

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

Школа Инженерная школа новых производственных технологий  
 Направление подготовки 15.04.01 «Машиностроение»  
 Отделение школы (НОЦ) Отделение материаловедения

### МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
<b>Особенности структурно-фазового состояния сплава Ti-6Al-4V при формировании изделий с использованием электронно-лучевой проволочной аддитивной технологии</b> УДК 669.295.5.018.2

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4АМ7К	Соловьёва Анна Сергеевна		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОМ ИШНПТ	Сорокова С.Н.	К.ф.-М.Н.		

Консультант

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Зам.директора ИФПМ СО РАН	Колубаев Е.А.	Д.ф.-М.Н.		

#### КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ст.преподаватель	Рагозин Д.В	К.И.Н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ст.преподаватель	Исаева Е.С.	-		

#### ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОМ ИШНПТ	Сорокова С.Н.	К.ф.-М.Н.		

## Планируемые результаты обучения

Код	Результат обучения	Требования ФГОС, критериев и/или заинтересованных сторон
	<i>Профессиональные компетенции</i>	
P1	Применять <i>глубокие</i> естественно научные, математические и инженерные <i>знания</i> при разработке наукоемких технологий изготовления и обработки новых материалов и изделий из них	Требования ФГОС (ОК-1, ОПК-4, ПК-2, 3, 11, 12) <sup>1</sup> , Критерий 5 АИОР (п.1.1), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P2	Применять <i>глубокие знания</i> в области современных технологий машиностроительного производства для решения <i>междисциплинарных</i> инженерных задач	Требования ФГОС (ОПК-1, 2, ПК-1, 5, 8, 9, 11, 12, 13), Критерий 5 АИОР (пп.1.1,1.2), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P3	Ставить и решать <i>инновационные</i> задачи <i>инженерного анализа</i> , связанные с созданием и обработкой материалов и изделий, с использованием системного анализа и моделирования объектов и процессов машиностроения	Требования ФГОС (ОК-5, ОПК-14, ПК-9, 11) , Критерий 5 АИОР (пп.1.2), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P4	Разрабатывать технологические процессы, <i>проектировать</i> и использовать <i>новое</i> оборудование и инструменты для обработки материалов и изделий, конкурентоспособных на <i>мировом</i> рынке машиностроительного производства, с подготовкой и анализом технической документации	Требования ФГОС (ОК-7, ПК-5, 6, 11, ОПК-11, 12), Критерий 5 АИОР (п.1.3), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P5	Проводить теоретические и экспериментальные <i>исследования</i> , <i>расчеты на прочность</i> в области современных технологий обработки материалов, производства узлов, деталей и конструкций в машиностроении	Требования ФГОС (ОПК-1, 2, 12, ПК-8, 13), Критерий 5 АИОР (п.1.4), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P6	Внедрять, <i>эксплуатировать</i> и обслуживать современное высокотехнологичное производство, обеспечивать его <i>высокую эффективность</i> , соблюдать правила охраны здоровья и безопасности труда на производстве, выполнять требования	Требования ФГОС (ОК-4, ОПК-6, ПК-3, 5, 7), Критерий 5 АИОР (п.1.5), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>

<sup>1</sup> В скобках указаны коды компетенций ФГОС по направлению 15.04.01 «Машиностроение», квалификация «магистр».

	по защите окружающей среды.	
	<i>Универсальные компетенции</i>	
P7	Использовать <i>глубокие знания</i> по <i>проектному менеджменту</i> для ведения <i>инновационной инженерной деятельности</i> с учетом юридических аспектов защиты интеллектуальной собственности	Требования ФГОС (ОПК-7, 8, ПК-3, 4, 7), Критерий 5 АИОР (п.2.1), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P8	<i>Активно владеть иностранным языком</i> на уровне, позволяющем работать в иноязычной среде, разрабатывать документацию, презентовать и защищать результаты инновационной инженерной деятельности	Требования ФГОС (ОК-8, ОПК-3, 6), Критерий 5 АИОР (п.2.2), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P9	Эффективно работать индивидуально, в качестве <i>члена и руководителя группы</i> , состоящей из специалистов различных направлений и квалификаций, демонстрировать ответственность за результаты работы и готовность <i>следовать корпоративной культуре</i> организации.	Требования ФГОС (ОК-3, ОПК-5, 6, 10, ПК-10), Критерий 5 АИОР (пп.1.6, 2.3,), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P10	Демонстрировать <i>глубокие знания социальных, этических и культурных аспектов</i> инновационной инженерной деятельности, компетентность в вопросах <i>устойчивого развития</i> .	Требования ФГОС (ОК-2, ОПК-5, 6, 9, ПК-5, 10), Критерий 5 АИОР (пп.2.4,2.5), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P11	<i>Самостоятельно учиться</i> и непрерывно <i>повышать квалификацию</i> в течение всего периода профессиональной деятельности.	Требования ФГОС (ОК-3, 4, 6, ОПК-10, ПК-7), Критерий 5 АИОР (2.6), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>

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

Школа Инженерная школа новых производственных технологий  
 Направление подготовки (специальность) 15.04.01 «Машиностроение/  
Технологии космического материаловедения  
 Отделение школы (НОЦ) Отделение материаловедения

УТВЕРЖДАЮ:  
 Руководитель ООП  
 \_\_\_\_\_ Сорокова С.Н.  
 (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
4AM7K	Соловьёвой Анне Сергеевне

Тема работы:

**Особенности структурно-фазового состояния сплава Ti-6Al-4V при формировании изделий с использованием электронно-лучевой проволочной аддитивной технологии**

Утверждена приказом директора (дата, номер)

Срок сдачи студентом выполненной работы:

#### ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

<p><b>Исходные данные к работе</b>  <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 является: образцы изготовленные из титанового сплава Ti-6Al-4V посредством формирования с использованием электронно-лучевой проволочной аддитивной технологии.</p>
---	---

<p><b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b>  <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>	<p>1. Литературный обзор: Электронно-лучевые аддитивные технологии; применяемые металлические материалы; фазовые превращения титановых сплавов, основные характеристики титанового сплава Ti-6Al-4V.  2. Постановка задачи, материалы и методика исследования.  3. Экспериментальная часть: исследование микроструктуры и механических свойств образцов из титанового сплава Ti-6Al-4V; определение твердости образцов по Виккерсу и сопоставление данных с соотношением Холла-Петча;  4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.  5. Социальная ответственность.  6. Заключение и выводы.</p>
<p><b>Перечень графического материала</b>  <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i></p>	<p>1. Цель и задачи;  2. Методы проведения исследования;  3. Общая схема процесса выращивания образца;  4. Параметры выращивания образца;  5. Траектория движения при построении слоев;  6. Перечень оборудования;  Микроструктура образца Ti-6Al-4V в вертикальной и горизонтальной плоскостях;  7. Рентгенограммы образца в горизонтальной и вертикальной плоскостях;  8. Средний размер столбчатых зерен;  9. <math>\beta/\alpha'</math> микроструктура образца;  10. Зависимость значений микротвердости по Виккерсу в вертикальной и горизонтальной плоскостях;  11. Выводы по работе.</p>
<p><b>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</b>  <i>(с указанием разделов)</i></p>	
<p><b>Раздел</b></p>	<p><b>Консультант</b></p>
<p>1. Литературный обзор;  2. Материалы и методы исследования;  3. Экспериментальная часть.  Выводы;</p>	<p><b>Колубаев Е.А.</b></p>
<p>4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.</p>	<p><b>Рагозин Д.В.</b></p>
<p>5. Социальная ответственность.</p>	<p><b>Исаева Е.С.</b></p>
<p><b>Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:</b></p>	
<p>Литературный обзор</p>	

<p><b>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</b></p>	<p>20.09.2018</p>
--	-------------------

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

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОМ ИШНПТ	Сорокова С.Н.	к.ф.-м.н.		
Зам.директора ИФПМ СО РАН	Колубаев Е.А.	д.ф.-м.н.		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4АМ7К	Соловьёва А.С.		

## РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа содержит с.110, рис.13, табл.16, 43 источника.

Ключевые слова: титановый сплав, аддитивные технологии, электронно-лучевое плавление, структурно-фазовые превращения, микроструктура, микротвердость.

Объектом исследования является титановый сплав Ti-6Al-4V, полученный методом электронно-лучевого плавления.

Целью работы является изучение особенностей формирования структуры, фазового состава зоны термического влияния при многопроходной вакуумной электронно-лучевой проволоочной наплавке титанового сплава Ti-6Al-4V, а также исследование микротвердости полученных образцов.

В процессе работы проводились исследования микроструктуры, фазового состава и механических свойств образцов (в частности определение твердости по Виккерсу).

В результате исследования установлено, что исследованные образцы имеют гетерогенную микроструктуру, которая включает в себя помимо формирующихся в процессе эпитаксиального роста столбчатых предшествовавших  $\beta$ -зерен со средним размером не выше 1,5 мкм систему ортогональных пластин мартенситной  $\alpha'$ -фазы. При этом по направлению в вершине построенного образца уменьшается толщина пластин  $\alpha'$ -фазы и количество остаточной  $\beta$ -фазы (от 4 мкм и 10 об.% для нижнего слоя до 2 мкм и 5 об.% – для верхнего). А так же обнаружен эффект повышения значений твердости по Виккерсу с ростом высоты наплавленных слоев до значений порядка 3,5 ГПа. Сопоставление с соотношением Холла–Петча.

Область применения: аэрокосмическая — производство элементов газовых турбин, двигателей и корпусов летательных аппаратов; медицина —

изготовление протезов и имплантов; мелкосерийное производство — изготовление пресс-форм, вставок, заготовок.

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

## **Abstract**

Final qualifying work with 110., Fig.13 Table.16, Sources 43.

Key words: titanium alloy, additive technologies, electron beam melting, structural phase transformations, microstructure, microhardness.

The object of the study is the titanium alloy Ti-6Al-4V, got by the method of electron beam melting.

The aim of the work is to study the features of the structure formation, the phase composition of the heat-affected zone in multi-pass vacuum electron-beam wire surfacing of titanium alloy Ti-6Al-4V, as well as the study of the microhardness of the samples.

