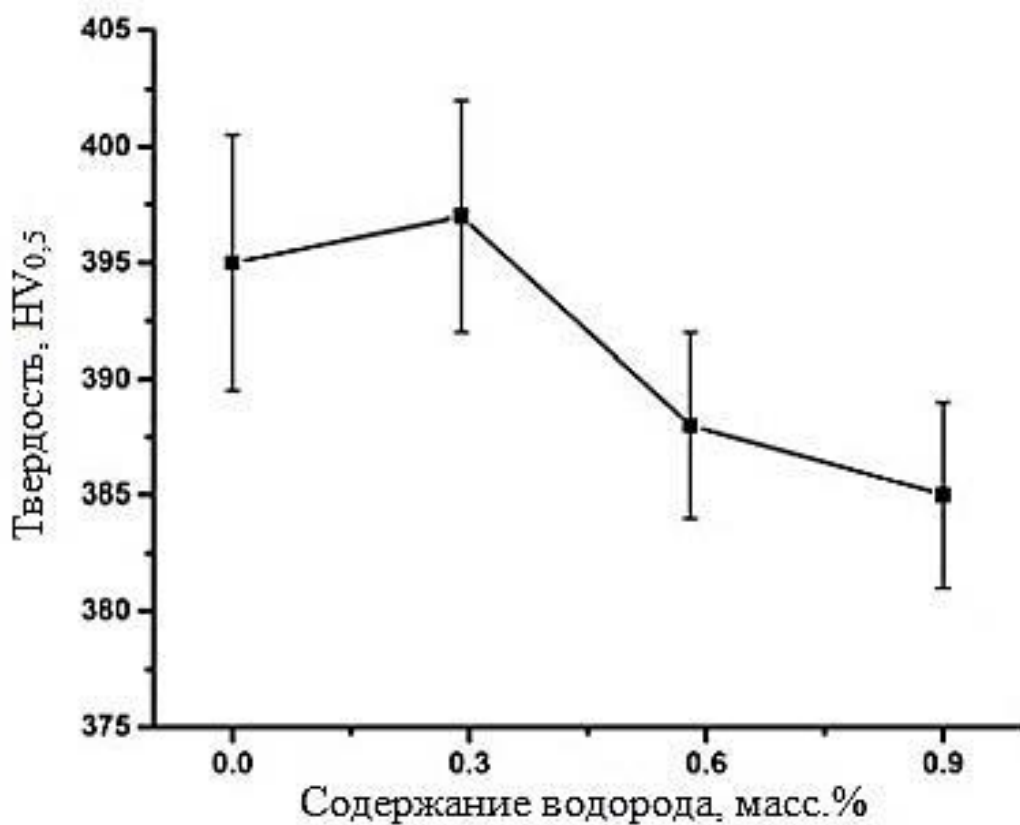


Рисунок 9 – Зависимость твердости деталей из титана  $Ti-6Al-4V$ , изготовленных ЭЛС, от содержания водорода [29]

С увеличением содержания водорода до 0,58 и 0,9 масс.% микроструктура становится более тонкой, но пластинчатая структура сплава разрушается и образуются  $\delta$ -гидриды, что, по-видимому, приводит к снижению твердости гидрированных образцов  $Ti-6Al-4V$ .

### **3 Способы модификации поверхности титановых сплавов, изготовленных аддитивными технологиями**

Эффективным способом постобработки титановых сплавов является нанесение покрытий (например, металлизация или эпоксидное покрытие). На изделие, изготовленное аддитивными технологиями, можно наносить частичные и полные антикоррозийные или износостойкие покрытия в качестве поверхностного слоя материала или в ремонтных целях.

#### **3.1 Нанесение покрытий на титановые сплавы, изготовленные аддитивными технологиями**

В настоящее время наблюдается рост применения титановых сплавов в машиностроении, в том числе в атомной, космической, авиационной и нефтедобывающей промышленности, поэтому необходимо повысить их износостойкость и твердость [32]. Традиционные методы механической, химической и термохимической обработки не могут существенно улучшить триботехнические свойства титана и его сплавов. В статье [33] было исследовано образование карбидов и боридов титана в поверхностных слоях титанового сплава, изготовленного АТ.

Были исследованы высокопрочные покрытия, нанесенные на заготовки из титанового сплава ВТ1-0 методом электронно-лучевой плавки смеси порошков карбида бора, титана и фтора. Карбид бора смешивался с расплавленным материалом под действием электронного луча и при кристаллизации образовывал высокопрочные соединения карбида титана и бориды титана. Порошок титана использовался в качестве смачивающего компонента, предотвращающего выгорание частиц порошка карбида бора во время обработки. Потоки фтора защищали ванну расплава от воздействия атмосферы. Триботехнические испытания сформированных покрытий

проводились в режиме трения о неподвижные абразивные частицы размером (63–80) мкм. Износ оценивали по потере массы образцов после каждого цикла испытаний.

На рисунке 10 представлена структура поперечных сечений модифицированных слоев толщиной до 1,7 мм на основе титана при различных концентрациях карбида бора в наплавленном порошке. Изображения были получены вблизи поверхности покрытия, где влияние температуры было наиболее высоким. Увеличение концентрации упрочняющей фазы увеличивало объемную долю и размер частиц боридов титана, которые приобрели почти гексагональную форму (рисунок 10 а-б). В покрытиях, сформированных при высоком содержании карбида бора в исходной порошковой смеси, наблюдались частицы, расположенные в сплошную каркасную сетку из карбида и боридов титана (рисунок 10в). Объемная доля упрочняющих фаз в покрытиях при максимальном содержании карбида бора в смеси для покрытий составляет 50%.

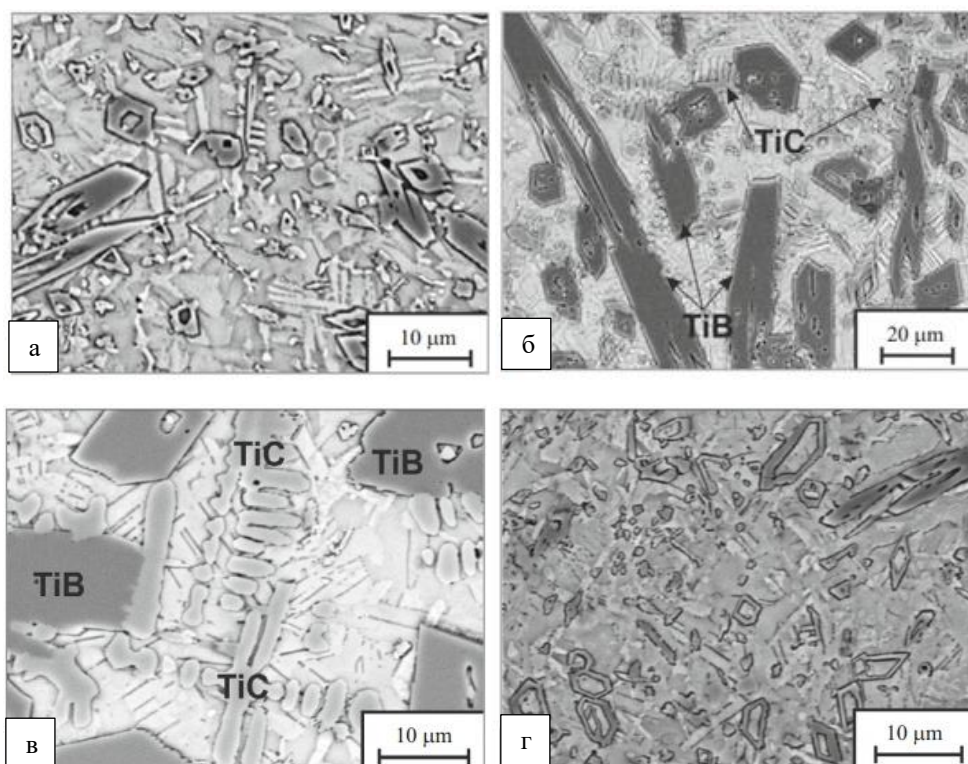


Рисунок 10 – СЭМ-изображения микроструктуры поверхностных слоев сплава ВТ1-0, полученные ЭЛС исходных порошковых смесей титана с различным содержанием карбида бора: (а) 15%; (б) 20%; (в) 25%; (г) 30% [33]

Образцы с покрытием, полученным электронно-лучевым сплавлением порошковой смеси с 30% содержанием карбида бора имели максимальную микротвердость – 5650 МПа (рисунок 10г). Вблизи зоны термического влияния обнаружены скачки микротвердости до 7800 МПа из-за наличия скопления частиц твердой фазы. Значение износостойкости максимально у образцов с покрытием, сформированным из порошковой смеси с 30% содержанием карбида бора. При трении о неподвижные абразивные частицы SiO<sub>2</sub> износостойкость образцов с покрытием оказалась в 3 раза выше износостойкости титана VT1-0 без покрытия.

### **3.2 Обработка микродуговым окислением титанового сплава Ti-6Al-4V, изготовленного электронно-лучевым сплавлением**

Технология селективного электронно-лучевого сплавления (СЭЛС) позволяет избежать возникновения внутренних напряжений и трещин в металлических деталях при быстром охлаждении благодаря высокой мощности и скорости сканирования [34]. Кроме того, эта технология обладает высокой точностью формования деталей, высокой степени использования материала и небольшого времени производства. В работе [35] было показано, что дефекты поверхности являются основными факторами, влияющими на коррозионные и износостойкие свойства сплавов Ti-6Al-4V, изготовленных СЭЛС. Титановый сплав может самопроизвольно образовывать стабильную пассивирующую пленку на воздухе и растворе, которая играет ключевую роль в коррозионной стойкости Ti-6Al-4V. Но пассивирующие пленки легко разрушаются, особенно в солевых растворах, содержащих ионы Cl<sup>-</sup>. Острой проблемой являются коррозионные характеристики трубопроводов для транспортировки нефти и газа из-за контакта с окружающей средой. Таким образом, важно улучшить коррозионную стойкость и износостойкость сплава Ti-6Al-4V. Традиционные технологии обработки, такие как механическая и дробеструйная обработка, не подходят для обработки поверхности пористых структур и деталей сложной

формы. В работе [36] были исследованы электрохимическая коррозия и износостойкость титанового сплава Ti-6Al-4V, изготовленного СЭЛС, с оксидным покрытием при различных приложенных напряжениях. Данное покрытие состоит в основном из рутила и анатаза TiO<sub>2</sub>. Оксидная пленка, полученная микродуговым оксидированием (МДО), привела к хорошей адгезии на границе раздела образец-пленка, повысила стойкость к химической коррозии, износостойкость и термостойкость [37]. Чтобы измерить межфазное соединение образец-пленка и толщину покрытия, наблюдали морфологию поперечного сечения покрытия при приложенном напряжении 400, 420 и 450В (рисунок 11). Видно, что толщина покрытия увеличивается с приложенным напряжением. При 400, 420 и 450В значения толщины покрытия составляют (1,12±0,37), (1,27±0,36) и (1,54±0,44) мкм соответственно. Т. о. быстрый рост стадии микродугового оксидирования осуществляет большой вклад в толщину покрытия.

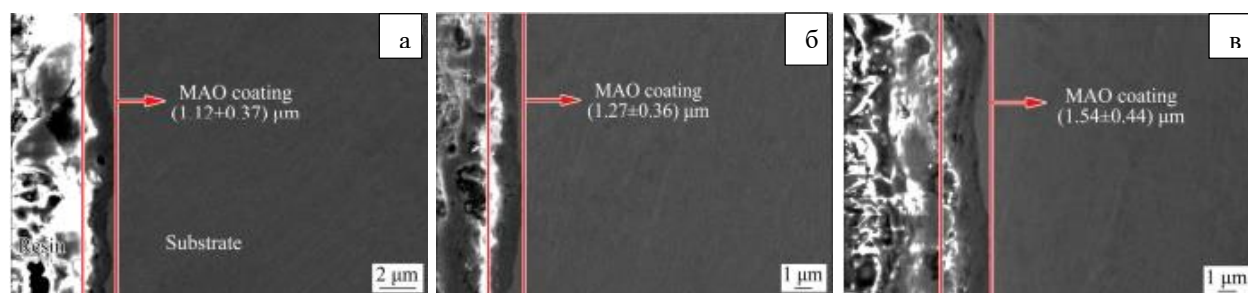


Рисунок 11 – Морфология поперечного сечения образцов Ti-6Al-4V, изготовленных СЭЛС, после МДО при различных напряжениях: (а) 400В; (б) 420В; (в) 450В [36]

На рисунке 12 показано влияние длительности испытания на износ и коэффициент трения подложки Ti-6Al-4V без и с покрытием TiO<sub>2</sub> при трех различных напряжениях. Для подложки Ti-6Al-4V коэффициент трения составляет около 0,2 и кривая стабильна во время проведения испытаний на трение и износ. Коэффициент трения для подложки Ti-6Al-4V с покрытием резко увеличивается в течение 5 минут после проведения испытаний на износ, а затем выравнивается. С увеличением напряжения МДО увеличивается и

коэффициент трения. Фазовый состав покрытия также является важным фактором, влияющим на износостойкость пленочного слоя. Когда фазовый компонент содержит оксиды с высокой твердостью, мембранный слой имеет высокую твердость и хорошую износостойкость. МДО покрытие, полученное при напряжении 420В, имеет лучшую коррозионную стойкость.