In the result of the study, it was ascertained that the studied samples have a heterogeneous microstructure, which includes, not only the columnar preceding  $\beta$ -grains formed during the epitaxial growth, with an average size not exceeding 1.5 mm, but a system of orthogonal martensitic  $\alpha'$ -phases. At the same time, the thickness of the  $\alpha'$ -phase plates and the amount of residual  $\beta$ -phase (from 4  $\mu\text{m}$  and 10 vol.% for the lower layer to 2  $\mu\text{m}$  and 5 vol.% for the upper layer) decreases in the direction to the top of the constructed sample. As well as, the effect of increasing the Vickers hardness values with increasing of the deposited layers height to values of the order of 3.5 GPa was found. Comparison with the Hall – Petch ratio shows that the effect of increasing hardness in the direction of layer-by-layer growing is realized due to the gradient microstructure, which is formed as a result of a complex thermal history.

Scope: aerospace - the production of gas turbines elements, engines and airframes; medicine - the manufacture of prostheses and implants; small-scale production - manufacture of molds, inserts, blanks.

The economic efficiency / importance of the work lies in the development and creation of products that exceed the mechanical properties of products obtained by traditional methods.



## Содержание

Реферат	7
Введение	12
1. Литературный обзор	13
1.1 Электронно-лучевые аддитивные технологии	13
1.2 Металлические материалы, применяемые при аддитивных технологиях	20
1.3 Фазовые превращения титановых сплавов. Основные характеристики и свойства сплава Ti-6Al-4V	24
2. Постановка задачи. Материалы и методика исследования	35
2.1 Постановка задачи	35
2.2 Схема процесса и режимы, используемые при получении образцов методом проволоочной электронно-лучевой 3D наплавки	37
2.3 Методика исследования образцов полученных при электронно-лучевой проволоочной аддитивной наплавке	39
3. Экспериментальная часть	42
3.1 Исследование микроструктуры и механических свойств образцов из титанового сплава Ti-6Al-4V	42
3.2 Определение твердости образцов по Виккерсу и сопоставление данных с соотношением Холла-Петча	47
4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	52
4.1 Организация и планирование работ	53
4.2 Продолжительность этапов работ	54
4.3 Расчет сметы затрат на выполнение проекта	61
4.3.1 Расчет затрат на материалы	61
4.3.2 Расчет заработной платы	62
4.3.3 Расчет затрат на социальный налог	63
4.3.4 Расчет затрат на электроэнергию	63
4.3.5 Расчет амортизационных расходов	65
4.3.6 Расчет прочих расходов	66
4.3.7 Расчет общей себестоимости разработки	66
4.3.8 Расчет прибыли	67
4.3.9 Расчет НДС	68
4.3.10 Цена разработки НИР	68
5. Социальная ответственность	71
5.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	72
5.1.1 Специальные правовые нормы трудового законодательства	72
5.1.2 Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны исследователя	73
5.2 Производственная безопасность	74
5.2.1 Анализ вредных и опасных факторов, которые может	74

создать объект исследования	
5.2.2 Анализ вредных и опасных факторов, которые могут возникнуть на рабочем месте при проведении исследований	76
5.2.2.1 Превышение уровня шума	77
5.2.2.2 Контакт с реактивом для травления образцов	78
5.2.2.3 Отклонение показателей микроклимата	79
5.2.2.4 Отсутствие или недостаток естественного света.	80
Недостаточная освещенность рабочей зоны	
5.2.3 Анализ опасных факторов	83
5.2.3.1 Повышенное значение напряжения в электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело человека	83
5.2.3.2 Обоснование мероприятий по защите исследователя от действия опасных и вредных факторов	84
5.3 Экологическая безопасность	85
5.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях	87
Заключение	92
Список использованных источников	93
Приложение А	98
1 Literaturereview REVIEW	99
1.1 Electron-beam additive technologies	99
1.2 Metallic materials used in additive technologies	105
1.3 Phase transformations of titanium alloys. The main characteristics and properties of the alloy Ti-6Al-4V	108

## **ВВЕДЕНИЕ**

Аддитивные технологии на сегодняшний день быстроразвивающаяся отрасль промышленного производства. Рынок аддитивных технологий включает в себя реализацию установок АП, изготовление моделей или деталей на заказ или для собственных нужд, сервисное обслуживание установок, разработка ПО, обучение специалистов и операторов, рекламу и консалтинг [1].

Существует огромное количество определений, так или иначе характеризующие аддитивные технологии. Аддитивными технологиями называют технологии, изготовление изделий по данным цифровой модели, методом послойного внесения расходного материала [2].

В данной работе материалом для исследования был титановый сплав Ti-6Al-4V, полученный методом электронно-лучевого плавления. Титановые сплавы являются одним из основных конструкционных материалов, применяемых в настоящее время в разных отраслях промышленности [3-5]. Ti-6Al-4V является одним из распространенных титановых сплавов используемых в промышленности. Широко используется в аэрокосмической и медицинской областях. Именно эти сферы наиболее привлекательны с точки зрения применения аддитивных технологий, так как используют небольшие по объемам производства, количество изделий широкой номенклатурой [4]. Все это позволяет использовать эти новые технологии с наибольшим выигрышем с точки зрения экономии денежных средств.

Целью работы являлось исследование эволюции микроструктур образцов из сплава Ti-6Al-4V, изготовленных послойным выращиванием посредством электроннолучевой проволочной аддитивной технологии.

Для достижения данной цели в работе были поставлены следующие задачи: Микроструктурные исследования 3D-напечатанных образцов с помощью оптического микроскопа; Рентгеноструктурный анализ образцов; Измерение микротвердости образцов на твердомере по методу Виккерса.

# 1 ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

## 1.1 Электронно-лучевые аддитивные технологии

На данный момент времени в сфере машиностроения не все объекты производства оснащены полностью автоматизированным оборудованием. Участие людей требуется практически на всех стадиях, что оборачивается высокими трудозатратами, медленной скоростью, коррумпированностью. Кроме того, машиностроение – одна из самых опасных профессиональных сфер, исходя из числа несчастных случаев на производстве. Большой интерес к разработке и внедрению в производство технологий 3D печати в машиностроительной области во многом обусловлен возможностью производства изделий сложной формы, без затрат времени на корректировку технологического процесса для каждой детали, и экономичностью расходования материала [5].

3D-печать или «аддитивное производство» – процесс создания цельных трехмерных объектов практически любой геометрической формы на основе цифровой модели. Аддитивная технология основана на концепции построения объекта последовательно наносимыми слоями, отображающими контуры модели. Фактически, 3D-печать является полной противоположностью таких традиционных методов механического производства и обработки, как фрезеровка или резка, где формирование облика изделия происходит за счет удаления лишнего материала (т.н. «субтрактивное производство»). 3D-принтерами называют станки с программным управлением, выполняющие построение детали аддитивным способом.

Хотя технология 3D-печати появилась еще в 80-х годах прошлого века, широкое коммерческое распространение 3D-принтеры получили только в начале 2010-х. Первый дееспособный 3D-принтер был создан Чарльзом Халлом, одним из основателей корпорации 3D Systemsx[6].

Электронно-лучевая плавка (Electron Beam Melting, EBM) – относится к технологии аддитивного производства и является наиболее совершенным среди других технологий 3D-печати.

Электронно-лучевая плавка (EBM) схожа с выборочной лазерной плавкой (SLM) – главное отличие заключается в использовании луча высокоэнергетических электронов вместо лазера в качестве источников энергии для плавки. Технология EBM отлична от выборочного лазерного спекания (SLS) и прямого лазерного спекания металлов (DMLS) тем, что последним зачастую требуется обжиг после печати для достижения максимальных прочностных характеристик. В сравнении с SLS, SLM и DMLS, EBM обладает более высокой скоростью построения за счет более высокой мощности излучателей и электронного, а не электромеханического, отклонения пучков.

К настоящему времени печать полностью функциональных металлических изделий осуществляется путем послойного наращивания материала расплавлением металлического порошка или проволоки как лазерным излучением, так и электронным лучом. При наплавке электронным лучом образуется непористый монолитный материал, механические свойства которого сравнимы с произведенными традиционными методами литья иковки, а в некоторых случаях даже превосходящие их[5].

Рассмотрим немного подробнее порошковую и проволочную электронно-лучевые технологии наплавки.

#### *Порошковая электронно-лучевая наплавка.*

В основе технологии лежит использование электронных пучков высокой мощности для сплавления металлического порошка в вакуумной камере с образованием последовательных слоев, повторяющих контуры цифровой модели.

Устройство считывает данные с файла, содержащего 3D-модель. После чего на специальную платформу насыпают или распыляют дозу порошкового материала, который разравнивается при помощи валика или ножа. Согласно координатам, полученным с компьютерной модели, с помощью электронно-лучевой пушки начинают бомбардировать электронами поверхность порошка, вычерчивая контуры слоев модели. При этом генерируется достаточное количество тепла, позволяющее плавить порошок в местах соприкосновения. При этом часть металлического порошка остается нетронутой. Платформа опускается и процесс повторяется. На рисунке схематично изображена установка электронно-лучевой наплавки с порошковой технологией изготовления деталей.

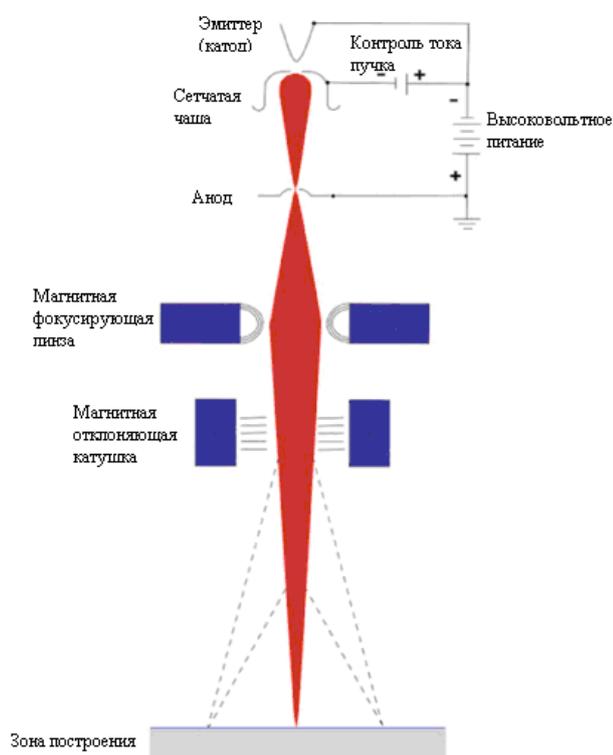


Рисунок 1.1- Установка электронно-лучевой наплавки с порошковой технологией изготовления деталей.

Электронно-лучевая плавка проводится в вакуумных рабочих камерах при повышенных фоновых температурах, достигающих порядка 700-1000°C, что позволяет создавать детали, не страдающие от остаточного механического напряжения, вызываемого градиентом температур между уже

охлажденными и еще горячими слоями, а также работать с материалами, чувствительными к окисдации – например, с чистым титаном. Кроме того, полная плавка расходного порошка позволяет производить монолитные изделия – отсюда максимальная прочность и отсутствие необходимости обжига. Еще одной особенностью подобных устройств является возможность одновременного «облучения» нескольких участков заготовки, что ускоряет процесс изготовления.

Расходным материалом для ЕВМ обычно является металлический порошок, как правило это титановые сплавы, измельченный до консистенции пудры при помощи шаровых мельниц. Но иногда используются и другие металлы для получения каких-либо специфических свойств.

Расходные материалы состоят из чистого металлического порошка без связующего наполнителя, а готовые модели не отличаются пористостью. Таким образом, не требуется обжигание напечатанной модели для достижения необходимой механической прочности[8].

Самыми главными недостатком применения данной технологии является неразвитая структура изготовления (этот процесс находится на экспериментальном уровне) и продвижения российских порошков на экономическом рынке. Порошки приходится закупать на зарубежном рынке по очень высокой цене.

#### *Проволочная электронно-лучевая наплавка.*

Технология заключается в послойном нанесении металла в виде проволоки/прутка, расплавляемого с использованием электронно-лучевых пушек, до получения высокоточных заготовок, максимально приближающихся по параметрам к конечным изделиям. Конкурентными преимуществами технологии являются высокая скорость формирования изделий – до 12 кг/ч, недостижимая для других технологий аддитивного производства металлических изделий (Ding D., 2015). Технология позволяет получать крупногабаритные (до 5000 мм) металлические изделия, в том числе

из тугоплавких и жаропрочных сплавов, с высокой плотностью и однородностью (Lewandowski J.J., 2015) [9].

Высокая повторяемость результатов технологии электронно-лучевой наплавки в совокупности с гибкостью управления технологическим процессом позволяет формировать детали с необходимой структурой и заданными свойствами. А так же технологию электронно-лучевой аддитивной наплавки можно осуществить в воздушной атмосфере, что значительно упрощает конструкционное оснащение оборудования.

Электронный луч создает на поверхности детали ванну расплавленного металла. Наплавляемая деталь перемещается относительно неподвижной электронной пушки и проволочного дозатора, или электронная пушка с дозатором перемещаются относительно неподвижной детали. На рисунке 1.2 изображен принцип электронно-лучевой наплавки проволочной аддитивной технологии.

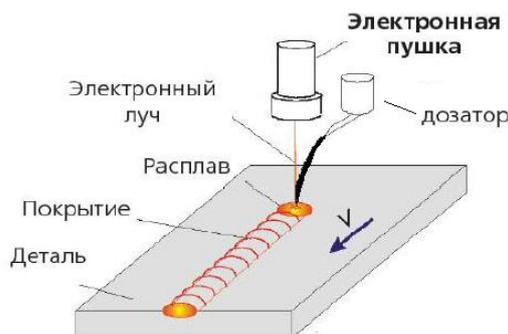


Рисунок 1.2 – Принцип электронно-лучевой проволочной аддитивной технологии

Технология многопроходной электронно-лучевой наплавки основана на явлении «вмораживания» проволоки в жидкометаллическую ванну расплава. При каждом последующем проходе «вмораживается» новая порция металла и расплавляется предыдущая. Проволока, подаваемая в жидкометаллическую ванну расплава, ускоряет процесс ее кристаллизации, способствуя при этом формированию мелкозернистой структуры и

уменьшению остаточных напряжений в наплавленной детали. Необходимая толщина наплавленного слоя достигается путем изменения скорости подачи проволоки или увеличения числа проходов. Большая скорость кристаллизации способствует формированию однородной мелкодисперсной структуры наплавленного слоя [17,18].

Большинство существующих в настоящее время аддитивных технологий изготовления металлических изделий основаны на использовании в качестве исходного материала для формирования изделий порошковых систем. При этом существенно сужается круг конструкционных материалов, из которых возможно получение готовых изделий высокого качества. В частности, формирование изделий из большинства алюминиевых сплавов, а также сплавов активных металлов, таких как титановые и магниевые сплавы, приводит к повышенной пористости материала полученного изделия с существенным снижением его механических характеристик. Производительность формирования деталей из порошковых материалов в существующих аддитивных технологиях является крайне низкой, что практически исключает перспективы применения этих технологий для производства крупногабаритных изделий. А так же после проведения анализа рынка потребления металлических материалов для аддитивных технологий, было выявлено, что 1 кг порошка, к примеру, титанового сплава стоит в среднем 200-250 долларов, так как стандартный маток проволоки той же марки (который весит 5 кг) стоит в разы дешевле, что составляет порядка 50-100 долларов за маток проволоки.

Формирование металлических изделий с использованием оплавления проволочного материала является ключевым вектором развития аддитивных технологий. Данное решение позволяет избавиться от проблем, связанных с низкой производительностью существующих методов, высокой стоимостью применяемого оборудования, ограниченностью типов применяемых материалов, обусловленной традиционным использованием в качестве исходного материала для аддитивного формирования изделий порошковых

систем, оплаваемых мощным тепловым источником. Потенциал развития технологии формирования деталей с оплавлением проволоки очень велик и в настоящее время в мире еще полностью не раскрыт.

Известны примеры установок, в которых изготовление детали происходит в вакууме с использованием электронного луча, что оказывается весьма производительным решением применительно к целому ряду перспективных материалов, в частности, титану и другим химически активным металлам и их сплавам.

Исследовательские работы в области аддитивных технологий, в том числе с использованием проволочных материалов, интенсивно проводятся в фирмах: 3D Systems Corporation (U. S.), 3T RPD (U. K.), Arcam AB (Sweden), Biomedical Modeling, Inc. (U. S.), Envisiontec GmbH (Germany), EOS GmbH Electro Optical Systems (Germany), Fcubic AB (Sweden), GPI Prototype and Manufacturing Services, Inc. (U. S.), Greatbatch, Inc. (U. S.), LayerWise NV (Belgium), Limacorporate SPA (Italy), Materialise NV (Belgium), Medical Modeling, Inc. (U. S.) Norsk Titanium (U. S.), Sciaky (U.S.) [5].

В целом, механизм действия, как при порошковой технологии, так и при проволочной практически схож, за исключением небольшого различия в технологических параметрах процесса. Использование вакуумной камеры в обеих технологиях позволяет работать с химически активными материалами и их сплавами, а так же является защитным барьером от вредного рентгеновского излучения. Но ввиду всего вышеизложенного можно сделать небольшой вывод, что проволочная аддитивная технология гораздо выигрышнее с точки доступности исходного материала для изготовления конечного продукта (детали).

## **1.2 Металлические материалы, применяемые при аддитивных технологиях**

Материалы это неотъемлемая составная часть аддитивных технологий. На 2016 г эти технологии способны обрабатывать широкий круг однородных и неоднородных материалов. Ключевой задачей в области создания и обработки материалов является улучшение качества, повышение стабильности процесса, воспроизводимости и надежности для разнообразных материалов при сохранении низкой стоимости материала, установки, процесса изготовления и чистовой обработки. Традиционное производство в целом надежно обеспечивает воспроизводимость структуры и свойств материалов. Процессы аддитивного производства являются более сложными, поскольку для получения приемлемого качества изделия параметры установки должны быть заданы индивидуально, и в ряде случаев структура материала, свойства и производительность не только отличаются от установки к установке, но зависят даже от расположения внутри одной установки.

Расширение спектра материалов, пригодных для аддитивного производства, потребует исследования многоэлементных систем и форм, в том числе легированных/смешанных/композитных материалов на основе железа, никеля, титана, алюминий, меди и магния [19].

Можно изготавливать металлические детали по аддитивной технологии из того же самого материала, из которого они изготавливались до этого, по привычной технологии.

Если металл хорошо ведет себя при сварке или отливке, он также подходит для электронно-лучевой наплавки. Существует широкий диапазон металлов и сплавов, которые можно использовать в 3d печати, либо в форме порошка, либо в виде проволоки.

К ним относятся:

- Алюминий
- Кобальт
- Медь
- Никель
- Драгоценные металлы (золото, серебро, платина)
- Нержавеющая сталь
- Тантал
- Титан
- Инструментальная сталь
- Вольфрам.

Так же само по себе аддитивное производство предоставляет новые возможности для материалов, которые не использовались при традиционном производстве. Например, некоторые методы 3d печати металла позволяют наносить слои различных металлов — алюминия, тантала и никеля — при изготовлении одной детали. С другой стороны, процесс 3d печати также вносит и новые проблемы, и источники ошибок, включая пористость, остаточные напряжения и деформации.

Рассмотрим более подробно три металла, которые наиболее используемы и перспективны.

#### *Аддитивное производство с титаном*

Титан является одним из наиболее популярных материалов для 3d печати в производстве, особенно в аэрокосмических и медицинских приложениях. Он объединяет легкость алюминия с прочностью стали, и он

не токсичен. Однако этим преимуществам противостоит относительно высокая стоимость титана. Поэтому снижение отходов делает АП привлекательным вариантом для получения титановых деталей.

Порошковый титан легко воспламеняется и взрывается при контакте с водой, при температурах, превышающий 700°C. По этой причине 3d печать с титановым порошком выполняется в вакуумных или в аргоновых камерах. Также можно выполнять 3d печать, используя плавку титановой проволоки электронным лучом, что устраняет риски взрывной реакции.

К двум наиболее распространенным титановым сплавам, используемым в АП, относятся 6Al-4V и 6Al-4V ELI.

#### *Аддитивное производство с алюминием*

Алюминий, легкий и универсальный металл, можно использовать для 3d печати аэрокосмических компонентов, и деталей гоночных автомобилей. Хотя он не обладает прочностью стали, алюминий намного легче ее и более устойчив к коррозии. Они также дороже стали, хотя и не настолько, как титан.

Основное преимущество применения алюминия в 3d печати заключается в возможности производства деталей с мелкими элементами и тонкими стенками (до 50 микрон). Алюминиевые детали, изготовленные методами аддитивного производства, имеют более текстурную, матовую поверхность, в отличие от шлифованной поверхности при производстве алюминиевых деталей на станках

Распространенным алюминиевым сплавом для 3d печати является AlSi10Mg.