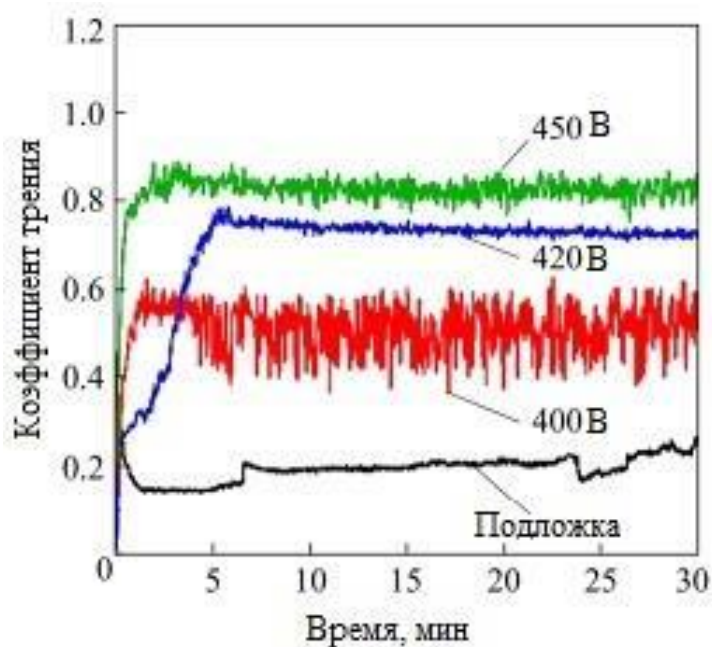


Рисунок 12 – Коэффициент трения Ti-6Al-4V без и с обработкой МДО при различных напряжениях [36]

### 3.3 Модификация поверхности титанового сплава Ti-6Al-4V, изготовленного электронно-лучевым сплавлением, пучками заряженных частиц

В работе [38] авторы применяли непрерывную обработку сканирующим электронным пучком для изменения микроструктуры и механических свойств деталей из титанового сплава Ti-6Al-4V, изготовленных методом ЭЛС. Было показано, что образование первичных  $\beta$ -зерен размером 20-30 мкм с тонкими  $\alpha$ - и  $\beta$ -ламелями в расплавленном поверхностном слое резко увеличивают микротвердость поверхности.

Образцы, изготовленные методом ЭЛС, обрабатывались непрерывным сканирующим электронным лучом. Сигнал с частотой 1000 Гц использовался



для превращения электронного пучка в линию длиной 27 мм. Ускоряющее напряжение и ток пучка составляли 30 кВ и 60 мА соответственно. Сфокусированный электронный пучок с пятном диаметром 0,5 мм обрабатывал поверхность образца линия за линией. Мощность электронной пушки и скорость движения образца были выбраны так, чтобы обеспечить плотность энергии 450 Дж/см<sup>2</sup>. Микротвердость по Виккерсу исследуемых образцов оценивали при нагрузке 50 г в течение 10 с.

Во время непрерывной обработки сканирующим электронным пучком электроны высокой энергии фокусируются в узкое пятно и отклоняются так, чтобы образовать глубокую и узкую расплавленную зону на поверхности деталей. В результате детали, изготовленные методом ЭЛС, подвергнутые электронно-лучевой обработке, характеризуются рельефной поверхностью с канавками. На боковой поверхности образца образуются неровности в виде последовательности холмов и впадин (рисунок 13б). При детальной СЭМ-визуализации поверхности, обработанной электронным пучком, обнаруживаются  $\alpha$ -зерна размером около (20–30) мкм в расплавленном поверхностном слое (рисунок 13в). Такие  $\alpha$ -зерна характеризуются волнистой топографией вследствие быстрого затвердевания расплавленного поверхностного слоя в  $\beta$ -зернах с последующим мартенситным превращением в твердом состоянии  $\beta \rightarrow \alpha'$ .

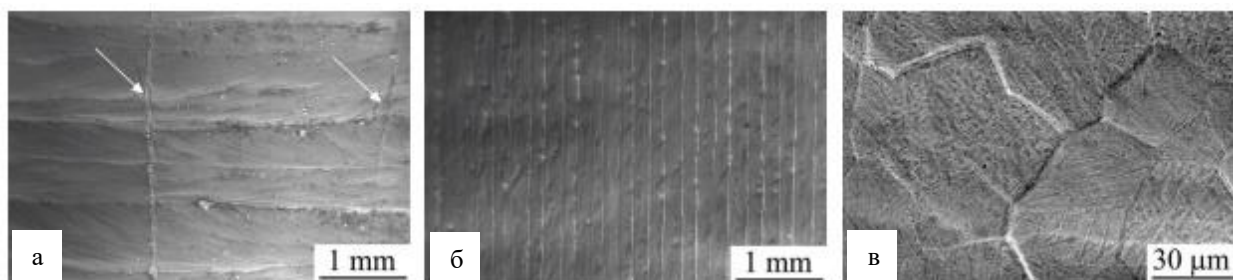


Рисунок 13 – СЭМ-изображения деталей Ti-6Al-4V, изготовленных методом ЭЛС до (а) и после электронно-лучевой обработки с плотностью энергии 450 Дж/см<sup>2</sup> (б, в) [38]

Градиентное распределение микротвердости в деталях, изготовленных АТ, подвергнутых обработке электронным пучком, свидетельствует о трехслойной структуре в модифицированных поверхностных слоях (рисунок 14). Наружный поверхностный слой 1 характеризуется самым высоким и постоянным значением микротвердости, превышающим 8300 МПа. Микротвердость нижележащих слоев 2 и 3 постепенно уменьшается, причем градиент твердости в слое 2 намного выше, чем в слое 3. Общая глубина упрочненного поверхностного слоя, определяемая как глубина от поверхности, на которой твердость падает почти до объемного значения, не превышает  $d=500$  мкм.

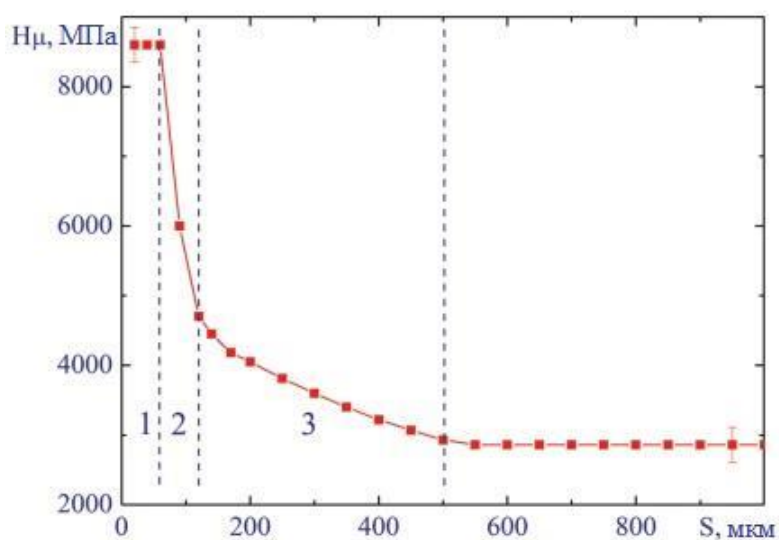


Рисунок 14 – Микротвердость деталей Ti-6Al-4V, изготовленных ЭЛС, подвергнутых электронно-лучевой обработке [38]

Детальное исследование СЭМ-изображений боковой грани деталей, изготовленных методом ЭЛС, подвергнутых электронно-лучевой обработке, подтверждает многослойную структуру упрочненного поверхностного слоя. Толщины наружного расплавленного поверхностного слоя 1, нижележащего слоя 2 и зоны термического влияния 3 равны 50, 60 и 400 мкм соответственно. В слоях 1 и 2 наблюдаются равноосные рекристаллизованные зерна размером (20–30) мкм. Внутри зерен слоя 1 имеются тонкие пластины из  $\alpha$ -Ti и  $\beta$ -Ti, собранные в группы и ориентированные в разные стороны. Внутри

рекристаллизованных зерен слоя 2 объемная доля  $\beta$ -фазы ниже, причем ширина пластин  $\alpha$ -Ti выше. Фазовое превращение  $\alpha \rightarrow \beta \rightarrow \alpha$  происходит в пределах  $\alpha$ -зерен зоны термического воздействия. Показано, что образование первичных  $\beta$ -зерен с мелкими  $\alpha$ - и  $\beta$ -ламелями в расплавленном поверхностном слое резко повышает микротвердость поверхности.

В работе [39] было исследовано влияние электронно-пучковой обработки на микроструктуру титана VT1-0 и его механические свойства. Целью данной работы является исследование закономерностей изменения структуры поверхностных слоев технического титана VT1-0 в процессе облучения 3 электронными импульсами с плотностью энергии от 12 до 24 Дж/см<sup>2</sup> и длительностью импульса 50 мкс.

Как видно из рисунка 15, с увеличением плотности энергии пучка от 12 до 24 Дж/см<sup>2</sup> толщина расплавленного слоя возрастает от 6 до 11 мкм. Внутри данного слоя наглядно выявляются мартенситные ламели, длина которых ограничивается толщиной расплава. Одновременно увеличиваются размеры поверхностных зерен, а также мартенситных пластин в приповерхностных зернах, образующихся в результате  $\beta \rightarrow \alpha'$  превращения по бездиффузионному мартенситному механизму.

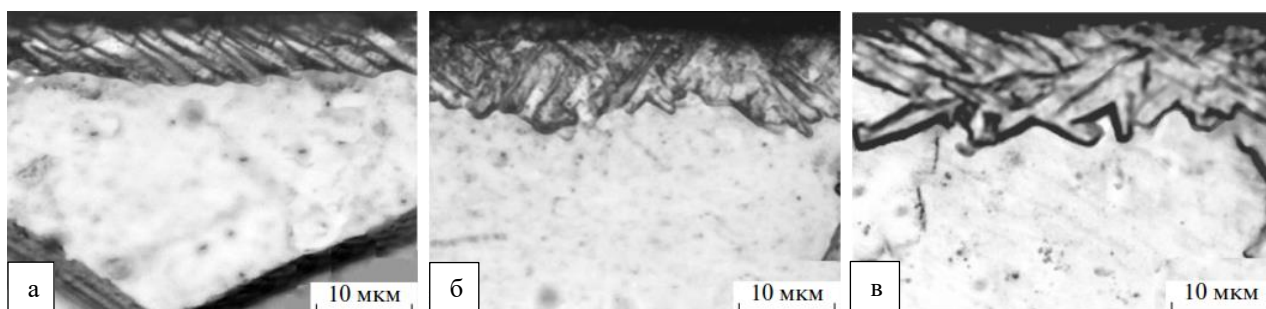


Рисунок 15 – Оптические изображения микроструктуры поперечных шлифов образцов титана VT1-0 после обработки электронным пучком с плотностью энергии 12 (а), 18 (б), 24 Дж/см<sup>2</sup> (в) [39]

Было выяснено, что обработка электронным пучком приводит к плавлению и последующей быстрой кристаллизации тонкого поверхностного слоя образцов VT1-0. Проведенные исследования на глубине от 1 до 2 мкм,

выявили крупные (порядка 10 мкм) зерна  $\alpha'$ -Ti, имеющие пластинчатую морфологию. С помощью просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) определили, что поперечные размеры пластин варьируются в пределах от 200 до 500 нм (рисунок 16а, 16б). Продольные размеры пластин ограничены размером зерен  $\alpha$ -фазы.

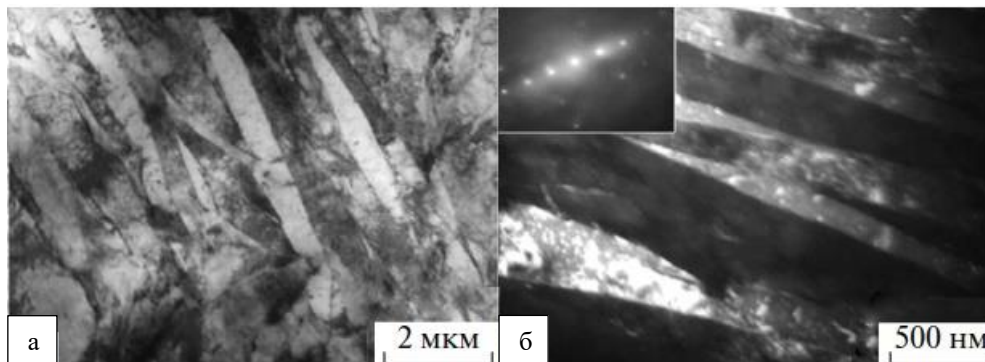


Рисунок 16 – Светлопольное (а) и темнопольное (б) ПЭМ-изображения, структуры поверхностного слоя титана VT1-0, подвергнутого обработке электронным пучком с плотностью энергии 18 Дж/см<sup>2</sup>, полученные в рефлексах (002)  $\alpha$ -фазы [40]

Методами измерения микротвердости и наноиндентирования было установлено, что электронно-пучковая обработка приводит к существенному упрочнению поверхности образцов VT1-0. Величина микротвердости исходных образцов VT1-0 составляет 1,8 ГПа и увеличивается до 2,8 ГПа после обработки электронным пучком независимо от плотности энергии пучка. Также обработка электронным пучком приводит к увеличению модуля упругости материала поверхностных слоев образцов VT1-0.

Модифицированные поверхностные слои титана VT1-0 характеризуются высоким уровнем термических микро- и макронапряжений. Релаксация последних обуславливает как макроскопический изгиб образца, так и формирование складчатого рельефа на его поверхности. Было показано, что с ростом плотности энергии электронного пучка от 12 до 24 Дж/см<sup>2</sup> величина макронапряжений в модифицированном поверхностном слое уменьшается от 1,6 до 1 ГПа.

## **4 Материалы и методы исследования**

### **4.1 Материал для исследований**

Изготовление образцов из порошка титанового сплава Ti-6Al-4V проводилось на установке электронно-лучевого сплавления ARCAM A2 EBM (Arcam AB, Мельндаль, Швеция) [41]. Технические характеристики установки следующие: минимальный диаметр луча – 250 мкм, рабочий вакуум  $5 \cdot 10^{-4}$  мбар, область построения образцов: 200x200x380 мм, максимальная мощность луча 3 кВт, скорость перемещения электронного луча – 60 мм/с, диапазон температур процесса (600–1100) °С. Устройство работает в режиме генерации от 1 до 100 лучей, что существенно увеличивает скорость печати путем одновременной обработки различных элементов образца.

Средний размер частиц порошка варьировался от 50 до 150 мкм. Образцы имели форму цилиндров диаметром 8 мм и высотой 2 мм. Все образцы были изготовлены в одной партии с направлением сборки, параллельным круглой поверхности. Толщина слоя порошка составляла 70 мкм, использовались стандартные настройки параметров ARCAM для твердого Ti-6Al-4V. Образцы были тщательно очищены в системе извлечения порошка ARCAM, далее они были подвергнуты механической шлифовке для получения однородной поверхности. Измерение шероховатости исходного образца Ti-6Al-4V, изготовленного ЭЛС, проводилось на профилометре Hommel Tester T1000.

### **4.2 Модифицирование поверхности образцов**

Для исследования влияния обработки на свойства образцов, часть подвергалась обработке поверхности импульсным электронным пучком (ИЭП). Плотность энергии составила  $25 \text{ Дж/см}^2$ , количество импульсов 3, длительность

импульса 50 мкс. Обработка проводилась на установке СОЛО в Институте сильноточной электроники СО РАН.

### **4.3 Исследование микроструктуры поверхности**

В данной работе микроструктуру образцов исследовали методом оптической микроскопии с помощью микроскопа МЕТАМ ЛВ, методом сканирующей электронной микроскопии с помощью системы с электронным и сфокусированными пучками Quanta 200 3D в ТГУ. Также была использована просвечивающая электронная микроскопия JEM-2100F для микроструктурной характеристики образцов. Предварительно производилось травление поверхности материала реагентом 2 мл HF, 3 мл HNO<sub>3</sub> и 50 мл H<sub>2</sub>O, чтобы выявить их структуру после механической полировки.

### **4.4 Измерение микро- и нанотвердости**

Измерение микротвердости проводилось на твердомере Виккерса модели KB30 при испытательной нагрузке 0,5 кг. Измерение нанотвердости модуля Юнга проводилось на нанотвердомере ННТ-ТТХ S при максимальной нагрузке 400 мН. Анализ данных наноиндентирования проводился методом Оливера-Фарра.

### **4.5 Рентгеноструктурный анализ**

На рисунке 17 представлена схема устройства дифрактометра Shimadzu XRD-7000S, из которой видно, что основными элементами дифрактометра являются рентгеновская трубка, гониометр и детектор. На рисунке 17а присутствует элемент «Ножи», суть которого заключается в том, что при падении излучения на образец, он отражается под разными углами. Данные элементы должны убирать нежелательное излучение, которое может вызвать

помехи на дифрактограмме. Гониометр необходим для регулирования угла скольжения  $\theta$  в уравнение Вульфа-Брэгга. Также, благодаря возможности регулирования скорости изменения угла, стало возможным снимать более качественные дифрактограммы и фиксировать рефлексы с малой интенсивностью.

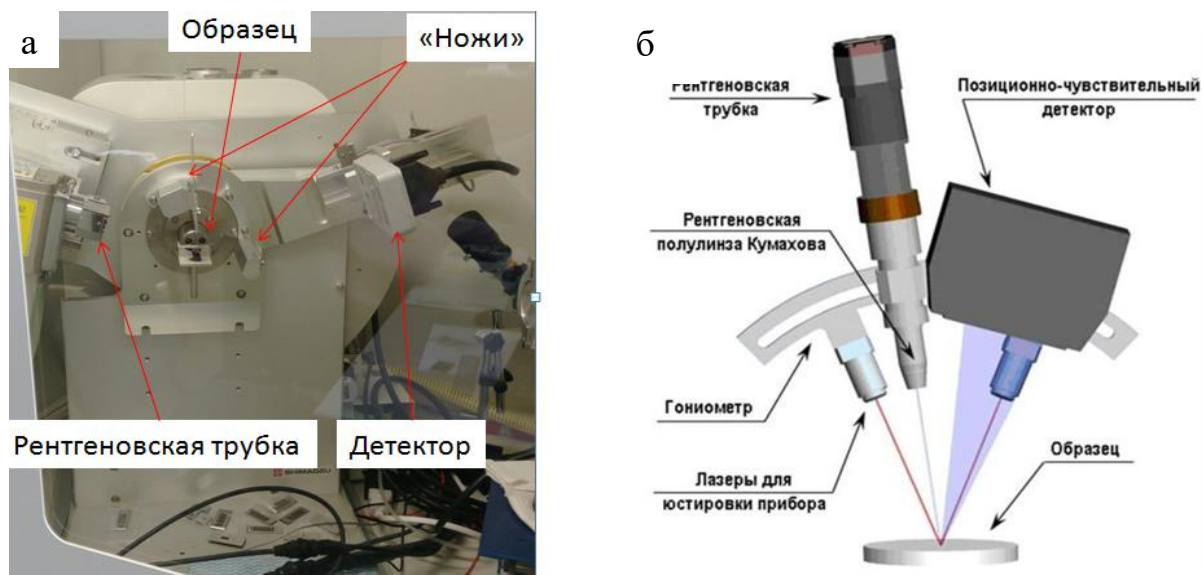


Рисунок 17 – (а) дифрактометр Shimadzu XRD-7000S, (б) схематичное изображение стандартной схемы дифрактометра Shimadzu XRD-7000S

Идентификацию фаз и структурные исследования проводили с помощью рентгеновской дифракции. Рентгеноструктурные исследования проводили на  $\text{CuK}\alpha$ -излучении (длина волны  $1,5410 \text{ \AA}$ ) с использованием дифрактометра Shimadzu XRD-7000S в геометрии Брэгга-Брентано в диапазоне угла от 10 до 90 градусов. Скорость сканирования составляет 5 град/мин. с шагом  $0,0143^\circ$ , предварительно установленное время 42,97 сек. В дифрактометре применяется медная трубка, на которую подается ток и напряжение  $I=30 \text{ мА}$   $U=40 \text{ кВ}$ , соответственно. Дифракционные изображения были получены с использованием высокоскоростного детектора широкого диапазона Shimadzu OneSight с 1280 каналами.

#### 4.6 Насыщение образцов водородом

Гидрирование образцов из газовой фазы проводили с помощью автоматизированного комплекса Gas Reaction Controller до заданных концентраций водорода. Условия гидрирования: температура 650 °С, давление водорода 1 атм., гидрирование проводили до концентрации 0,3 масс.%. Специальное программное обеспечение оборудования Gas Reaction Controller использовалось для контроля и анализа процесса сорбции водорода, а также для выявления особенностей взаимодействия водорода с материалами. Скорости нагрева и охлаждения составляли 6 °С/с и 1 °С/с соответственно.

После гидрирования образцы выдерживали в гелии при температуре 650 °С и давлении 2 атм. в течение 12 ч для обеспечения равномерного распределения водорода по образцам. После этого образцы охлаждали со скоростью 6 °С/мин до комнатной температуры.

Абсолютную концентрацию водорода в образцах после гидрирования измеряли методом плавления в среде инертного газа (аргон) с помощью анализатора водорода LECO RHEN602. Концентрация водорода в образцах до гидрирования составляла 0,0005 масс.%. Измеренная концентрация водорода в образцах после гидрирования составила 0,3 масс.%.



## **7 Концепция стартап-проекта**

### **7.1 Название проекта**

Идея проекта заключается во внедрении технологии модификации аддитивно изготовленных деталей импульсным электронным пучком с целью повышения коррозионной стойкости, удовлетворяющей запросы потребителей в области судостроения, машиностроения, а также авиа- и ракетостроения.

Цель проекта – разработка маркетингового плана продвижения предлагаемой технологии среди потенциальных клиентов на российский рынок. Опираясь на разрабатываемое решение, было предложено следующее название для стартап-проекта: «Внедрение технологии повышения коррозионной стойкости деталей путем модификации импульсным электронным пучком». Предлагаемое коммерческое название технологии: «МИЭП».

### **7.2 Основные качества продукта, решаемая продуктом проблема**

Большинство деталей авиа- и ракетостроения, изготовленных с помощью аддитивных технологий из титановых сплавов, подвержены коррозии, что приводит к разрушению деталей. Решить данную проблему повышения коррозионной стойкости можно с помощью технологии модификации поверхности изделий из сплава Ti-6Al-4V импульсным электронным пучком.

Данная технология позволит:

- сократить сроки проведения научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ и ускорить вывод продукции авиа- и ракетостроения на рынок;
- повысить надежность изделия;
- продлить срок службы изделия;
- обрабатывать детали сложной формы.

### **7.3 Защита интеллектуальной собственности**

Полученные результаты представлены на конференции «Перспективы развития фундаментальных наук» [42]. Для защиты интеллектуальной собственности в соответствии с законом в настоящее время оформляется заявка в Федеральную службу по интеллектуальной собственности (Роспатент). После получения патента защита интеллектуальной собственности на описанную выше технологию «МИЭП» будет регулироваться сразу несколькими актами – частью четвертой Гражданского кодекса Российской Федерации, а также федеральными законами № 98-ФЗ от 29 июля 2004 года «О коммерческой тайне», № 149-ФЗ от 27 июля 2006 года «Об информации, информационных технологиях и о защите информации», № 135-ФЗ от 26 июля 2006 года «О защите конкуренции», а также Кодексом об административных правонарушениях РФ, Уголовным кодексом РФ и другими.

### **7.4 Объем и емкость рынка**

Согласно данным анализа мирового рынка газотурбинных двигателей (ГТД) ОАО "НПО "Сатурн" мировой рынок ГТД в 2019г. выглядел следующим образом:

- Объем рынка: ~ 589,3 млрд. USD.
- Движение рынка: в среднем +7,3% в год.

Прогноз по состоянию рынка к 2028г.:

- Объем рынка: ~1440,1 млрд. USD.
- Движение рынка: в среднем + 1,8% в год.

Общая сумма контрактов, которые находятся в проработке у НПО "Сатурн" на период до 2023 года, составляет 153 млрд. рублей, из которых более 70% – это гособоронзаказы и заказы военно-технического сотрудничества.

За 2019 год совокупный объем капитальных вложений в НИОКР, оборудование, капитальное строительство и прочие направления составил 6,1 млрд. рублей, что обеспечило предприятию инвестиционную емкость (отношение инвестиций к выручке) на уровне 22,2%.

### **7.5 Анализ современного состояния и перспектив отрасли**

На сегодняшний день постоянное усложнение конструкций изделий авиа- и ракетостроения делает невозможным изготовление деталей традиционными методами, такими как литье и вторичная механическая обработка. Им на смену приходят аддитивные технологии, что позволяет получать изделия с необходимой внутренней структурой. Аддитивные технологии позволяют получать детали непосредственно из порошка, минуя или минимизируя промежуточные и подготовительные операции (разработка и изготовление литейной или штамповой оснастки). Одновременно можно выращивать сразу несколько деталей, количество и размер которых ограничиваются только габаритами рабочего пространства оборудования.

На сегодняшний день существуют и другие способы обработки поверхности титановых сплавов, но лишь немногие повышают коррозионную стойкость изделий:

- циклическая термообработка сплава;
- горячее изостатическое прессование;
- нанесение покрытий;
- механическая пескоструйная обработка и т. д.

Как уже говорилось выше, детали авиа- и ракетостроения, работающие в водородосодержащей среде, подвержены коррозии. Одним из способов решения данной проблемы и удешевления стоимости изделия в целом является технология улучшения свойств аддитивно изготовленных деталей путем модификации импульсным электронным пучком.

## 7.6 Расчет себестоимости продукта

В качестве объекта внедрения технологии рассмотрим процесс модификации импульсным электронным пучком лопатки газотурбинного двигателя самолета. Определим ежемесячный объем производства:

- Время изготовления изделия на 3D-принтере составляет 360 минут.
- Время обработки одного изделия составляет 60 минут.
- Длительность рабочего дня: 8 часов (480 минут), одна смена.
- Ежемесячный объем производства составит не менее 36 деталей в месяц.
- Количество рабочих дней в 2021 году: 247 дней.

Расчет себестоимости технологии «МИЭП» проведем, исходя из расходов на разрабатываемую технологию.

Используем следующую группировку по статьям затрат:

- материальные затраты;
- затраты на оборудование;
- заработная плата;
- накладные расходы.

### 7.6.1 Материальные затраты

Стоимость материальных затрат необходимых для обработки одной детали длиной 13 см и шириной 3 см приведены в таблице 6 (рисунок 29).

Таблица 6 – Стоимость материальных затрат

Наименование	Единица измерения	Количество	Цена за единицу, руб.	$Z_m$ , руб.
Титановый порошок	кг	3	2600	7800



Рисунок 29 – Лопатка газотурбинного двигателя самолета

### 7.6.2 Затраты на оборудование

Стоимость оборудования, используемого при обработке изделий, учитывается в виде амортизационных отчислений (рисунок 30) [43]. Затраты на используемое оборудование приведены в таблице 7.

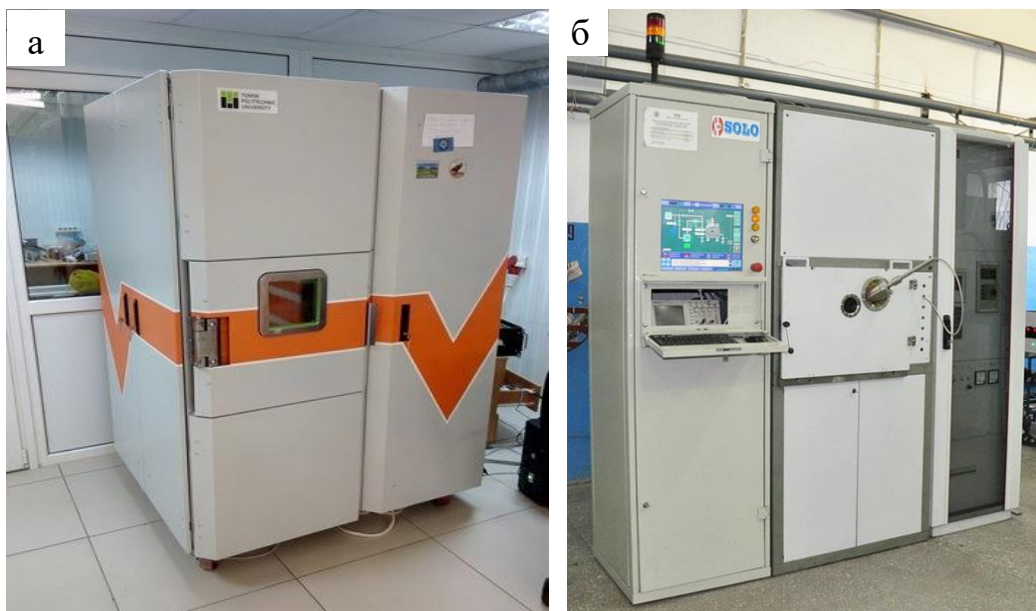


Рисунок 30 – Используемое оборудование: (а) установка электронно-лучевого сплавления; (б) вакуумная электронно-пучковая установка «СОЛО»

Амортизационные отчисления на оборудование, определяются по формуле:

$$A_{\text{в год}} = \frac{C}{T} \quad (1)$$

где C – стоимость единицы оборудования, млн. руб., T – срок эксплуатации, лет

Таблица 7 – Стоимость оборудования

№	Наименование оборудования	Кол-во	Цена ед., млн. руб.	T, лет	A <sub>в год</sub> млн. руб.	A <sub>в месяц</sub> млн. руб.
1	установка электронно-лучевого сплавления	1	80	20	4	0,33
2	вакуумная электронно-пучковая установка «СОЛО»	1	60	20	3	0,25
Итого амортизация в месяц						0,58

Исходя из таблицы 7 видно, что покупать оборудование невыгодно, поэтому предполагается аренда оборудования партнеров:

- ТПУ Научно-производственная лаборатория «Современные производственные технологии» (Установка электронно-лучевого сплавления) – 25 тыс. руб. в месяц;
- ИСЭ СО РАН (Установка «СОЛО») – 25 тыс. руб. в месяц.