### *Аддитивное производство с кобальт-хромом*

Этот сплав обладает очень высокой удельной прочностью (т.е. прочностью, деленной на плотность, что в целом показывает силу, которую требуется приложить на единицу площади для разрыва). Он чаще всего используется в производстве турбин, зубных и ортопедических имплантов, везде, где 3D-печать стала доминирующей технологией.

### *Аддитивное производство с нержавеющей сталью*

Нержавеющая сталь может использоваться для 3d печати водостойких деталей высокой прочности и плотности, и используемых в экстремальной среде, такой как реактивные двигатели самолетов и ракет. Были проведены исследования применимости нержавеющей стали 316L для производства корпусов ядерных реакторов при помощи аддитивных технологий. Несмотря на то, что сталь 316L обычно поддается нетепловой обработке, отчет компания Renishaw предполагает, что процесс аддитивной технологии порождает более прочные сплавы, чем при ковке металла, обеспечивая усилие растяжения, превышающее 600 МПа. Детали из нержавеющей стали изготавливаются на 3d принтере либо путем непосредственного нанесения металла, либо используя композитный материал со связывающим веществом. Детали можно покрывать другими металлами для изменения внешнего вида или свойств поверхности.

Распространенными сплавами нержавеющей стали, используемыми в аддитивном производстве, являются 17-4PH, 15-5-PH, ASM 316L и 304L [12].

Исходя, из всего вышеперечисленного сделаем выбор в пользу титанового сплава Ti-6Al-4V, который наиболее оптимально подходит для проведения дальнейших исследований.

### 1.3 Фазовые превращения титановых сплавов. Основные характеристики и свойства сплава Ti-6Al-4V

На формирование структуры и, следовательно, свойств титановых сплавов решающее влияние оказывают фазовые превращения, связанные с полиморфизмом титана. На рисунке 1.3 представлены схемы диаграмм состояния «титан-легирующий элемент», отражающие подразделение легирующих элементов по характеру влияния на полиморфные превращения титана на четыре группы.

*$\alpha$  - Стабилизаторы (Al, O, N),* которые повышают температуру полиморфного превращения  $\alpha \leftrightarrow \beta$  и расширяют область твердых растворов на основе  $\alpha$  - титана (рисунок 1.3, а). Учитывая охрупчивающее действия азота и кислорода, практическое значение для легирования титана имеет только алюминий. Он является основным легирующим элементом во всех промышленных титановых сплавах, уменьшает их плотность и склонность к водородной хрупкости, а также повышает прочность и модуль упругости. Сплавы с устойчивой  $\alpha$  - структурой термической обработкой не упрочняются.

*Изоморфные  $\beta$  -стабилизаторы (Mo, V, Ni, Ta и др.),* которые понижают температуру  $\alpha \leftrightarrow \beta$  -превращения и расширяют область твердых растворов на основе  $\beta$  -титана (рисунок 1.3, б).

*Эвтектоидообразующие  $\beta$  -стабилизаторы (Cr, Mn, Cu и др.)* могут образовывать с титаном интерметаллиды типа TiX. В этом случае при охлаждении  $\beta$  -фаза претерпевает эвтектоидное превращение  $\beta \rightarrow \alpha + \text{TiX}$  (рисунок 1.3, в). Большинство  $\beta$  -стабилизаторов повышает прочность, жаропрочность и термическую стабильность титановых сплавов, несколько снижая их пластичность (рисунок 1.4). Кроме того, сплавы с ( $\alpha + \beta$ ) и псевдо- $\beta$  -структурой могут упрочняться термообработкой (закалка + старение).

Нейтральные элементы (Zr, Sn) не оказывают существенного влияния на температуру полиморфного превращения и не меняют фазового состава титановых сплавов (рисунок 1.3, з).

Полиморфное  $\beta$  в  $\alpha$  -превращение может происходить двумя путями. При медленном охлаждении и высокой подвижности атомов оно происходит по обычному диффузионному механизму с образованием полиэдрической структуры твердого  $\alpha$  -раствора. При быстром охлаждении — по бездиффузионному мартенситному механизму с образованием игольчатой мартенситной структуры, обозначаемой  $\alpha'$  или при большей степени легированности —  $\alpha''$ . Кристаллическая структура  $\alpha$ ,  $\alpha'$ ,  $\alpha''$  практически однотипная (ГПУ), однако решетка  $\alpha'$  и  $\alpha''$  более искажена, причем степень искаженности возрастает с увеличением концентрации легирующих элементов. Есть сведения, что решетка  $\alpha'$  -фазы скорее ромбическая, чем гексагональная. При старении из фаз  $\alpha'$  и  $\alpha''$  выделяется  $\beta$  -фаза или интерметаллидная фаза.

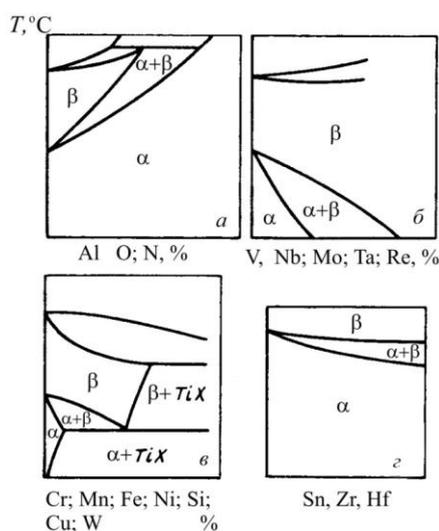


Рисунок 1.3 - Диаграммы состояний систем «Ti-легирующий элемент» (схемы):

- а) «Ti- $\alpha$  -стабилизаторы»;
- б) «Ti-изоморфные  $\beta$  -стабилизаторы»;

в) «Ti-эвтектоидообразующие  $\beta$  -стабилизаторы»;

з) «Ti-нейтральные элементы»

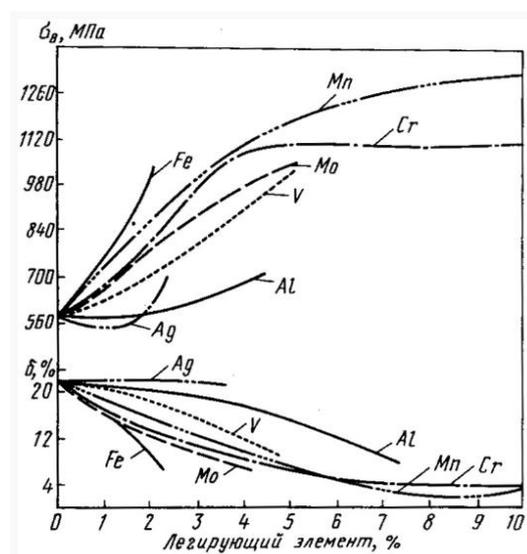


Рисунок 1.4 - Влияние легирующих элементов на механические свойства титана

В отличие от мартенсита углеродистых сталей, являющегося раствором внедрения и характеризующегося высокой прочностью и хрупкостью, титановый мартенсит является раствором замещения, и закалка титановых сплавов на мартенсит  $\alpha'$  приводит к небольшому упрочнению и не сопровождается резким снижением пластичности.

Фазовые превращения, происходящие при медленном и быстром охлаждении титановых сплавов с различным содержанием  $\beta$  -стабилизаторов, а также получаемые структуры отражены на обобщенной диаграмме (рисунок 1.5). Она справедлива для изоморфных  $\beta$  -стабилизаторов (рисунок 1.3, б) и, с некоторым приближением, для эвтектоидообразующих  $\beta$  -стабилизаторов (рисунок 1.3, в), так как эвтектоидный распад в этих сплавах происходит очень медленно, и им можно пренебречь.

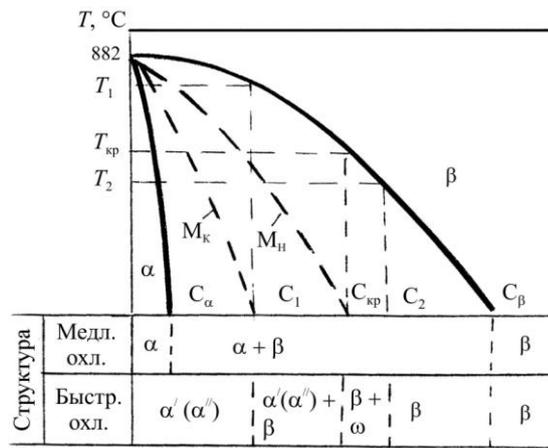


Рисунок 1.5 - Схема изменения фазового состава сплавов «Ti-β - стабилизатор» в зависимости от скорости охлаждения и закалки из β -области

При медленном охлаждении в титановых сплавах, в зависимости от концентрации β -стабилизаторов, могут быть получены структуры: α , α + β или β соответственно.

При закалке в результате мартенситного превращения в интервале температур  $M_n - M_k$  (на рисунке 1.5 показаны пунктиром) следует различать четыре группы сплавов.

В первую группу входят сплавы с концентрацией β -стабилизирующих элементов до  $C_1$ , т. е. сплавы, которые при закалке из β -области имеют исключительно α' (α'')-структуру. После закалки этих сплавов с температур (α + β)-области в интервале от полиморфного превращения до  $T_1$ , их структура представляет собой смесь фаз α' (α''), α и β, а после закалки с температур ниже  $T_{кр}$  они имеют (α + β )-структуру.

Вторую группу составляют сплавы с концентрацией легирующих элементов от  $C_1$  до  $C_{кр}$ , у которых при закалке из β - области мартенситное превращение не происходит до конца и они имеют структуру α' (α'') и β. Сплавы этой группы после закалки с температур от полиморфного

превращения до  $T_{кр}$  имеют структуру  $\alpha'$  ( $\alpha''$ ),  $\alpha$  и  $\beta$ , а с температур ниже  $T_{кр}$  — структуру ( $\alpha + \beta$ ).

Закалка сплавов третьей группы с концентрацией  $\alpha$ -стабилизирующих элементов от  $C_{кр}$  до  $C_2$  с температур  $\beta$ -области или с температур от полиморфного превращения до  $T_2$  сопровождается превращением части  $\beta$ -фазы в  $\omega$ -фазу, и сплавы этого типа после закалки имеют структуру ( $\beta + \omega$ ). Сплавы третьей группы после закалки с температур ниже  $T_2$  имеют структуру ( $\beta + \alpha$ ).

Сплавы четвертой группы после закалки с температур выше полиморфного превращения имеют исключительно  $\beta$ -структуру, а с температур ниже полиморфного превращения — ( $\beta + \alpha$ ).