### **7.6.3 Основная заработная плата научных сотрудников и техперсонала**

Затраты по дополнительной заработной плате работников учитывают величину предусмотренных Трудовым кодексом РФ доплат за отклонение от нормальных условий труда, а также выплат, связанных с обеспечением гарантий и компенсаций (при исполнении государственных и общественных обязанностей, при совмещении работы с обучением, при предоставлении

ежегодного оплачиваемого отпуска и т.д.) [44]. Расчет дополнительной заработной платы ведется по следующей формуле:

$$Z_{\text{доп.}} = K_{\text{доп.}} \cdot Z_{\text{осн.}} \quad (2)$$

где  $K_{\text{доп.}} = 0,15$  – коэффициент дополнительной заработной платы

Страховые взносы во внебюджетные фонды отражают обязательные отчисления по установленным законодательством Российской Федерации нормам органам государственного социального страхования (ФСС), пенсионного фонда (ПФ) и медицинского страхования (ФФОМС) от затрат на оплату труда работников. Величина страховых взносов во внебюджетные фонды определяется по формуле:

$$Z_{\text{внеб.}} = K_{\text{внеб.}} \cdot (Z_{\text{осн.}} + Z_{\text{доп.}}) \quad (3)$$

где  $K_{\text{внеб.}} = 30,2\%$  – Коэффициент страховых взносов во внебюджетные фонды.

Суммарные затраты на заработную плату научных сотрудников и техперсонала приведены в таблице 8.

Таблица 8 – Расчет основной заработной платы

	Научный сотрудник 1	Научный сотрудник 2	Техперсонал
Основная заработная плата (оклад), руб.	30000	30000	20000
Дополнительная заработная плата, руб.	4500	4500	3000
Коэффициент страховых взносов во внебюджетные фонды	30,2%		
Величина страховых взносов во внебюджетные фонды	10419	10419	6946
Итого, в месяц, руб.	44919	44919	29946
Итого, руб.	119784		

Накладные расходы ТПУ составляют 20% от затрат. Учитывая это, расчетная величина себестоимости обработки одного изделия приведена в таблице 9.

Таблица 9 – Себестоимость обработки изделий

Наименование статьи	Сумма, руб.
1. Материальные затраты	312000
2. Затраты на оборудование	50000
3. Затраты по заработной плате	119784
4. Итого:	481784
5. Накладные расходы (20%)	96356,8
Итого	578140,8

При условии обработки 36 изделий в месяц себестоимость обработки одного изделия составит 14453,52 руб.

### **7.7 Конкурентные преимущества продукта и обзор технико-экономических характеристик аналогов**

В процессе аддитивного производства обычно образуется неоднородная микроструктура. Интенсивная дегазация при 3D-печати может привести к появлению большого количества микропор и дефектов. Следовательно, необходима механическая и термическая постобработка деталей из титанового сплава, изготовленных методом ЭЛС. В области защиты металлов ведутся разработки по достижению надлежащих механических свойств и эксплуатационных характеристик изделий. Таким образом, процедуры постобработки для аддитивного производства выходят на первый план, некоторые из них представлены в таблице 10.



Таблица 10 – Существующие методы постобработки деталей из титановых сплавов и предлагаемая технология «МИЭП»

Методы обработки изделия	Краткое описание	Влияние на свойства изделий
предлагаемая технология «МИЭП»	образцы подвергаются обработке поверхности импульсным электронным пучком с плотностью энергии 25 Дж/см <sup>2</sup> , с количеством импульсов 3 и длительностью 50 мкс	<ul style="list-style-type: none"> <li>– повышается коррозионная стойкость титановых сплавов;</li> <li>– повышаются надежность и долговечность изделия;</li> <li>– улучшается контроль качества изделия;</li> <li>– возможность обработки деталей сложной формы;</li> <li>– снижается время производства изделия</li> </ul>
циклическая термообработка	β-отжиг циклической термообработки от 25 °С до 1000 °С в атмосфере Ar для повторного зарождения α и β фаз	<ul style="list-style-type: none"> <li>– резко уменьшается модуль упругости;</li> <li>– дает более высокие характеристики жаропрочности;</li> <li>– повышает значения твердости по Виккерсу</li> </ul>
горячее изостатическое прессование	при давлениях от 400 до 2070 бар и температуре 2000 °С теоретически можно достичь полного отсутствия пор	<ul style="list-style-type: none"> <li>– повышается пластичность, улучшается усталостная стойкость в два раза;</li> <li>– используется для удаления дефектов (нитридов, оксидов и карбидов), что улучшает обрабатываемость материала;</li> <li>– закрытие остаточной пористости и нерасплавленных поверхностей</li> </ul>
металлизация и нанесение оксидного покрытия	нанесение покрытий на заготовки из титанового сплава VT1-0 методом электронно-лучевой плавки смеси порошков карбида бора, титана и фтора	<ul style="list-style-type: none"> <li>– является износостойким покрытием в качестве поверхностного слоя титана VT1-0 или в ремонтных целях;</li> <li>– повышает микротвердость</li> </ul>
нанесение оксидных покрытий при различных приложенных напряжениях	покрытие состоит в основном из рутила и анатаза TiO <sub>2</sub> . На поверхности формируется оксидная пленка, полученная микродуговым оксидированием	<ul style="list-style-type: none"> <li>– резко увеличивается коэффициент трения для подложки Ti-6Al-4V с покрытием;</li> <li>– повышается коррозионная стойкость;</li> <li>– хорошая адгезия на границе раздела образец-пленка;</li> <li>– высокая твердость и хорошая износостойкость;</li> <li>– повышается стойкость к химической коррозии, износостойкость и термостойкость</li> </ul>
непрерывная обработка сканирующим электронным пучком	сфокусированный электронный пучок с пятном диаметром 0,5 мм обрабатывает поверхность образца линия за линией. Плотность энергии 450 Дж/см <sup>2</sup>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– увеличивают микротвердость поверхности</li> </ul>

В результате сравнительного анализа достижения прочностных свойств изделий с помощью различных технологий видим, что предлагаемая технология «МИЭП» имеет существенные конкурентные преимущества.

### 7.8 Бюджет проекта

Учитывая годовой объем производства в 480 деталей и закладываемую норму прибыли в 20% определим бюджет проекта (таблица 11).

Таблица 11 – Бюджет проекта

Наименование статьи	Сумма, руб.
Постоянные расходы в месяц (ФОТ + накладные расходы + аренда оборудования в месяц = 119784 руб. + 50000 руб.)	169784
Переменные издержки в месяц (закупка порошка = 7800 руб. · кол-во изделий, 40 шт.)	312000
Цена единицы изделия	15513,4
Выручка в месяц	620536
Прибыль в месяц	138752

Исходя из полученных данных, определим точку безубыточности как минимальное количество изделий, которое необходимо произвести в месяц, чтобы покрыть расходы по формуле [45]:

$$\text{Точка безубыточности} = \frac{\text{постоянные расходы}}{(\text{цена единицы товара} - \text{переменные на единицу товара}) - 20\%} \quad (4)$$

$$\text{Точка безубыточности} = \frac{169784}{(15513,4 - 7800) - 3102,68} = 36 \text{ деталей.}$$

$$\text{Точка безубыточности} = 15513,4 \cdot 36 = 558482,4 \text{ руб.}$$

### 7.9 Описание целевых сегментов потребителей

Основными целевыми сегментами нишевого рынка являются крупные машиностроительные компании. В таблице 12 представлены качественные характеристики аудитории B2B.

В авиационной промышленности – Компания Авиадвигатель, НПО «Сатурн», АО «ОДК», GE (General Electric), Boeing: детали турбин самолета, детали газотурбинных двигателей, рабочие и сопловые лопатки.

В космической промышленности – Росатом, Роскосмос, Ростех, НПО Энергомаш имени академика В. П. Глушко: внутренние/внешние детали для обшивки космических кораблей.

В судостроительной промышленности – Завод Полема, Новороссийский судоремонтный завод: судовые гребные винты.

В мелкосерийном производстве в области машиностроения и медицины – УралВагонЗавод: изготовление пресс-форм/заготовок.

Таблица 12 – Качественные характеристики аудитории B2B.

<b>Производственно-экономические критерии</b>	
Отрасль предприятия-потребителя:	Предприятия крупного бизнеса – авиационной, – космической, – судостроительной промышленности, – мелкосерийное производство в области машиностроения и медицины
<b>Критерии запроса</b>	
Можем ли обеспечить решение специфических проблем заказчика в области закупки	да
Формы взаимоотношений с поставщиком:	Долгосрочное сотрудничество
<b>Мотивация в сфере B2B</b>	
Периодичность покупки	Регулярно
Емкость рынка	Более 1000 изделий в год
Бизнес-мотив:	Экономия денег, времени, труда

### 7.10 Бизнес-модель проекта

Для понимания бизнес положения разрабатываемого продукта составим матрицу Остервальдера, отражающую как производственный план, так и план продаж, и саму бизнес модель в целом (таблица 13) [46].

Таблица 13 – Матрица Остервальдера

<p><i>Ключевые партнеры</i> Поставщики: ООО НОРМИН – Производство порошков титановых сплавов для аддитивных технологий</p> <p>Аренда оборудования у партнеров: ТПУ НПЛ “Современные производственные технологии” (Установка ЭЛС)+ИСЭ СО РАН (Установка «СОЛО»)</p>	<p><i>Ключевые виды деятельности</i> Сборочное производство. Решением проблем потребителя, касающихся коррозионных поражений деталей</p>	<p><i>Ценностные предложения</i> Экономическая значимость работы заключается в разработке технологии изготовления титановых сплавов с улучшенными физико-механическими и свойствами, работающими в водородсодержащей среде</p>	<p><i>Взаимоотношения с клиентами</i> Привлекаем клиентов через интернет-сообщества, относящихся к отраслям авиа- и ракетостроения, направленные на мелкосерийное производство сложных деталей. Личные рекомендации</p> <p><i>Канал сбыта</i> Выступления на конференциях 2. Участие в семинарах/выставках 3. Свой сайт 4. Интернет продвижение: дискуссионный маркетинг, e-mail реклама, экспертные продажи</p>	<p><i>Потребительские сегменты</i> B2B Нишевой рынок - Предприятия авиационной, космической и судостроительной промышленности, металлургии и машиностроения – Компания Авиадвигатель, НПО «Сатурн», Росатом, Роскосмос, Ростех, НПО Энергомаш имени академика В. П. Глушко, Завод Полема, Новороссийский судоремонтный завод, УралВагонЗавод</p>
<p><i>Структура издержек</i> Повысить коррозионную стойкость лопаток газотурбинных двигателей используемых в авиастроении, при этом стоимость изделия не должна превышать аналога, изготовленного литьем. Аренда оборудования Заработная плата рабочих Закупка порошка титанового сплава Накладные расходы</p>		<p><i>Потоки поступления доходов</i> Регулярный доход от периодических платежей, получаемых от предприятий – генерирование дополнительных доходов за счет продажи лицензии на выпуск продукции (при патентовании)</p>		

### 7.11 Стратегия продвижения продукта на рынок

Продвижение продукта возможно, если покупатель готов приобрести продукт, который ему действительно нужен. Основная цель данной стратегии –

показать потребителю, что предлагаемая технология «МИЭП» прошла все необходимые проверки и является результатом длительного исследования и проведения экспериментов. Выделим следующие способы продвижения продукта:

- Выставки образцов изделий при использовании предлагаемой технологии;
- Выступления на конференциях, относящихся к отраслям авиа- и ракетостроения, направленным на производство сложных деталей;
- Интернет продвижение: дискуссионный маркетинг, e-mail реклама, экспертные продажи, расширение партнерских связей.

Данные меры в той или иной степени оказывают влияние на объем продаж продукции, что позволит увеличить ее внедрение на рынок.

## **Выводы**

На данный момент технология аддитивного производства является единственным способом производства сложно-профильных деталей для авиа- и ракетно-космической отраслей - технология МИЭП гарантирует надёжность и долговечность за счет повышения коррозионной стойкости изделия. Стратегия выхода на рынок через Бизнес-модель – лаборатория при ТПУ позволяет показать преимущества технологии без рисков для предприятия. Технология позволяет в разы снизить время и финансовые затраты производства – предложена стратегия работы с клиентами. На примере турбинной лопатки приведён расчёт себестоимости обработки изделия на условиях аренды оборудования и организации работ в экспериментальной лаборатории ТПУ.

## 8 Социальная ответственность

### Введение

Для выполнения магистерской диссертации на тему «Модифицирование поверхности полученного с помощью аддитивной технологии титанового сплава Ti-6Al-4V» проводилась серия экспериментов с применением различных установок, помогающих решить поставленные задачи, следующего типа: оптический микроскоп МЕТАМ ЛВ, сканирующий электронный микроскоп Quanta 200 3D и другие.

Измерение микротвердости проводилось на твердомере Виккерса модели KB30 в отделении экспериментальной физики инженерной школы ядерных технологий. Данные измерения позволят установить закономерности изменения микротвердости образцов сплава Ti-6Al-4V, изготовленного с помощью аддитивных технологий, в зависимости от модифицирования поверхности. В связи с этим, детальное рассмотрение правил гигиены и безопасности труда при проведении работ на твердомере Виккерса необходимо при осуществлении экспериментальных исследований, входящих в магистерскую диссертацию. Данные исследования применимы в авиа- и ракетостроении, а также мелкосерийном производстве.

Рабочее место оператора твердомера позволяет человеку в полной мере осуществлять рабочие движения и перемещения при эксплуатации и техническом обслуживании оборудования. Прибор соответствует функциональным требованиям и предполагаемым условиям эксплуатации. На рабочем месте присутствует необходимое естественное и искусственное освещение. Основные органы управления размещены в оптимальном рабочем пространстве, где обеспечены наилучшие условия для ручного управления и контроля. Аварийные и ответственные органы управления размещены в оптимальной зоне досягаемости руки. Рабочее место оператора обеспечивает

оптимальные условия проявления психических и физиологических функций оператора, т. о. в таких условиях достигается максимальная эффективность, точность и надёжность деятельности при минимальных энергетических затратах.

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

### **8.1.1 Специальные правовые нормы трудового законодательства**

Основная работа заключалась в измерении микротвердости образцов. Установка является автоматической, управление происходит с помощью персонального компьютера (ПК). Исходя из этого, необходимо рассматривать эргономические требования для рабочего места оператора, рабочее место которого связана с управлением ЭВМ с помощью ПК.

К работе на твердомере Виккерса КВ30 допускаются лица, имеющие среднее или высшее техническое образование и квалифицированные в качестве поверителя по ГОСТ Р 56069-2014 «Требования к экспертам и специалистам. Поверитель средств измерений. Общие требования» в данной области измерений, обученные правилам техники безопасности и полностью изучившие руководство по эксплуатации (РЭ) твердомера. Работник допускается к самостоятельной работе после прохождения стажировки, проверки теоретических знаний и приобретенных навыков безопасных способов выполнения работы, и внесения соответствующих записей в журнал регистрации инструктажа по охране труда на рабочем месте [47].

По данной теме рассматриваются специальные законодательные и нормативные документы. Рабочее место должно быть организовано в соответствии с требованиями методических указаний по безопасности труда. На основании ГОСТ 12.2.032-78 ССБТ «Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования» были рассмотрены общие

эргономические требования к рабочим местам в положении сидя при работе на оборудовании. Из которого следует, что конструкция рабочего места и взаимное расположение всех его элементов должны соответствовать антропометрическим, физиологическим и психологическим требованиям.

### **8.1.2 Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны оператора**

Рабочее место спроектировано таким образом, чтобы способствовать достижению целей производственной системы, в том числе достижению оптимальной общей рабочей нагрузки на оператора [48]. Рабочее место с дисплеем обеспечивает оператору возможность удобного выполнения работ в положении сидя и не создает перегрузки костно-мышечной системы [49].

Основными элементами рабочего места оператора являются: рабочий стол, рабочий стул (кресло), дисплей, клавиатура [50]. Рабочий стул является подъемно-поворотным и регулируемым по высоте и углам наклона сиденья и спинки, а также расстоянию спинки от переднего края сиденья. Дисплей на рабочем месте оператора располагается так, чтобы изображение в любой его части было различимо без необходимости поднять или опустить голову.

## **8.2 Производственная безопасность**

В данном разделе был проведен анализ вредных и опасных факторов, которые могут возникнуть при проведении исследований в лаборатории. Для идентификации потенциальных факторов был использован ГОСТ 12.0.003-2015 «Опасные и вредные производственные факторы. Классификация» [51]. Перечень опасных и вредных факторов, характерных для проектируемой производственной среды представлены в таблице 14.



Таблица 14 – Возможные опасные и вредные факторы

Факторы (ГОСТ 12.0.003-2015)	Этапы работ			Нормативные Документы
	Разработка	Изготовление	Эксплуатация	
1. Недостаточная освещенность рабочего места	+	-	-	Требования к освещению устанавливаются СНиП 23-05-95* Естественное и искусственное освещение
2. Повышенная или пониженная температура рабочей зоны	-	-	+	Требования к микроклимату устанавливаются согласно СанПиН 2.2.4.548-96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений.
3. Воздействие раздражающих химических веществ на органы дыхания и кожные покровы человека	-	-	+	Требования к химическим веществам, воздействующим на организм человека устанавливаются ГН 2.2.5.3532-18. Предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ в воздухе рабочей зоны.
4. Перенапряжение анализаторов, вызванное информационной нагрузкой	-	+	-	СП 2.4.3648-20 "Санитарно-эпидемиологические требования к организациям воспитания и обучения, отдыха и оздоровления детей и молодежи".
5. Монотонность работы	+	-	-	ГОСТ 12.0.002-2014 Система стандартов безопасности труда. Термины и определения.
5. Электрический ток, вызываемый разницей электрических потенциалов, под действие которого попадает работающий	-	-	+	ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов.

## **8.3 Анализ вредных и опасных факторов, которые могут возникнуть в лаборатории при проведении исследований**

### **8.3.1 Анализ вредных факторов**

#### **8.3.1.1 Недостаточная освещенность рабочего места**

Недостаточное освещение низкого качества способствует утомляемости зрения, что способствует его снижению. Источниками вредного фактора воздействия могут служить недостаточное количество естественного освещения; слишком интенсивное или недостаточное искусственное освещение. На рабочей поверхности необходимо отсутствие резких теней, наличие которых создаёт неравномерно освещенные рабочие поверхности и способствует искажению размеров и форм объектов различия.

Учитывая особенности процесса работы на твердомере Вика (характеристика зрительной работы IV средней точности при норме наименьшего размера объекта различения от 0,5 до 1) возможно применение схемы общего равномерного освещения [52]. Согласно нормам освещённости на рабочих местах производственных помещений при искусственном освещении в лаборатории требуется создать освещенность  $E=200$  лк [53].

Недавно побеленные стены с окнами обладают коэффициентом отражения, без штор  $\rho_c=50\%$ , для недавно побеленного потолка  $\rho_{\Pi}=70\%$ .  $K_z$  – коэффициент запаса, учитывающий загрязнение светильника (источника света, светотехнической арматуры, стен и прочее, т.е. отражающих поверхностей), наличие в атмосфере цеха дыма, пыли,  $K_z=1,5$  (помещения с малым выделением пыли);  $Z$  – коэффициент неравномерности освещения. Для люминесцентных ламп при расчётах берётся равным 1,1.

Рассчитываем систему общего люминесцентного освещения. Рабочая зона находится в лаборатории с размерами: длина помещения  $A=5,3$  м, ширина  $B = 4,7$  м, высота  $H=3$  м. Высота рабочей поверхности над полом  $h_{pn}=0,65$  м. В

данной рабочей зоне размещены лампы белого света ЛБ, со световым потоком  $\Phi_{\text{ЛБ}}=2800$  Лм. Светильники длиной 1227 мм, шириной – 265 мм и высотой 155 мм имеют две люминесцентные лампы типа ОДОР-2-40, мощностью 40 Вт.

Расстояние светильников от перекрытия  $h_c=0,3$  м.

Высота подвеса  $h_n = H - h_c = 3 - 0,3 = 2,7$  м.

Высота рабочей поверхности над полом  $h_{pn}=0,65$  м.

Расчетная высота  $h = h_n - h_{pn} = 2,05$  м.

Площадь помещения:  $S = A \times B = 24,91$  м<sup>2</sup>.

Расстояние между соседними светильниками определяют по формуле:

$$L = \lambda \cdot h = 1,1 \cdot 2,05 = 2,255 \text{ м} \quad (5)$$

Оптимальное расстояние  $l$  от крайнего ряда светильников до стены рассчитывается по формуле (6). В данном случае светильники расположены по сторонам квадрата.

$$l = \frac{L}{3} = \frac{2,255}{3} = 0,752 \text{ м} \quad (6)$$

Количество рядов светильников с люминесцентными лампами определяется по формуле:

$$n_{\text{ряд}} = \frac{(B - \frac{2}{3}L)}{L} + 1 = \frac{(4,7 - \frac{2}{3} \cdot 2,255)}{2,255} + 1 \approx 2 \quad (7)$$

где  $n_{\text{ряд}}$  – количество рядов;  $B$  – ширина помещения, м;  $L$  – расстояние между рядами светильников, м. Количество светильников в ряду определяется по формуле:

$$n_{\text{св}} = \frac{(A - \frac{2}{3}L)}{l_{\text{св}} + 0,5} = \frac{(5,3 - \frac{2}{3} \cdot 2,255)}{1,227 + 0,5} \approx 2 \quad (8)$$

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

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

$$N = n_{\text{ряд}} \cdot n_{\text{св}} = 4 \quad (9)$$

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

Размещаем светильники в 2 ряда. В каждом ряду можно установить 2 светильников типа ОДОР мощностью 40 Вт (с длиной 1,227 м), при этом разрывы между светильниками в ряду составят 1,342 м. Изображаем в масштабе план помещения и размещения на нем светильников (рисунок 31). Учитывая, что в каждом светильнике установлено две лампы, общее число ламп в помещении  $N = 8$ .

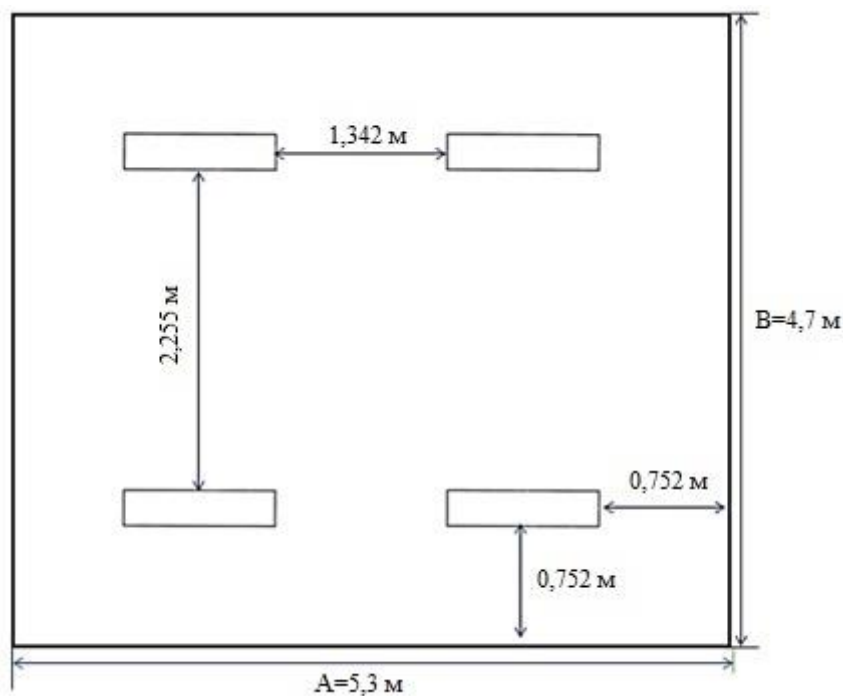


Рисунок 31 – План помещения и размещения светильников с люминесцентными лампами

Находим индекс помещения по формуле:

$$i = \frac{S}{h(A+B)} = \frac{24,91}{2,05 \cdot (5,3+4,7)} = 1,2 \quad (10)$$

Коэффициент использования светового потока показывает, какая часть светового потока ламп попадает на рабочую поверхность.

Для светильников типа ОДОР с люминесцентными лампами при  $\rho_{\Pi}=70\%$ ,  $\rho_{\text{С}}=50\%$  и индексе помещения  $i=1,2$  коэффициент использования светового потока равен:

$$\eta=0,37\%.$$

Потребный световой поток ламп в каждом из рядов рассчитывается по формуле:

$$\Phi = \frac{E_{\text{н}}SK_3Z}{N_{\text{л}} \cdot \eta} = \frac{200 \cdot 24,91 \cdot 1,5 \cdot 1,1}{8 \cdot 0,37} = 2777 \text{ Лм} \quad (11)$$

где  $E_{\text{н}}$  – нормируемая минимальная освещённость по СНиП 23-05-95 (наименьший размер объекта 1 мм);  $S$ –площадь освещаемого помещения,  $\text{м}^2$ ;  $K_3$  – коэффициент запаса, учитывающий загрязнение светильника;  $Z$  – коэффициент неравномерности освещения.;  $N$  – число ламп в помещении,  $n$  – коэффициент использования светового потока.

Делаем проверку выполнения условия:

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

$$\frac{\Phi_{\text{л.станд}} - \Phi_{\text{л.расч}}}{\Phi_{\text{л.станд}}} \cdot 100\% = \frac{2800 - 2777}{2800} \cdot 100\% = 0,8\%.$$

Таким образом:  $-10\% \leq 0,8\% \leq +20\%$ , необходимый световой поток светильника не выходит за пределы требуемого диапазона.

Определяем электрическую мощность осветительной установки

$$P = 8 \cdot 40 = 320\text{Вт}.$$

### **8.3.1.2 Пониженная или повышенная температура воздуха рабочей зоны**

Неблагоприятное сочетание параметров микроклимата может вызвать перенапряжение механизмов терморегуляции, перегрев или переохлаждение организма. Санитарными нормами микроклимата производственных помещений СанПин 2.2.4.548-96 «Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений» установлены оптимальные и допустимые

нормы температуры, относительной влажности и скорости движения воздуха с учетом тяжести выполняемой работы и периодов года для категории 1а легких работ (таблица 15). К таковым относятся работы, которые выполняются сидя и не требующие высокого физического напряжения.

Таблица 15 – Оптимальные показатели микроклимата на рабочем месте производственных помещений

Период года	Температура воздуха, °С	Относительная влажность воздуха, ф%	Скорость движения воздуха, м/с, не более
Холодный	22–24	40-60	0,1
Теплый	23–25		0,1

К мероприятиям по оздоровлению воздушной среды в производственном помещении относятся: правильная организация вентиляции и кондиционирования воздуха, отопление помещений [54]. Вентиляция может осуществляться естественным и механическим путём. 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 – от 20 до 25 °С, зимой – от 13 до 15 °С. В лаборатории осуществляется естественная вентиляция. Воздух поступает и удаляется через щели, окна, двери.

### **8.3.1.3 Воздействие раздражающих химических веществ на органы дыхания и кожные покровы человека**

Вредными являются вещества, которые при контакте с организмом могут вызвать производственные травмы, профессиональные заболевания или

отклонения в состоянии здоровья. При выполнении исследовательской работы, в лаборатории используется реактив для травления образцов, в состав которого входит  $1,5\text{HF}-3\text{HNO}_3-50\text{мл H}_2\text{O}$ , который является едким веществом, по степени воздействия на организм человека относится к веществам третьего класса опасности [55]. При травлении образцов реактив может попасть на кожу, что может привести к ожогу, а так же пары реактива могут попасть на слизистые глаз и носоглотки (при дыхании незащищенном маской), что может вызвать местные покраснения и раздражение. Травление проводилось раствором на специально оборудованном рабочем месте, после чего образцы промывались дистиллированной водой и протирались этиловым спиртом.