Необходимо отметить, что превращения  $\beta$  и  $\beta + \omega$  может происходить как при закалке сплавов с концентрацией ( $C_{кр}-C_2$ ), так и при старении сплавов с концентрацией более  $C_2$ , имеющих метастабильную  $\beta$ -фазу. В любом случае, присутствие  $\omega$ -фазы нежелательно, так как она сильно охрупчивает титановые сплавы. Рекомендуемые режимы термообработки исключают ее присутствие в промышленных сплавах или появление в условиях эксплуатации.[15]

Сплав Ti 6Al-4V повсеместно распространен и наиболее часто используется. На его долю приходится 50% общего потребления титана во всём мире.

Удобство использования заключается в его многочисленных преимуществах. Ti 6Al-4V может подвергаться термообработке для повышения его прочности. Этот сплав обладает высокой прочностью при малой массе.

Это лучший сплав для использования в нескольких отраслях промышленности, таких как аэрокосмическая, медицинская, морская и

химическая перерабатывающая промышленность. Его можно использовать при создании:

- авиационных турбин;
- компонентов двигателя;
- конструктивных элементов самолёта;
- аэрокосмических крепёжных изделий;
- высокопроизводительных автоматических деталей;
- спортивного оборудования.

В таблице 1.1 представлен химический состав сплава Ti-6Al-4V в процентном соотношении.

Таблица 1.1 - Химический состав сплава Ti-6Al-4V в процентном соотношении

Химический состав, %	Граничные значения:		
	Ti.....Остаток	O.....0,20	V.....3,5-4,5
Fe... 0,40	Al...5,50-6,75	H.. max0,015	
N... .0,05	C..... 0,08		

Аналогом титанового сплава Ti-6Al-4V (изготовлен по ISO) является сплав Вt-6 (изготовлен по ГОСТ).

Материалы, изготовленные по ГОСТу очень подробно описаны в марочнике металлов и сплавов, поэтому удобнее будет воспользоваться информацией для сплава Вt-6.

Термообработка: Закалка и старение

Твердость материала:  $HV 10^{-1} = 293 - 361$  МПа

Свариваемость материала: без ограничений.

В таблицах 1.2 и 1.3 показаны механические и физические свойства сплава ВТ-6.

Таблица 1.2 – Механические свойства сплава ВТ-6 при  $T=20^{\circ}C$

Прокат	Размер	Напр.	$\sigma_b$ (МПа)	$\sigma_T$ (МПа)	$\delta_5$ (%)	$\psi$ %	КСУ (кДж / м <sup>2</sup> )
Пруток			900-1100		8-20	20-45	400
Пруток			1100-1250		6	20	300
Штамповка			950-1100		10-13	35-60	400-800

Таблица 1.3 – Физические свойства сплава ВТ-6

T (Град)	E $10^5$ (МПа)	$\alpha 10^6$ (1/Град)	$\lambda$ (Вт/(м·град))	$\rho$ (кг/м <sup>3</sup> )	C (Дж/(кг·град))	R $10^9$ (Ом·м)
<b>20</b>	1.15		8.37	4430		1600
<b>100</b>		8.4	9.21			1820
<b>200</b>		8.7	10.88		0.586	2020
<b>300</b>		9	11.7		0.67	2120
<b>400</b>		10	12.56		0.712	2140
<b>500</b>			13.82		0.795	
<b>600</b>			15.49		0.879	

### *Особенности термообработки титана ВТ-6*

Термическая обработка является основным средством изменения структуры титановых сплавов и достижения комплекса механических свойств, необходимых при эксплуатации изделий. Обеспечивая высокую прочность при достаточной пластичности и вязкости, а также стабильность

этих свойств в процессе эксплуатации, термическая обработка имеет не меньшее значение, чем легирование.

Основными видами термической обработки титановых сплавов являются: отжиг, закалка и старение. Находят применение также термомеханические методы обработки.

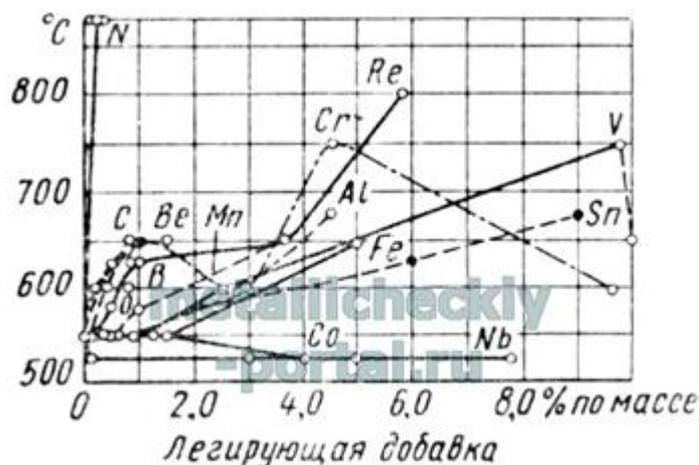


Рисунок 1.6 – Температура рекристаллизации титана в зависимости от содержания легирующих добавок и примесей внедрения

В зависимости от температурных условий отжиг титановых сплавов может сопровождаться фазовыми превращениями (отжиг с фазовой перекристаллизацией в области выше  $\alpha \rightarrow \beta$  - превращения) и может протекать без фазовых превращений (например, рекристаллизационный отжиг ниже температур  $\alpha \rightarrow \beta$ -превращения). Рекристаллизационный отжиг титана и его сплавов приводит к разупрочнению или устранению внутренних напряжений, что может сопровождаться изменением механических свойств. Легирующие добавки и примеси - газы существенно влияют на температуру рекристаллизации титана (рисунок 1.6). Как видно из рисунка, температуру рекристаллизации в наибольшей степени повышают углерод, кислород, алюминий, бериллий, бор, рений и азот. Некоторые из элементов (хром, ванадий, железо, марганец, олово) действуют эффективно при введении их в относительно больших количествах - не менее 3%. Неодинаковое влияние указанных элементов объясняется разным характером их химического

взаимодействия с титаном, различием в атомных радиусах и структурным состоянием сплавов.

Отжиг особенно эффективен для структурно нестабильных, а также деформированных титановых сплавов. Прочность двухфазных  $\alpha+\beta$ -сплавов титана в отожженном состоянии не является простой суммой прочности  $\alpha$ - и  $\beta$ -фаз, а зависит и от гетерогенности структуры. Максимальной прочностью в отожженном состоянии обладают сплавы с наиболее гетерогенной структурой, содержащие примерно одинаковое количество  $\alpha$ - и  $\beta$ -фаз, что связано с измельчением микроструктуры. Отжиг позволяет улучшить пластические характеристики и технологические свойства сплавов (таблица 1.4).

Таблица 1.4 – Режимы отжига титановых сплавов (листы и детали из них)

Сплав	Температура, °С	
	превращения $\alpha \rightarrow \beta$	отжига
BT6	950—1000	800
BT14	920—960	750
BT16	870—910	780
BT15	750—800	800

Неполный (низкий) отжиг применяют с целью устранения только внутренних напряжений, образовавшихся в результате сварки, механической обработки, листовой штамповки и др.

Помимо рекристаллизации в сплавах титана могут происходить и другие превращения, которые приводят к изменению конечных структур.

Важнейшими из них являются:

- а) мартенситное превращение  $\beta$ -твердого раствора;
- б) изотермическое превращение  $\beta$ -твердого раствора;
- в) эвтектоидное или перитектоидное превращение  $\beta$ -твердого раствора с образованием интерметаллидных фаз;
- г) изотермическое превращение нестабильного  $\alpha$ -твердого раствора (например,  $\alpha'$  в  $\alpha+\beta$ ).

Упрочняющая термическая обработка возможна лишь при условии содержания в сплаве  $\beta$ -стабилизирующих элементов. Она заключается в закалке сплава и последующем старении. Свойства титанового сплава, получаемые в результате термической обработки, зависят от состава и количества метастабильной  $\beta$ -фазы, сохраняющейся при закалке, а также типа, количества и распределения продуктов распада, образующихся в процессе старения. На стабильность  $\beta$ -фазы существенное влияние оказывают примеси внедрения - газы. По данным И. С. Полькина и О. В. Каспаровой азот снижает стабильность  $\beta$ -фазы, изменяет кинетику распада и конечные свойства, повышает температуру рекристаллизации. Также действует кислород, однако азот оказывает более сильное влияние, чем кислород.

Водород стабилизирует  $\beta$ -фазу, увеличивает количество остаточной  $\beta$ -фазы в закаленных сплавах, повышает эффект старения сплавов, закаленных из  $\beta$ -области, понижает температуру нагрева под закалку, обеспечивающую максимальный эффект старения.

В  $\alpha + \beta$ - и  $\beta$ -сплавах водород влияет на интерметаллидный распад, приводит к образованию гидридов и потере пластичности  $\beta$ -фазы при старении. Водород в основном концентрируется в  $\beta$ -фазе.

Ф. Л. Локшин, изучая фазовые превращения при закалке двухфазных титановых сплавов, получил зависимости структуры после закалки из  $\beta$ -области и концентрацией электронов.

Сплав ВТ6 имеет среднюю концентрацию электронов на атом 3,91-4,0. Этот сплав после закалки из  $\beta$ -области имеют структуру  $\alpha'$ . При концентрации электронов 4,03-4,07 после закалки фиксируется  $\alpha''$ -фаза.

Свойства закаленного сплава, а также процессы последующего упрочнения его при старении в значительной мере обуславливаются температурой закалки. При данной неизменной температуре старения с ростом температуры закалки  $T_{\text{зак}}$  в  $(\alpha + \beta)$ -области повышается прочность сплава и падают его пластичность и вязкость. При переходе  $T_{\text{зак}}$  в область  $\beta$ -

фазы понижается прочность без повышения пластичности и вязкости. Это происходит вследствие роста зерен.

В последние годы исследователями выполнены работы по изысканию оптимальных практических методов и режимов упрочняющей термической обработки промышленных титановых сплавов. Установлено, что после закалки двухфазных сплавов ВТ6, ВТ14, ВТ16 предел прочности и предел текучести их понижаются. [12]

На структуру и механические свойства материала, получаемого аддитивной технологией электронно-лучевого плавления, влияет большое количество факторов. Путем правильного понимания и управления этими факторами можно получать материалы по качеству, не уступающие материалам полученным традиционными способами производства. Аддитивная технология электронно-лучевой наплавки представляет собой сложный процесс, при котором большое число параметров влияет на качество конечного продукта. Сложность процесса заключается во многих тепловых, физических и механических взаимодействиях и влиянии на них большого количества параметров.