В качестве защиты от вредного воздействия вещества рабочим выдаются средства индивидуальной защиты: стерильные диагностические латексные перчатки, маска для лица (медицинская одноразовая трехслойная). Первая помощь – при попадании раствора для травления образцов в глаза их промывают проточной водой в течение (10–30) мин.; при попадании на кожу пораженную поверхность обмывают водой с мылом.

#### **8.3.1.4 Перенапряжение анализаторов, вызванное информационной нагрузкой**

Работа на ПК сопровождается постоянным и значительным напряжением функций зрительного анализатора. Т. о. длительное пребывание за компьютером может привести к перенапряжению зрительной системы: пелена перед глазами, воспаление и покраснение глаз, а также повышенная слезоточивость и чувствительность к яркому свету и т. д [56].

Чтобы не допустить возникновения подобных симптомов необходимо правильно организовать свое рабочее место. Оно должно быть хорошо и равномерно освещено, лучше сидеть к окну боком. Также на окне должны быть жалюзи, чтобы контролировать интенсивность освещения, т. к. при слишком ярком свете глаза устают быстрее [57].

Рекомендуется работать за качественным плазменным монитором с большой диагональю с частотой мерцания от 60 до 100 Гц. Необходимо настроить под себя яркость и контрастность изображения ПК, отрегулировать монитор под рабочую позу: центр монитора должен быть на (10–20) см ниже глаз работника. Расстояние до экрана от глаз должно составлять не менее 60 см. Необходимо делать паузы во время работы каждые 20 минут. Рекомендуется использовать специальные очки для работы за компьютером, они блокируют синий спектр излучения, источником которого является монитор, и позволяют снизить нагрузку на глаза.

### **8.3.1.5 Монотонность работы**

При подготовке шлифов рабочий выполняет монотонную работу, связанную с однообразным набором последовательных действий, которые могут вызвать возникновение переутомляемости. Монотонный труд – это свойство некоторых видов труда, требующих от человека длительного выполнения однообразных действий. Монотония – особый вид функционального состояния организма человека, развивающегося в процессе монотонной работы. Основными показателями монотонного труда являются:

- структурное однообразие, простота рабочих операций;
- высокая степень повторяемости;
- строго определенный регламент действий;
- ограниченное пространство рабочих действий;

Монотонность труда сопровождается у многих людей рядом неприятных субъективных ощущений. Субъективные ощущения проявляются в падении интереса к выполняемой работе, невнимательности, сонливости, чувстве усталости и т.п.

При разработке мер профилактики развития состояния монотонии необходимо учитывать основные психофизиологические явления, возникающие



в организме работающих в условиях монотонного труда и во многом определяющие его отрицательные последствия [58].

Поэтому разрабатываемые мероприятия должны быть направлены на:

- совершенствование технологических процессов с целью уменьшения влияния монотонности труда;
- обеспечение оптимальной информационной и двигательной нагрузок;
- увеличение эмоционального тонуса и мотивации.

Все это достигается как оптимизацией содержания и условий трудовой деятельности, так и непосредственным воздействием на функциональное состояние организма человека комплекса технологических, организационно-технических и психофизиологических мер. Среди них важнейшее значение имеют:

- автоматизация и механизация однообразных ручных работ;
- совершенствование технологии, оптимизация содержания труда;
- совершенствование организации трудовой деятельности;

Данные профилактические мероприятия позволят снизить утомление и субъективные ощущения монотонности, повысят работоспособность и производительность труда [59].

## **8.3.2 Анализ опасных факторов**

### **8.3.2.1 Электрический ток, вызываемый разницей электрических потенциалов, под действие которого попадает работающий**

Источниками поражения электрическим током являются неисправное электрооборудование в лаборатории и несоблюдение правил техники безопасности при работе с электрооборудованием. Степень воздействия электрического тока на организм человека определяется напряжением и силой тока, способом прохождения тока по телу, общим состоянием здоровья пострадавшего и тем насколько своевременно была оказана первая помощь.

Безопасной для человека является величина переменного тока – 10мА, постоянного – 50мА, безопасное напряжение 12В [60]. Электротравма опасна прежде всего воздействием тока на сердечнососудистую систему. Напряжение от 36 вольт и выше вполне способно вызвать остановку сердца или дыхания, однако убивает не напряжение, а сила тока. Рабочее помещение по опасности относится к 1 группе, т.е. без повышенной опасности (сухое, хорошо отапливаемое, помещение с токонепроводящими полами, с температурой от 18 до 20 °С, с влажностью от 40 до 50%).

Категория персонала – I (не электротехнический персонал), т.е. это люди, прошедшие только первичный инструктаж. Рабочее место удовлетворяет всем требованиям безопасности жизнедеятельности: нет доступа к токоведущим частям, все источники питания пронумерованы, корпуса компьютеров заземлены.

#### **8.4 Экологическая безопасность**

Охрана окружающей среды представляет собой комплекс мер, направленный на ограничение негативного воздействия человеческой деятельности на природу. Одним из таких факторов является неподобающая утилизация люминесцентных ламп, используемых в системе освещения рабочего помещения. Люминесцентные лампы содержат от 3 до 5 мг ртути и относятся к 1 классу токсичных отходов. [61]. Следовательно, такого типа лампы требуют особые условия хранения, эксплуатации и утилизации. ООО Научно-производственное предприятие «ЭКОТОМ» осуществляет бесплатные сборы, обезвреживание и транспортировку опасных отходов отработанных люминесцентных ламп.

При производстве неконцентрированной азотной кислоты методом прямого синтеза оксиды азота в отходящих газах очищаются до санитарных норм каталитическими методами очистки. Предельно допустимая концентрация паров азотной кислоты в атмосферном воздухе не должна

превышать  $0,3 \text{ мг/м}^3$  (максимально разовая) и  $0,1 \text{ мг/м}^3$  (среднесуточная), что соответствует второму классу опасности.

Защита окружающей среды должна быть обеспечена герметизацией технологического оборудования, устройством вытяжной вентиляционной системы, очистными сооружениями в местах возможного поступления в окружающую среду аэрозоля азотной кислоты [62]. Охрана атмосферного воздуха при производстве азотной кислоты должна осуществляться согласно ГОСТ 17.2.3.02-2014 «Правила установления допустимых выбросов загрязняющих веществ промышленными предприятиями». Не следует допускать попадания азотной кислоты в канализацию, водоемы и почву. Места разлива данной кислоты должны быть обвалованы и нейтрализованы известью или содой, продукты нейтрализации должны быть отправлены на утилизацию.

## **8.5 Безопасность в чрезвычайных ситуациях**

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

Одним из наиболее распространенных и опасных видов техногенных ЧС является пожар. Пожаром называется неконтролируемое горение вне специального очага. Пожары причиняют значительный материальный ущерб, в ряде случаев вызывают тяжелые травмы и гибель людей. основополагающими законодательными актами в области пожарной безопасности являются Федеральные законы "О пожарной безопасности" и "Технический регламент о требованиях пожарной безопасности", определяющие общие правовые, экономические и социальные основы обеспечения пожарной безопасности в Российской Федерации.

Технический регламент о требованиях пожарной безопасности регламентирует классификацию зданий по степени огнестойкости, конструктивной и функциональной пожарной опасности. По пожарной

опасности помещение и здание относится к классу Д, т.е. к помещениям, в которых находятся (обращаются) негорючие вещества и материалы в холодном состоянии.

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

Возникновение пожара при работе с электронной аппаратурой может быть по причинам как электрического, так и неэлектрического характера. 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 [63]:

- использование только исправного оборудования;
- проведение периодических инструктажей по пожарной безопасности;
- отключение электрооборудования, освещения и электропитания при предполагаемом отсутствии обслуживающего персонала или по окончании работ;
- содержание путей и проходов для эвакуации людей в свободном состоянии.

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

В здании существуют пожарные краны. В качестве первичных средств пожаротушения используются углекислотные огнетушители ОУ-5. Преимущества углекислотных огнетушителей: эффективность тушения жидких

и газообразных веществ и электроустановок под напряжением до 1000 В; отсутствие следов тушения; диапазон рабочих температур от  $-40^{\circ}\text{C}$  до  $+50^{\circ}\text{C}$ .

При возникновении возгорания необходимо немедленно прекратить работу, отключить электрооборудование, позвонить в подразделение пожарной охраны по телефону 01 или 010, сообщить о случившемся руководителю подразделения и приступить к тушению огня первичными средствами пожаротушения. План эвакуации из рассматриваемой лаборатории, изображен на рисунке 32.



Рисунок 32 – План эвакуации при пожаре и других ЧС из помещений учебного корпуса № 3

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.

## **Выводы**

В данном разделе были рассмотрены и проанализированы опасные и вредные факторы, которые могут оказывать воздействие на работающих исследовательской лаборатории, а также средства защиты от этих факторов. При выполнении исследовательской работы в лаборатории существует вероятность воздействия таких вредных и опасных производственных факторов, как недостаточная освещенность рабочего места, контакт человека с реактивом для травления образцов, отклонение показателей микроклимата, а также воздействие электрического тока. В результате анализа были предложены решения, обеспечивающие снижение влияния выявленных опасных и вредных факторов на исследователя. Даны рекомендации по обеспечению оптимальных условий труда и охране окружающей среды.

Кроме того, был произведен анализ наиболее вероятной чрезвычайной ситуации, которая может возникнуть в ходе исследования, а именно пожар, а также предложены меры для его предотвращения.

## ВЫВОДЫ

Методом сканирующей электронной микроскопии было установлено, что модификация поверхности сплава Ti-6Al-4V импульсным электронным пучком с плотностью энергии  $25 \text{ Дж/см}^2$  приводит к существенному изменению микроструктуры образцов. Микроструктура исходного образца представлена пластинчатой структурой со средней толщиной  $\alpha$ -пластин  $(0,41 \pm 0,12)$  мкм. Методом РСА было установлено, что в поверхностном слое титанового сплава после обработки ИЭП формируются крупные зерна  $\alpha$ -фазы со средним размером  $(18 \pm 3)$  мкм, внутри которых наблюдаются мартенситные пластины  $\alpha'$ -фазы титана. Также в образцах после модифицирования ИЭП отсутствует  $\beta$ -фаза титана, что связано с перенасыщением твердого раствора легирующими элементами.

В работе исследовано влияние импульсного электронного пучка на твердость сплава Ti-6Al-4V, изготовленного с помощью аддитивной технологии. Согласно проведенным измерениям, после модифицирования ИЭП происходит уменьшение нанотвердости образцов на 19%. Это обусловлено увеличением среднего размера зерен после модифицирования импульсным электронным пучком.

Наводороживание образца, обработанного ИЭП до концентрации 0,3 масс.%, привело к увеличению доли  $\beta$ -фазы титана до 33,1 об.%. Это связано с фазовым превращением  $\alpha_{\text{H}} \rightarrow \beta_{\text{H}}$ , т. к. в результате наводороживания происходит стабилизации  $\beta$ -фазы водородом. Также гидрирование образцов Ti-6Al-4V, обработанных ИЭП, привело к незначительному увеличению нанотвердости. Модифицирование импульсным электронным пучком приводит к снижению сорбции водорода на 43% по сравнению с образцами сплава Ti-6Al-4V, изготовленными методом электронно-лучевого сплавления.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Razavi S. M. J. et al. Fatigue behavior of porous Ti-6Al-4V made by laser-engineered net shaping // *Materials*. – 2018. – Vol. 11, No. 2. – P. 284.
- 2 Saboori A. et al. An overview of additive manufacturing of titanium components by directed energy deposition: microstructure and mechanical properties // *Applied Sciences*. – 2017. – Vol. 7, No. 9. – P. 883.
- 3 Kannan G. B., Rajendran D. K. A review on status of research in metal additive manufacturing // *Advances in 3D printing & additive manufacturing technologies*. – Springer, Singapore, 2017. – P. 95–100.
- 4 Huang R. et al. Energy and emissions saving potential of additive manufacturing: the case of lightweight aircraft components // *Journal of Cleaner Production*. – 2016. – Vol. 135. – P. 1559–1570.
- 5 Pushilina N. et al. Influence of manufacturing parameters on microstructure and hydrogen sorption behavior of electron beam melted titanium Ti-6Al-4V alloy // *Materials*. – 2018. – Vol. 11, No. 5. – P. 763.
- 6 Kirchner A. et al. Mechanical properties of Ti-6Al-4V additively manufactured by electron beam melting // *Proceedings of the European Powder Metallurgy Association 2015 Congress & Exhibition, Reims, France*. – 2015. – P. 4–7.
- 7 Сомонов В. В. Прямое лазерное выращивание из титановых сплавов: сравнение методов получения изделий из порошка и проволоки // *Технические науки: проблемы и перспективы*. – 2018. – С. 44–50.
- 8 Bikas H., Stavropoulos P., Chryssolouris G. Additive manufacturing methods and modelling approaches: a critical review // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2016. – Vol. 83, No. 1–4. – P. 389–405.
- 9 Кубанова А. Н. и др. Особенности материалов и технологий аддитивного производства изделий // *Чебышевский сборник*. – 2019. – Т. 20, №. 3. – 71 с.



10 Seifi M. et al. Evaluation of orientation dependence of fracture toughness and fatigue crack propagation behavior of as-deposited Arcam EBM Ti-6Al-4V // *Jom*. – 2015. – Vol. 67, No. 3. – P. 597–607.

11 Körner C. Additive manufacturing of metallic components by selective electron beam melting—a review // *International Materials Reviews*. – 2016. – Vol. 61, No. 5. – P. 361–377.

12 Зорин В. А., Полухин Е. В. Аддитивные технологии // *СТТ: Строительная техника и технологии*. – 2016. – №. 3. – С. 54–57.

13 Popovich A. et al. Microstructure and mechanical properties of Ti-6Al-4V manufactured by SLM // *Key Engineering Materials*. – Trans Tech Publications Ltd, 2015. – Vol. 651. – P. 677–682.

14 O'Leary R. et al. An investigation into the recycling of Ti-6Al-4V powder used within SLM to improve sustainability // *InImpact: The Journal of Innovation Impact*. – 2016. – Vol. 8, No. 2. – P. 377.

15 Liu S., Shin Y. C. Simulation and experimental studies on microstructure evolution of resolidified dendritic TiC<sub>x</sub> in laser direct deposited Ti-TiC composite // *Materials & Design*. – 2018. – Vol. 159. – P. 212–223.

16 Савченко Н. Л. и др. Особенности структурно-фазового состояния сплава Ti-6Al-4V при формировании изделий с использованием электронно-лучевой проволочной аддитивной технологии // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2018. – Т. 20, №. 4. – С. 60–71.

17 Murr L. E. et al. Microstructures and mechanical properties of electron beam-rapid manufactured Ti-6Al-4V biomedical prototypes compared to wrought Ti-6Al-4V // *Materials characterization*. – 2009. – Vol. 60, No. 2. – P. 96–105.

18 Мальцева Л. А. *Материаловедение: учебное пособие* / Л. А. Мальцева, М. А. Гервасьев. – 3-е изд. перераб. и дополн. – Екатеринбург: УрФУ, 2012. – 344 с.

19 Attar H. et al. Manufacture by selective laser melting and mechanical behavior of commercially pure titanium // *Materials Science and Engineering: A*. – 2014. – Vol. 593. – P. 170–177.

20 Zhao X. et al. Comparison of the microstructures and mechanical properties of Ti-6Al-4V fabricated by selective laser melting and electron beam melting // *Materials & Design*. – 2016. – Vol. 95. – P. 21–31.

21 Cain V. et al. Crack propagation and fracture toughness of Ti-6Al-4V alloy produced by selective laser melting // *Additive Manufacturing*. – 2015. – Vol. 5. – P. 68–76.

22 Liu S., Shin Y. C. Additive manufacturing of Ti-6Al-4V alloy: A review // *Materials & Design*. – 2019. – Vol. 164. – P. 107–552.

23 Li P. et al. Critical assessment of the fatigue performance of additively manufactured Ti-6Al-4V and perspective for future research // *International Journal of Fatigue*. – 2016. – Vol. 85. – P. 130–143.

24 Chastand V. et al. Comparative study of fatigue properties of Ti-6Al-4V specimens built by electron beam melting (EBM) and selective laser melting (SLM) // *Materials Characterization*. – 2018. – Vol. 143. – P. 76–81.

25 Karlsson J. et al. Characterization and comparison of materials produced by Electron Beam Melting (EBM) of two different Ti-6Al-4V powder fractions // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2013. – Vol. 213, No. 12. – P. 2109–2118.

26 Fousova M. et al. Influence of inherent surface and internal defects on mechanical properties of additively manufactured Ti6Al4V alloy: Comparison between selective laser melting and electron beam melting // *Materials*. – 2018. – Vol. 11, No. 4. – P. 537.

27 Laptev R., Kudiiarov V., Pushilina N. Hydrogen influence on defect structure and mechanical properties of EBM Ti-6Al-4V // *Materials Today: Proceedings*. – 2019. – Vol. 19. – P. 2084–2088.

28 Zong Y., Wu K. Thermo hydrogen treatment for microstructure refinement and mechanical properties improvement of Ti-6Al-4V alloy // *Materials Science and Engineering: A*. – 2017. – Vol. 703. – P. 430–437.

- 29 Pushilina N. et al. Hydrogen-induced phase transformation and microstructure evolution for Ti-6Al-4V parts produced by electron beam melting // *Metals*. – 2018. – Vol. 8, No. 5. – P. 301.
- 30 Hirohata Y. et al. Evaluation of hydrogen sorption and desorption for Ti-6Al-4V alloy as a vacuum vessel material // *Fusion Technology* 1996. – Elsevier, 1997. – P. 363–366.
- 31 Shen C. C., Wang C. M. Effects of hydrogen loading and type of titanium hydride on grain refinement and mechanical properties of Ti-6Al-4V // *Journal of alloys and compounds*. – 2014. – Vol. 601. – P. 274–279.
- 32 Pokhmurskii V. I. et al. Effects of hydrogen exposure on the mechanical and tribological properties of  $\alpha$ -titanium surfaces // *Wear*. – 2013. – Vol. 306, No. 1–2. – P. 47–50.
- 33 Lozhkina E. A., Chuchkova L. V., Belov A. S. Formation of Coatings on Titanium Alloys by Melting with a Beam of Relativistic Electrons // *Metal Science and Heat Treatment*. – 2019. – Vol. 60, No. 9–10. – P. 645–650.
- 34 Gong X. et al. Building direction dependence of corrosion resistance property of Ti-6Al-4V alloy fabricated by electron beam melting // *Corrosion Science*. – 2017. – Vol. 127. – P. 101–109.
- 35 Rubino F. et al. Microstructure and surface analysis of friction stir processed Ti-6Al-4V plates manufactured by electron beam melting // *Journal of Manufacturing Processes*. – 2019. – Vol. 37. – P. 392–401.
- 36 Xin Y. et al. Corrosion and wear properties of micro-arc oxidation treated Ti-6Al-4V alloy prepared by selective electron beam melting // *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. – 2020. – Vol. 30, No. 8. – P. 2132–2142.
- 37 Koshuro V., Fomin A., Rodionov I. Composition, structure and mechanical properties of metal oxide coatings produced on titanium using plasma spraying and modified by micro-arc oxidation // *Ceramics International*. – 2018. – Vol. 44, No. 11. – P. 12593–12599.

38 Panin A. et al. Surface modification of 3D-printed Ti-6Al-4V parts by continuous electron beam // AIP Conference Proceedings. – AIP Publishing, 2018. – Vol. 2051, No. 1. – P. 25.

39 Панин А. В. и др. Изменение структуры поверхностных слоев технического титана в процессе обработки низкоэнергетическими сильноточными электронными пучками // Физика металлов и металловедение. – 2016. – Т. 117, №. 6. – С. 571–571.

40 Panin A. V. et al. The effect of electron beam treatment on hydrogen sorption ability of commercially pure titanium // Applied surface science. – 2013. – Vol. 284. – P. 750–756.

41 ASTM A. F2924-Standard Specification for Additive Manufacturing Titanium-6 Aluminum-4 Vanadium with Powder Bed Fusion // ASTM: West Conshohocken, PA, USA. – 2014.

42 Николаева А. В. Исследование образцов из титанового сплава Ti-6Al-4V, полученных методом электронно-лучевого сплавления // Перспективы развития фундаментальных наук: сборник научных трудов XVII Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, г. Томск, 21–24 апреля 2020 г. Т. 1: Физика.– Томск, 2020. – Изд-во ТУСУР, 2020. – Т. 1. – С. 146–148.

43 Милорадов К. А., Эйдлина Г. М. Онлайн сервис бизнес-планирования в экономическом образовании // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2013. – №. 4. – С. 110–111.

44 Роженцев С. В., Числов А. И. Предпринимательская деятельность: понятие и сущность // Правовое поле современной экономики. – 2012. – №. 11. – С. 75–85.

45 Баева В. Д., Абазов А. Х., Игнатова В. В. Особенности методов и алгоритма расчета точки безубыточности в различных бизнес-моделях // Актуальные вопросы управления и экономики: тенденции и перспективы. – 2018. – С. 112–124.

46 Джаппарова Н. Л. Стартап, как форма инновационного предпринимательства // Скиф. Вопросы студенческой науки. – 2019. – №. 11. – С. 585–588.

47 ГОСТ 9450-76 (СТ СЭВ 1195-78) измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников.

48 ГОСТ Р ИСО 6385-2016 Эргономика. Применение эргономических принципов при проектировании производственных систем.

49 ГОСТ Р 50923-96 Общие эргономические требования и требования к производственной среде. Методы измерения.

50 ГОСТ 21889-76 Система "Человек-машина". Кресло человека-оператора.

51 СП 2.4.3648-20 «Санитарно-эпидемиологические требования к организациям воспитания и обучения, отдыха и оздоровления детей и молодежи».

52 Абдиев К. И., Абдурасулов А. И. Освещенность рабочего места инженера // Известия ВУЗов. – 2011. – №. 5. – С. 32–34.

53 СП 52.13330.2011 «Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95\*».

54 Томакова И. А., Томаков М. В. Организационный микроклимат как фактор, влияющий на безопасность труда // Актуальные проблемы социально-гуманитарного и научно-технического знания. – 2016. – №. 1. – С. 18–22.

55 ГН 2.2.5.3532-18 «Предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ в воздухе рабочей зоны».

56 Куклев В. А., Герасимова Э. Б. Программно-информационное обеспечение оценки условий труда в дисциплине «Безопасность жизнедеятельности» // Электронное обучение в непрерывном образовании. – 2016. – №. 1. – С. 1120–1125.

57 Кучеренко С. В., Кучеренко Н. В. Оценка безопасности и экологичности при работе с пэвм в условиях типового офиса // Наука,

образование, производство в решении экологических проблем. – 2020. – С. 32–37.

58 ГОСТ 12.0.002-2014 Система стандартов безопасности труда. Термины и определения.

59 Алексеева М. А., Донцов С. А., Козлов А. С. Современные способы обеспечения безопасности и сохранения здоровья работникам // Проблемы безопасности российского общества. – 2017. – №. 2. – С. 9–11.

60 ГОСТ 12.1.019-2017 ССБТ. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты.

61 Ишембитова Г. Г. Экономико-правовые меры стимулирования рационального природопользования и охраны окружающей среды // Сибирское юридическое обозрение. – 2019. – Т. 16, №. 3. – 24 с.

62 Кирилловых А. А. Экологическая безопасность и охрана окружающей среды: проблемы стратегического планирования и правового обеспечения // Право и экономика. – 2018. – №. 1. – С. 72–78.

63 Федеральный закон Российской Федерации от 22 июля 2008 г. N 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности».

## Приложение А

### Глава 1

#### The main technologies for building products in additive manufacturing

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
ОБМ91	Николаева Александра Владимировна		

Консультант – лингвист отделения (НОЦ) школы ОИЯ ШБИП:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОИЯ ШБИП	Зяблова Н.Н.	канд. филол. наук		

# 1 The main technologies for building products in additive manufacturing

Additive methods for constructing products of titanium alloys are classified by the method of applying layers to create parts, by the type and shape of the material used. The material used can be in the form of wire or powder. Methods of additive production using powder are classified according to the method of powder feed to the zone of interaction with the heating source. This can be either a "layer-by-layer" production or a "direct" production method. For additive manufacturing (AM) of products from titanium alloys, heat sources such as laser beam, electron beam, electric or plasma arc are used [7].

## 1.2 Electron Beam Melting

A promising method for the additive manufacturing of 3D parts is electron-beam melting (EBM) [8], which is the formation of successive layers by melting a metal powder in a vacuum chamber. The manufactured product requires little post-processing [9]. This technology uses a powerful electron beam, which provides the energy necessary for high productivity and high melting power of metal powder with a layer thickness of 70–250  $\mu\text{m}$  [10, 11]. The electron beam diameter is 0.25–1 mm. The process execute in a high vacuum chamber ( $5 \cdot 10^{-3}$  bar) to avoid oxidation of the material (Fig. 1).

Most of the studies of the EBM method are carried out on the titanium alloy Ti-6Al-4V, which is a ( $\alpha+\beta$ ) titanium alloy [3]. The transition temperature between the two phases for Ti-6Al-4V is 995 °C. The physical and mechanical properties of the titanium-aluminum-vanadium alloy are superior to those of commercially pure titanium (CP Ti, 99.8% titanium). Compared to CP Ti, Ti-6Al-4V has higher flexural strength (890 MPa versus 390 MPa), high hardness (350 VHN versus 160 VHN) and a slightly higher coefficient of thermal expansion ( $11.8 \cdot 10^{-6}$  °C against  $11.4 \cdot 10^{-6}$  °C).



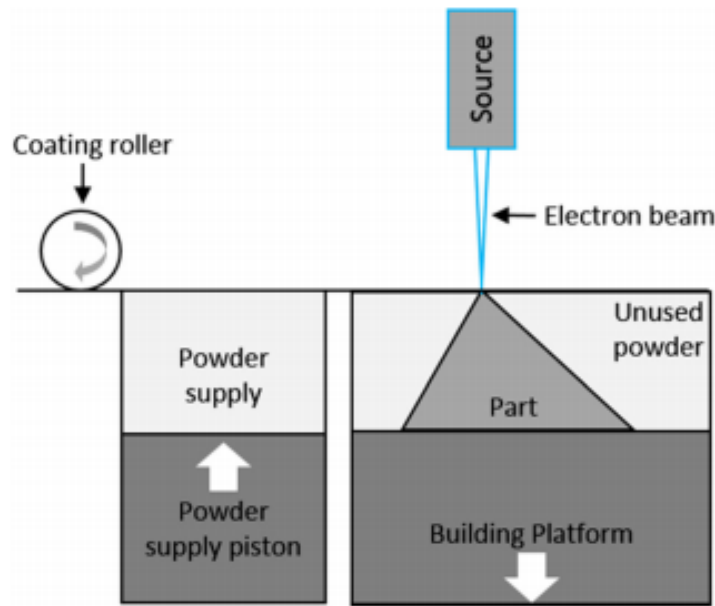


Fig. 1. Electron beam AM process schematic [8].

The advantage of electron-beam melting is that the vacuum process allows to obtain high-quality products from titanium alloys with high strength. However, during the 3D printing process, a non-uniform microstructure is usually formed. This is due to rapid crystallization, which prevents the distribution of alloying elements and increases the solubility in the solid state, which leads to the formation of metastable phases. Intensive degassing during 3D printing can lead to a large number of micropores and defects. Therefore, mechanical and thermal post-processing of titanium alloy parts manufactured by EBM is required [12]. The EBM method is only suitable for the manufacture of metal parts.

### 1.3 Selective Laser Melting

The technology of selective laser melting (SLM) is a layer-by-layer melting of parts manufacturing of metal or polymer powder using a laser source (average powder size 10–40  $\mu\text{m}$ ) with a small thickness of the powder layer (20–40  $\mu\text{m}$ ) [13]. The process execute in a sealed chamber, in an argon or nitrogen atmosphere. The initial materials are stainless steel powders and cobalt-chromium alloys, as well as Ti

and Al powders [9]. The process is usually characterized by high scanning speeds and high cooling speeds. Scanning optics are used to control the laser beam in the xy plane, while the table moves in the z direction (Fig. 2).