Наблюдаемый размер зерен титанового сплава, полученный методом электронно-лучевой объемной наплавки, существенно меньше, чем у обычных титановых сплавов. Микроструктура выращенных изделий состоит из направленных плоскости подложки оси столбчатых до  $\beta$  зерен и прослойки  $\alpha$  фазы между выращенными слоями, претерпевающей мартенситное превращение с образованием игольчатой  $\alpha'$  фазы [17]. Для улучшения микроструктуры материала и свойств сплава после трехмерной электронно-лучевой наплавки требуется дополнительная обработка (отжиг, закалка, старение, химико-термическая обработка).

**Отжиг** проводится для всех титановых сплавов с целью завершения формирования структуры, выравнивания структурной и концентрационной неоднородности, а также механических свойств. Температура отжига должна быть выше температуры рекристаллизации, но ниже температуры перехода

в  $\beta$  -состояние ( $T_{\text{III}}$ ) во избежание роста зерна. Применяют *обычный отжиг, двойной или изотермический* (для стабилизации структуры и свойств), *неполный* (для снятия внутренних напряжений).

**Закалка и старение** (упрочняющая термообработка) применима к титановым сплавам с  $(\alpha + \beta)$ -структурой. Принцип упрочняющей термообработки заключается в получении при закалке метастабильных фаз  $\beta$ ,  $\alpha'$ ,  $\alpha''$  и последующем их распаде с выделением дисперсных частиц  $\alpha$  - и  $\beta$ -фаз при искусственном старении. При этом эффект упрочнения зависит от типа, количества и состава метастабильных фаз, а также дисперсности образовавшихся после старения частиц  $\alpha$  - и  $\beta$ -фаз.

**Химико-термическая обработка** проводится для повышения твердости и износостойкости, стойкости к «схватыванию» при работе в условиях трения, усталостной прочности, а также улучшения коррозионной стойкости, жаростойкости и жаропрочности. Практическое применение имеют азотирование, силицирование и некоторые виды диффузионной металлизации [15].

Микроструктура образцов после отжига отличается от микроструктуры образцов без термообработки наличием  $\alpha$ - и  $\beta$ -фаз в форме свободного игольчатого мартенситного образования, который образовывался по границам зерен. Иглы мартенсита увеличены в размерах, границы становятся более округлыми.

## **2 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ**

### **2.1 Постановка задачи**

Из вышеприведенного литературного обзора следует, что проволочная электронно-лучевая аддитивная технология с использованием в качестве исходного материала титанового сплава Ti-6Al-4V является наиболее оптимальной с точки зрения высокой производительности. Использование титанового сплава актуализировано спецификой сфер применения и получения изделий с высокими механическими характеристиками.

Целью данной работы является изучение особенностей формирования структуры, фазового состава зоны термического влияния при многопроходной вакуумной электронно-лучевой проволочной наплавке титанового сплава Ti-6Al-4V, а также исследование микротвердости полученных образцов.

Для достижения поставленной цели в работе необходимо решить следующие задачи.

- 1) Произвести наплавку образцов титанового сплава Ti-6Al-4V на подложку из технического титана с помощью вакуумной электронно-лучевой установки (экспериментальная установка Института физики прочности и материаловедения СО РАН);
- 2) Изучить структуру и фазовый состав полученных образцов;
- 3) Измерить микротвердость образцов и произвести анализ полученных данных;
- 4) Сделать анализ полученных данных.

## 2.2 Схема процесса и режимы, используемые при получении образцов методом проволочной электронно-лучевой 3D наплавки

Образцы были получены с использованием экспериментальной установки для выращивания изделий из проволоки в вакууме (Институт физики прочности и материаловедения СО РАН), в качестве источника нагрева с последующим плавлением использовался электронный пучок. Схема получения образцов изображена на рисунке.

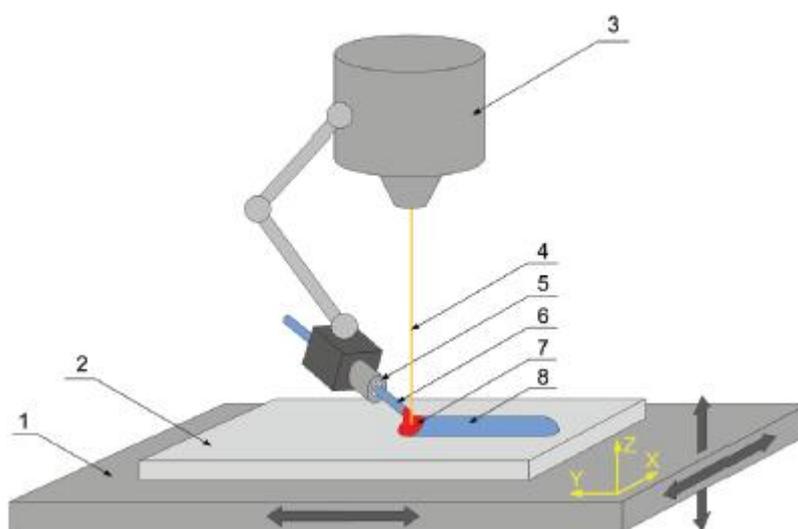


Рисунок 2.1 - Общая схема процесса послойного выращивания образца методом проволочной электронно-лучевой аддитивной технологии

- 1 – подвижный стол; 2 – титановая подложка; 3 – электронная пушка;  
4 – электронный пучок;  
5 – устройство для подачи проволоки; 6 – проволока; 7 – ванна расплава; 8 – выращенный материал

В качестве исходного материала использована проволока из титанового сплава Ti-6Al-4V диаметром 0,8 мм. Выращивание образцов проводилось на подложке из технического титана с размерами 75 × 75 мм толщиной 2,5 мм, закрепленной на подвижном рабочем столе, способном

перемещаться в трех направлениях вдоль осей  $X$ ,  $Y$  и  $Z$ . В процессе выращивания ванна расплава формировалась разверткой электронного пучка в форме кольца диаметром 5 мм. Частота развертки составляла 1 кГц. Проволока подавалась специальным устройством для подачи, неподвижно закрепленным относительно электронной пушки (рисунок 2.1).

Вариация параметров электронного пучка, скорости подачи проволоки и линейной скорости выращивания (скорости перемещения стола относительно пучка) были подобраны таким образом, чтобы обеспечить стабильность процесса плавления кончика проволоки и стекания жидкого металла в ванну расплава непрерывным потоком. Параметры процесса послойного выращивания указаны в таблицу 2.1.

Таблица 2.1 - Технологические параметры процесса выращивания

Ускоряющее напряжение пучка, кВ	40
Ток пучка, мА:	
- первого слоя	16
- последующих слоев	14
Диаметр пучка, мм	0,15...0,18
Развертка пучка	Кольцо диаметром 5 мм
Частота развертки, кГц	1
Шаг смещения $\Delta X$ , мм	5
Высота слоя, мм	0,8
Количество слоев, шт	3
Скорость подачи проволоки, мм/мин	880
Угол наклона подачи проволоки к подложке, град	25

Угол наклона подачи проволоки к оси X, град	45
Линейная скорость выращивания, мм/мин	220

После выполнения прохода вдоль оси  $Y$  длиной 30 мм производилось смещение по оси  $X$  на расстояние  $\Delta X = 5$  мм, и выполнялся проход на расстояние 30 мм в противоположную сторону. Далее процесс повторялся до достижения ширины образца 30 мм (рисунок 2.2) и завершения выращивания слоя. Затем рабочий стол опускался на 0,8 мм и аналогичным образом формировался следующий слой. При выращивании образца на подложку было последовательно нанесено три слоя без взаимного смещения в плоскости  $XU$  согласно стратегии сканирования, показанной на рисунке 2.2. Так, был получен образец из сплава Ti-6Al-4V размером  $30 \times 30 \times 2,4$  мм, который состоял из трех одинаковых слоев.[18]

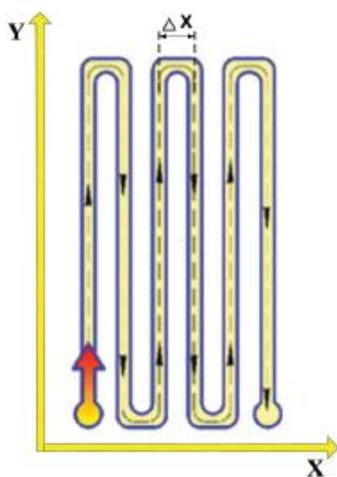


Рисунок 2.2 - Траектория движения при построении слоев при электронно-лучевой проволочной технологии

## 2.3 Методика исследования образцов полученных при электронно-лучевой проволочной аддитивной наплавке

Структурные исследования образцов проводили на оборудовании Институт физики прочности и материаловедения СО РАН:

1. Лабораторная экспериментальная установка для аддитивного электронно-лучевого производства металлических изделий из проволоки;
2. Оптический микроскоп Альтами МЕТ-1С;
3. Микротвердомеры ПМТ-3М и Duramin-5;
4. Просвечивающий электронный микроскоп JEM-2100;
5. Рентгеновский дифрактометр Дрон-7;
6. Растровый электронный микроскоп SEMTRAC mini.



Рисунок 2.3 – Внешний вид оборудования используемого для исследований

Для проведения диагностики были приготовлены шлифы для металлографических исследований. Так как шероховатость образцов была большой, они проходили дополнительную обработку поверхности. Шлифовка проводилась с помощью наждачной бумаги вручную. Маркировка шлифовальных шкур, которые использовались для подготовки поверхности Р 400, Р 600, Р 800, Р 1000, Р 1200, Р 1500 и Р 2000. Полировка проводилась с помощью алмазной пасты для тонкой полировки (Алмазная паста АСМ 200/160 НОМГ 40г).

После полировки образцы травят в реактиве следующего состава: 2 % HF; 2 % HNO<sub>3</sub>; 96 % H<sub>2</sub>O (указаны объемные доли), затем образцы промывались проточной водой и протирались спиртом.

Микроструктура была исследована с использованием оптической (ОМ) и растровой электронной микроскопии (РЕМ). Идентификация фаз выполнялась на рентгеновском дифрактометре ДРОН-7 с использованием излучения Co K $\alpha$  с шагом 0,02° и временем выдержки 5 с на шаг. Измерения микротвердости проводились на микротвердомере Duramin 5 при нагрузке 50 г.