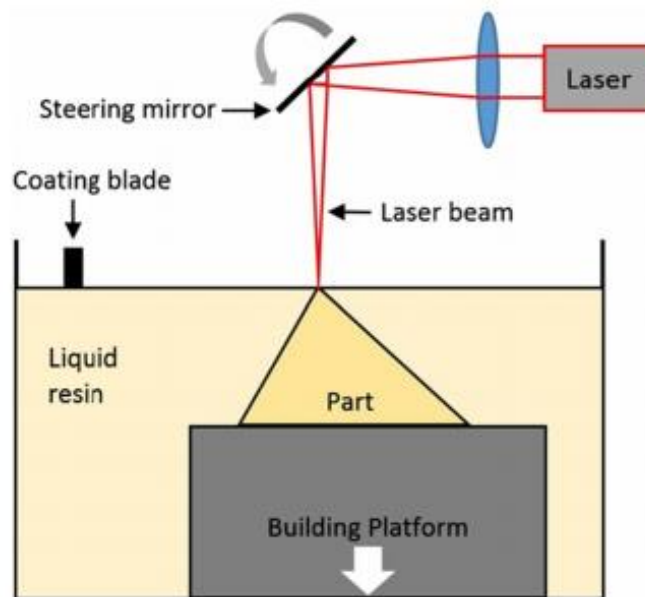


Fig. 2. Laser polymerization AM process schematic [8].

Since the formation of a part in the SLM process occurs as a result of powder melting, the power of the laser beam is approximately equal to 400 W. As a result of selective laser melting technology, high-precision parts are obtained that do not require significant mechanical processing. In the process of SLM, the powder is completely melted, which significantly improves the microstructure and characteristics of the product. The advantages of this method include the creation of products with many closed pores and an almost unlimited field of application.

The disadvantages of selective laser melting include low productivity, high probability of cracking, internal stresses in the product, spheroidization for some types of alloys (Sn, Cu, Zn, Pb), limitation in the use of materials with a high melting point.

## 1.4 Directed energy deposition of powder (metal)

Direct energy Deposition (DED) is a type of additive manufacturing process in which energy from an external source is used to join materials by melting them during powder deposition (average powder size 50–150  $\mu\text{m}$ ). DED is a blown powder method, since metal powders are delivered by a continuous feed through nozzles (Fig. 3). In the SLM and EBM methods, individual powder layers are melted selectively.

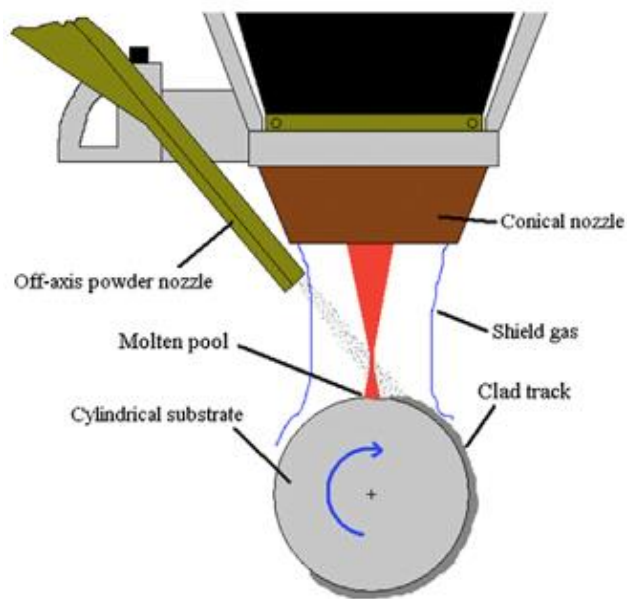


Fig. 3. Working principles of directed energy deposition [13].

The printing process begins with the creation of a 3D part on a digital CAD model. Then the material is cut into layers using special software to form the part. The metal powder is fed into a nozzle and executed to the substrate – on which the part will be made. The heat source melts the material at once using a laser, electron beam, or plasma arc. The substrate is scanned in transverse directions to form the desired geometry. Layer-by-layer application of the powder occurs before the formation of a three-dimensional product. The DED process is usually carried out in an inert atmosphere filled with argon gas, where the oxygen level can be controlled to below 5-10 ppm. After settling, unused powders can be recycled [14].

In the DED method can use polymers and ceramics. Compared to other powder technologies, DED has great capabilities in part manufacturing. This method can at once feed different types of powders through several nozzles, which makes it applicable to building composite materials. The DED method is able to accurately add materials to worn or damaged areas with minimal waste. This capability allows the repair of thin-walled parts such as gas turbines and turbine blades. Repaired parts usually have equivalent or even better mechanical properties than the original parts [15].

### **1.5 Microstructure of titanium alloy Ti-6Al-4V, manufactured by additive technologies**

The samples manufacturing by the EBM method have acicular, lamellar, and globular (equiaxial) microstructure. The microstructure of the grown samples is influenced by the printing parameters scanning strategy, printing speed, powder size, and electron beam diameter. Qualitative and quantitative analysis of the microstructure of the titanium alloy Ti-6Al-4V in the initial state showed that it is inhomogeneous fine-grained, containing  $\alpha$ - single-phase and  $(\alpha+\beta)$  – two-phase regions (Fig. 4). The sizes of single-phase  $\alpha$  regions are 10-40  $\mu\text{m}$ . Two-phase  $(\alpha+\beta)$  – regions surround, as a rule, single-phase regions.

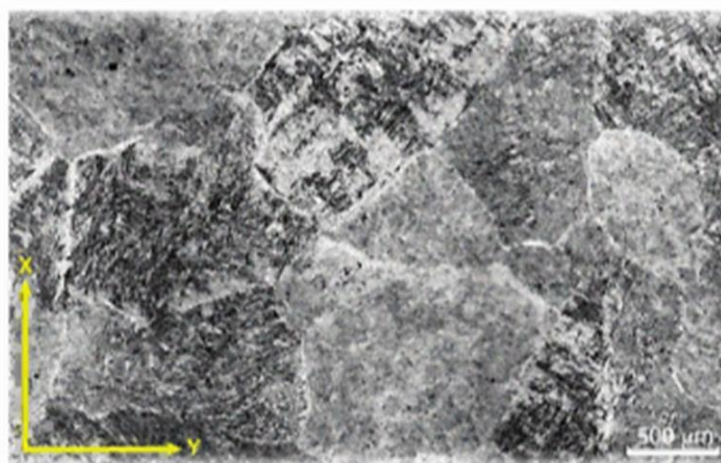


Fig. 4. Image of the microstructure of an additively manufactured Ti-6Al-4V sample [16].

In the article [17], to study the mechanical properties of the titanium alloy Ti-6Al-4V, cylindrical samples manufacturing by the EBM method (the average powder size is 30  $\mu\text{m}$ ) were used. The changes in hardness corresponded to the changes in the microstructure observed by optical metallography. The Vickers hardness of the initial samples averaged 5 GPa. The value of the ultimate strength for samples manufacturing by the EBM method was on average 1.18 GPa for elongations in the range from 16 to 25%. Fig. 5 shows needle  $\alpha$ -plates, the average thickness of which is 3.2  $\mu\text{m}$  in the upper region of the sample.

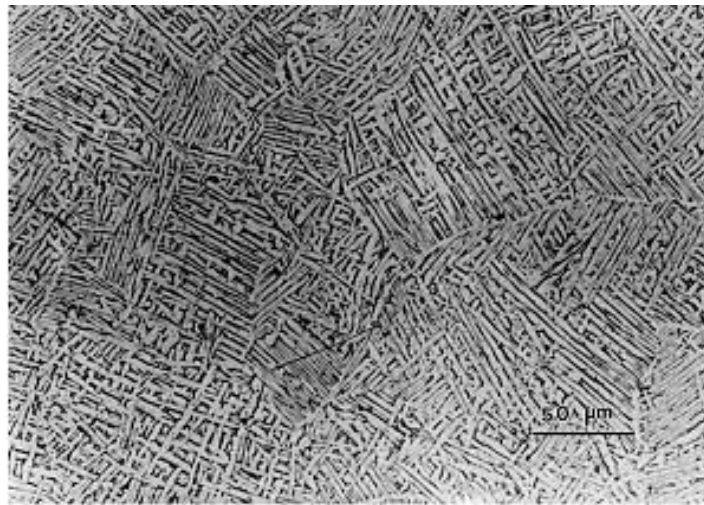


Fig. 5. Optical metallographic image of the Ti-6Al-4V microstructure, manufactured by EBM [17].

It was found that a decrease of the powder size to 20  $\mu\text{m}$  led to a decrease in the size of the sintered layer to 100  $\mu\text{m}$ . Fig. 6 shows a mingled globular-lamellar structure. The Ti-6Al-4V alloy with a bimodal type of microstructure with a lamellar structure fraction of (70–80) % achieves the optimal combination of plasticity, fracture toughness, heat resistance and endurance.

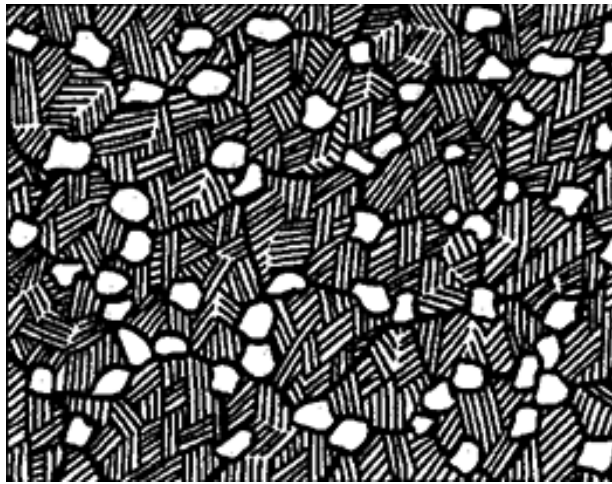


Fig. 6. Mingled structure Ti-6Al-4V [18].

In the article [19], experimenters investigated samples from the titanium alloy Ti-6Al-4V fabricated by the SLM method. High cooling speeds during the printing process significantly affect the microstructure and properties of parts. Samples from the titanium alloy Ti-6Al-4V fabricated by the SLM method had a martensitic microstructure with low plasticity and high hardness. To improve the mechanical properties, it is recommended to heat-treat the parts.

The authors of the article [20] found that the microstructure, roughness, density and microhardness of Ti-6Al-4V parts are closely related to the processing parameters. Due to the high cooling speeds in the parts of the titanium alloy Ti-6Al-4V, manufactured by SLM method, columnar  $\beta$ -grains and  $\alpha$ -martensite are observed in the microstructure. The Ti-6Al-4V part with high microhardness and smooth surface can be manufactured by adjusting the power and scanning speed of the laser. The level of porosity generally decreases with increasing laser power and/or decreasing laser scanning speed. Due to the hard martensite, the parts manufactured by the SLM method have a very high tensile strength, but low plasticity. The value of the fatigue life of the product manufactured by the SLM method was lower in comparison with the deformable material. This result is explained by the microstructure, porosity, surface cleanliness, and residual stress inside the part. Hot isostatic pressing (HIP) significantly improves fatigue strength. The HIP process also increased plasticity, but led to a decrease in strength [21].

## 1.6 Comparative analysis of mechanical properties of titanium alloy Ti-6Al-4V, manufactured by additive technologies

Currently, the most advanced methods of additive manufacturing are direct energy deposition, selective laser melting, and electron beam melting. The difference between DED and SLM is the way the powder is fed. In SLM, metal powders are evenly distributed over the building platform by a roller, while in DED the powders are blown out of nozzles. Further, a new layer of powder is distributed after lowering the building platform to the distance of the layer thickness [22]. Electron beam melting has a higher productivity than DED and SLM due to the high scanning speed [23]. Table 1 shows the main printing parameters of DED, SLM and EBM.

Table 1. A comparison between DED, SLM and EBM [22]

Processing parameters	DED	SLM	EBM
Heating source	Laser	Laser	Electron beam
Environment	Argon	Argon	Vacuum ( $10^{-4}$ – $10^{-5}$ mbar)
Powder feed	Blown powder	Powder bed	Powder bed
Preheating, °C	–	200	600–750 [24]
Maximum beam power, W	500	120	3500
Beam spot, $\mu\text{m}$	660–900	30–250	200–1000
Scan speed, m/s	0.001–0.04	0.3–1	>0.5
Layer thickness, $\mu\text{m}$	200–1000	20–100	50–200

The authors of the article [20] investigated the mechanical properties of the titanium alloy Ti-6Al-4V, manufactured by the SLM and EBM methods (average powder size 35  $\mu\text{m}$  and 77  $\mu\text{m}$  respectively). The manufacturing of samples by the EBM method was carried out after preheating of the substrate with a scanning speed of 1500 mm/s and a layer thickness of 0.05 mm. During the SLM process, samples

were obtained with a scanning speed of 1000 mm/s and a layer thickness of 0.05 mm. The parts were manufactured on a pure titanium substrate that was heated to 473K. Previously, the chamber was purged with high-purity Ar until the oxygen content was 200 ppm. The samples mainly consisted of  $(\alpha+\beta)$  (EBM) and  $\alpha'$ -phase (SLM). The value of the ultimate strength of the sample manufactured by SLM is significantly higher than the value of the EBM samples, and the plasticity is lower. This is due to the high content of  $\alpha'$ -martensite in the sample produced by the SLM method.

The mechanical properties at tension and elongation are practically independent of the powder size (25–100  $\mu\text{m}$ ) and layer thickness (70 and 50  $\mu\text{m}$  for SLM and EBM, respectively) [25]. When manufacturing samples with different powder sizes, a different surface appearance is formed. Table 2 shows that the tensile properties of SLM and EBM parts show very similar values. Due to the lamellar microstructure, the samples manufactured by EBM showed only a slightly higher tensile strength of  $(1132\pm 11)$  MPa and a yield strength of  $(1074\pm 14)$  MPa. Relation to this, the elongation was 10% lower [26].

Table 2. Comparison of tensile properties between SLM and EBM [26]

Specimen	Yield Strength (MPa)	Ultimate Tensile Strength (MPa)	Elongation (%)
SLM	$1010 \pm 18$	$1045 \pm 12$	$8.0 \pm 0.3$
EBM	$1074 \pm 14$	$1132 \pm 11$	$7.2 \pm 0.2$