### 3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

#### 3.1 Исследование микроструктуры и механических свойств образцов из титанового сплава Ti-6Al-4V

На рисунке 3.1 изображены микроструктуры в вертикальных (рис. 3.1, а Z–Y) и горизонтальной (X–Y, рисунок 3.1, б) плоскостях по отношению направления выращивания образца. В вертикальной плоскости (Z–Y) образца наблюдаются удлиненные зерна, которые эпитаксиально растут через осажденные слои. Они наклонены относительно направления Z. Данный результат был предсказуемым, так как в сплавах Ti-6Al-4V, полученных методом послойного изготовления электронно-лучевыми источниками нагрева, уже фиксировались столбчатые зерна, формирующиеся вследствие высоких температурных градиентов [18, 19–22].

В таблице 3.1 представлены результаты измерений размера столбчатых зерен в горизонтальной (X–Y) и вертикальной (Z–Y) плоскостях выращенного образца Ti-6Al-4V.

На рисунке 3.2 представлены рентгенограммы полированной поверхности образца Ti-6Al-4V в горизонтальной (X–Y) и вертикальной (Z–Y) плоскостях по отношению к направлению выращивания с индексацией основных дифракционных пиков. Практически все пики на рентгенограмме после послойного выращивания могут быть идентифицированы как  $\alpha$ -фаза. При измеренных параметрах элементарной ячейки ( $a = 2,93 \text{ \AA}$  и  $c = 4,57 \text{ \AA}$ ,  $c/a = 1,595$ ) ее можно было определить как мартенситную  $\alpha'$ -фазу, формирующуюся внутри первоначальных столбчатых зерен  $\beta$ -фазы. Расчетная объемная доля остаточной  $\beta$ -фаза для верхних слоев составляет порядка 5 %, а для нижних – около 10 %. Поскольку почти вся  $\beta$ -фаза в сплаве Ti-6Al-4V превращалась в  $\alpha'$ -фазу при низкой температуре, далее по тексту вместо термина « $\beta$ -зерно» будет использоваться термин «предшествовавшее  $\beta$ -зерно».

На рисунке 3.2, а видно формирование рентгенографической текстуры, выражающееся в инверсии пиков мартенситной  $\alpha'$ -фазы для разных изученных сечений образца.

На рисунке 3.3 показана  $\beta/\alpha'$  микроструктура, состоящая из длинных ортогонально ориентированных мартенситных пластин  $\alpha'$ -фазы, формирующихся внутри «предшествовавших» столбчатых зерен  $\beta$ -фазы. В верхних слоях толщина пластин  $\alpha'$ -фазы составляет величину порядка 2 мкм (рисунок 3.3, а, б), в нижних слоя, граничащих с подложкой, – порядка 4 мкм (рисунок 3.3, в, г).

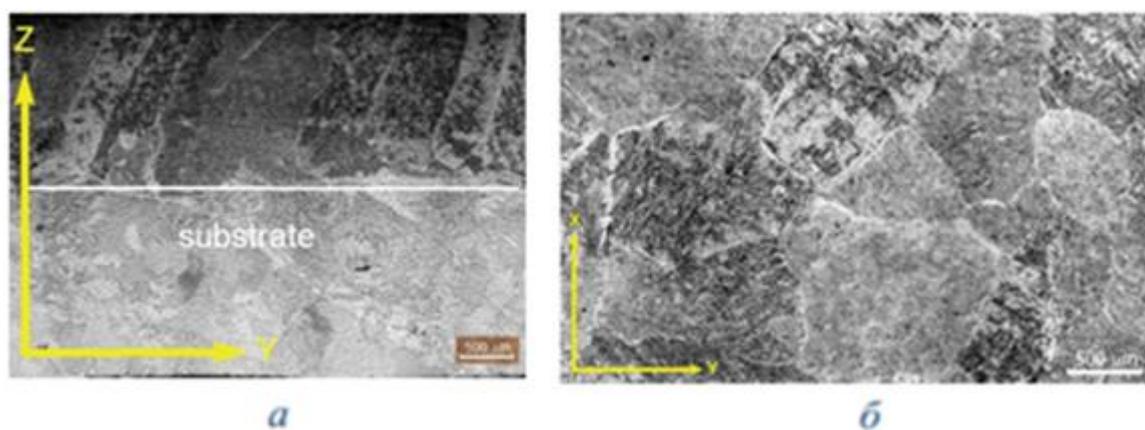


Рисунок 3.1 - Изображения микроструктуры выращенного образца Ti-6Al-4V в вертикальной Z–Y (а) и горизонтальной X–Y (б) плоскостях по отношению к направлению выращивания

Таблица 3.1 – Средний размер столбчатых зерен, мм

Плоскость образца	Направление измерений относительно направления осаждения слоев (относительно оси Z)	
	Параллельно	Перпендикулярно
Z-Y	1,51±0,42	0,65±0,26
X-Y	0,69±0,20	-

Эволюция  $\alpha/\beta$ -структур в образце из титанового сплава Ti-6Al-4V, полученном с использованием электронно-лучевой объемной наплавки, можно описать следующим образом. Воздействие электронного пучка приводит к образованию ванны расплава в приповерхностном объеме подложки из сплава технического титана. Границы зон таких ванн хорошо видны на рисунке 3.1. Последующая столбчатая структура зерен образуется в результате затвердевания таких ванн и верхних слоев выращенного металла [20,21]. Благодаря направленному тепловому потоку (подложка обеспечивает теплоотвод от ванны расплава) зерна растут в столбчатой форме в направлении, противоположном градиенту температуры [20,21]. Затем эти зерна становятся центрами, из которых растут новые зерна при кристаллизации последующего слоя [20–23]. Так реализуется процесс эпитаксиальный роста, и длинные относительно узкие столбчатые зерна образуются по всему образцу. После прохождения электронного пучка материал затвердевает в  $\beta$ -зерна и затем подвергается быстрому охлаждению, превращаясь в мартенситную  $\alpha'$ -фазу, которая занимает практически весь объем предшествовавшего  $\beta$ -зерна. ГПУ  $\alpha'$  мартенсит представляет собой метастабильную структуру, которая стремится достичь состояния равновесия путем выделения и роста  $\alpha$ - и  $\beta$ -фаз.

По мере образования дополнительных слоев идет процесс, близкий к изотермическому отжигу при температуре образца ориентировочно 600...650 °С. Это позволяет мартенситу разлагаться на  $\alpha$ - и  $\beta$ -фазы по диффузионному механизму. При этом, кроме увеличения количества  $\beta$ -фазы, происходит увеличение толщины пластин остаточной  $\alpha'$ -фазы (рисунок 3.3, в, г). После завершения процесса послойного выращивания происходит последующее медленное охлаждение образца.

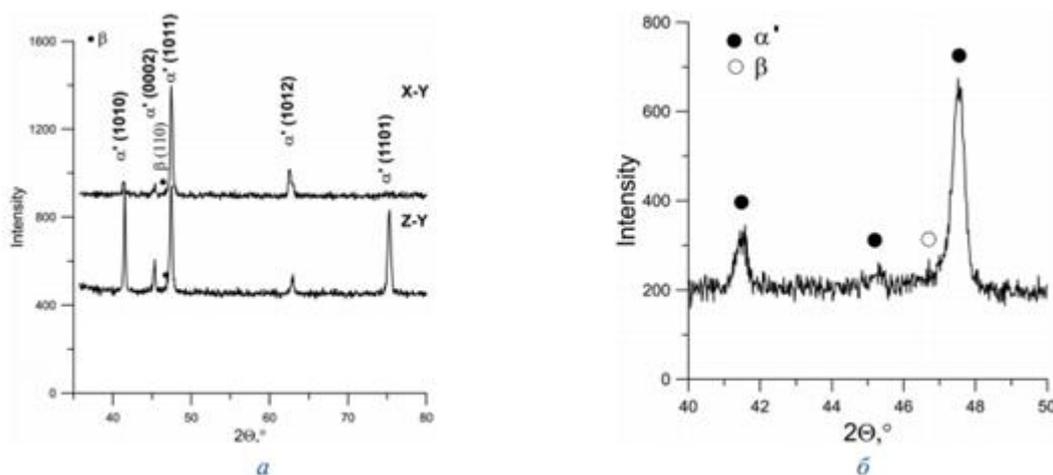


Рисунок 3.2 - Рентгенограммы полученного образца в горизонтальном (X–Y) и вертикальном (Z–Y) сечениях по отношению к направлению выращивания (а) и фрагмент рентгенограммы, детально показывающий пики  $\alpha'$ - и  $\beta$ -фаз (б)

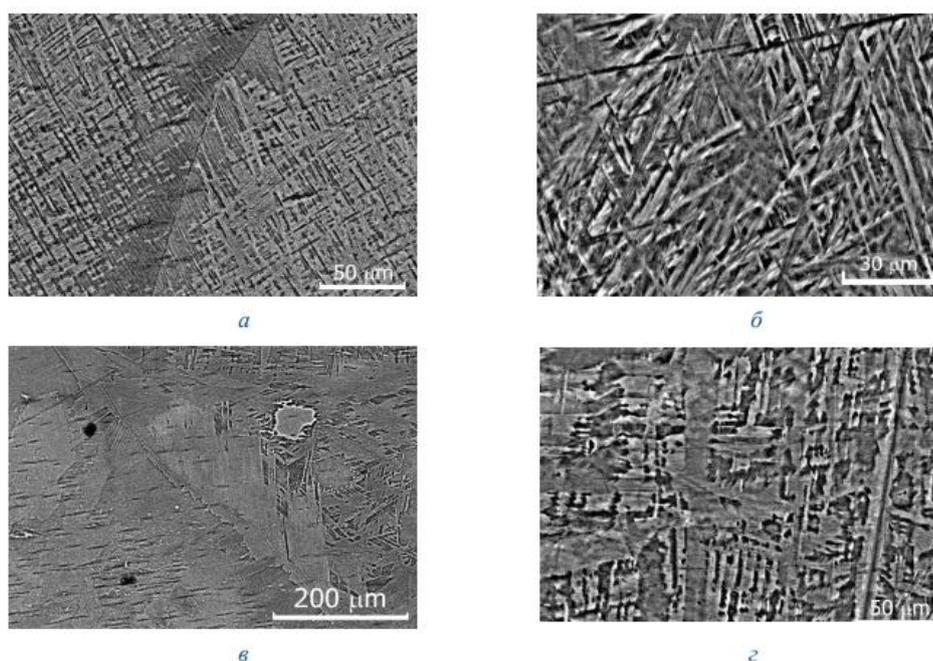


Рисунок 3.3 - Изображения  $\beta/\alpha'$  микроструктуры, состоящей из длинных ортогонально ориентированных мартенситных пластин  $\alpha'$ -фазы:

а, б – верхние слои; в, г – нижние слои, граничащие с подложкой

Известно, что размер предшествовавших  $\beta$ -зерен определяется главным образом временем пребывания между температурой ликвидуса и температурой  $\beta$ - $\alpha$  перехода (995 °С для сплава Ti-6Al-4V) [24]. Для лазерной технологии указан диапазон зерен 0,5...1,5 мм, а для электронно-лучевой 1,4...5,0 мм. Ориентируясь на эти цифры, можно сделать вывод, что в настоящем исследовании удалось получить структуру с относительно небольшими предшествующими  $\beta$ -зернами, при этом зафиксированные размеры  $\beta$ -зерен, в высоту не превышающие 1,3...1,5 мм, находятся в начале диапазона возможных размеров  $\beta$ -зерен для электронно-лучевых аддитивных технологий. Толщина пластин  $\alpha'$ -фазы зависит от скорости охлаждения и от температуры  $\beta$ - $\alpha$ -перехода. Быстрое охлаждение проявляется в более тонких пластинах  $\alpha'$ -фазы, и наоборот [18]. В настоящее время установлено, что толщина  $\alpha'$ -планок внутри предшествовавших  $\beta$ -зерен в материале, изготовленных с использованием электроннолучевых аддитивных технологий, как правило, меньше, чем у большинства других материалов,

изготовленных другими аддитивными методами, что указывает на относительно высокую скорость охлаждения от температуры  $\beta$ -перехода.

### **3.2 Определение твердости образцов по Виккерсу и сопоставление данных с соотношением Холла-Петча**

На рисунке 3.4, а предоставлены результаты измерения микротвердости вдоль линии, перпендикулярной выращенным слоям. За начало координат принята вершина образца. Видно, что твердость была наибольшей вблизи поверхности образца, затем ее значения уменьшаются с увеличением расстояния от поверхности, постепенно достигая твердости подложки, при этом имеет место очевидная анизотропия по данным микротвердости в направлении Z–Y. Зависимость значений микротвердости в горизонтальном (X–Y) сечении (рисунок 3.4, б) от длины измеренной дорожки имеем вид ломаной линии со значительным отклонением значений от средней величины ( $HV_{cp} = 3,36 \pm 0,16$ ).

В ряде работ сообщалось о различиях в твердости между верхней и нижней частями части Ti-6Al-4V, осажденной с использованием электронно-лучевого плавления [25–28]. На основании этих исследований можно сделать вывод, что изменения твердости с высотой выращенного изделия являются побочным продуктом термического циклирования, электронно-лучевой аддитивной технологии, поскольку микроструктура изменяется в каждом отдельном слое. Микроструктура верхних слоев образца, полученная при высоких скоростях охлаждения (рисунок 3.3, а, б), состоит из большого количества тонких пластин  $\alpha'$ -фаз неравновесного состава, которые обычно более твердые и имеют более высокую прочность, чем те, которые получают при более низких скоростях охлаждения. Поскольку  $\alpha'$ -фаза сплава Ti-6Al-4V с гексагональной плотноупакованной структурой имеет более высокое значение объемного модуля, чем ОЦК структура  $\beta$ -фазы [29], верхние слои

полученного сплава Ti-6Al-4V тверже, чем нижние, содержащие повышенное количество  $\beta$ -фазы (около 10 об.%) и утолщенные по сравнению с верхними слоями пластины  $\alpha'$ -фазы (рисунок 3.3, в, г). Обращает на себя внимание тот факт, что классическое соотношение Холла–Петча достаточно корректно отражает связь между масштабом предварительных зерен  $\beta$ -фазы и величиной твердости. Из данных, представленных в таблице 3.1 и на рисунке 3.4, видно, что структуры с малым масштабом имеют высокие значения твердости, и наоборот.

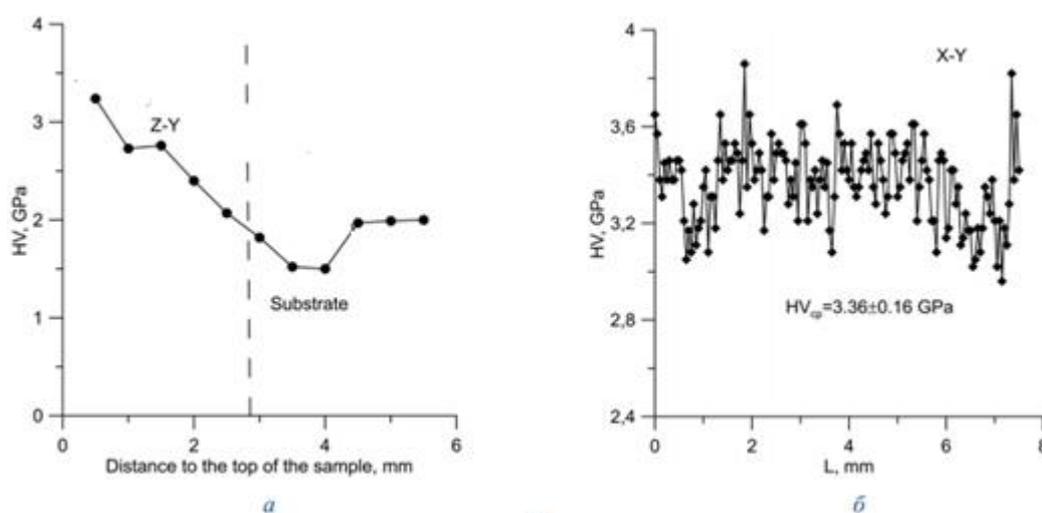


Рисунок 3.4 - Зависимость значений микротвердости по Виккерсу в вертикальной (Z–Y) плоскостях образца от расстояния до вершины образца (а); в горизонтальной (X–Y) плоскости от длины измеренной дорожки (б)

Сопоставление с соотношением Холла–Петча показывает, что градиент по значениям твердости обусловлен в основном наличием градиентной микроструктуры, возникшей в результате термоциклирования при получении образцов. В работе [30] показано, что существует линейная зависимость между твердостью по Виккерсу (HV), пределом текучести ( $\sigma_y$ ) и пределом прочности при растяжении ( $\sigma_u$ ) для Ti-6Al-4V:  $\sigma_y = 3,013HV - 127,000$ ; (1)  $\sigma_u = 3,586HV - 237,900$ . (2) Расчетный предел текучести и предельная прочность на разрыв верхних слоев выращенного образца (толщиной около 1,5 мм), полученные в соответствии с (1) и (2),

сопоставимы со свойствами ковального сплава Ti-6Al-4V (предел текучести – около 850 МПа и предельная прочность на разрыв – около 950 МПа). Таким образом, результаты настоящей работы демонстрируют, что при формировании образцов из титанового сплава Ti-6Al-4V электронно-лучевой проволочной аддитивной технологией образуются многомасштабные структуры с высокими механическими свойствами. Такие многомасштабные структуры возникают в результате сложной комбинации условий нагрева/плавления и затвердевания, а также фазовых превращений в титановом сплаве.

### **Выводы:**

Исследована эволюция микроструктур образцов из сплава Ti-6Al-4V, изготовленных послойным выращиванием посредством электроннолучевой проволочной аддитивной технологии. На основе полученных данных можно сделать следующие выводы.

1. Исследованные образцы имеют гетерогенную микроструктуру, которая включает в себя помимо формирующихся в процессе эпитаксиального роста столбчатых предшествовавших  $\beta$ -зерен со средним размером не выше 1,5 мкм систему ортогональных пластин мартенситной  $\alpha'$ -фазы. При этом по направлению в вершине построенного образца уменьшается толщина пластин  $\alpha'$ -фазы и количество остаточной  $\beta$ -фазы (от 4 мкм и 10 об.% для нижнего слоя до 2 мкм и 5 об.% – для верхнего).

2. Обнаружен эффект повышения значений твердости по Виккерсу с ростом высоты наплавленных слоев до значений порядка 3,5 ГПа. Сопоставление с соотношением Холла–Петча показывает, что эффект повышения твердости в направлении послойного выращивания реализуется за счет градиентной микроструктуры, формирующейся вследствие сложной термической истории.

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

Студенту:

<b>Группа</b> 4АМ7К	<b>ФИО</b> Соловьева Анна Сергеевна
------------------------	--

Школа	ИШНПТ	Отделение школы (НОЦ)	ОМ
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	15.04.01 «Машиностроение»/ Технологии космического материаловедения

Тема ВКР:

**Особенности структурно-фазового состояния сплава Ti-6Al-4V при формировании изделий с использованием электронно-лучевой проволоочной аддитивной технологии**

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

1. <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	<i>Стоимость материальных ресурсов, стоимость спецоборуживания, тарифные ставки исполнителей научно-исследовательского проекта</i>
2. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	<i>Общая ставка взносов во внебюджетные фонды</i>

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

1. <i>Оценка коммерческого и инновационного потенциала НТИ</i>	<i>1. Потенциальные потребители результатов исследования 2. Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения</i>
2. <i>Планирование и формирование бюджета научных исследований</i>	<i>1. Составление перечня этапов и работ 2. Распределение исполнителей 3. Определение трудоемкости выполнения работ 4. Разработка графика проведения научного исследования 5. Бюджет научно-технического исследования</i>
1. <i>Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности</i>	<i>Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта</i>

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

- Оценочная карта сравнения конкурентных технических решений*
- Линейный план-график проведения работ научных исследований*

<b>Дата выдачи задания для раздела по линейному графику</b>	11.03.2019
---	------------

**Задание выдал консультант:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Рагозин Дмитрий Валерьевич	Кандидат исторических наук		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4АМ7К	Соловьёва Анна Сергеевна		

## **4 ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖЕМЕНТ,**

### **РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ**

В поиске источников финансирования для проведения научного исследования и реализации его результатов, необходима оценка коммерческой ценности работы. При этом разработчики должны представлять реальное состояние и перспективы проводимых ими научных исследований. Помимо улучшения технических параметров по сравнению с предыдущими разработками необходимо оценить научное исследование с точки зрения коммерческой привлекательности для конечного потребителя.

Целью выполнения данного раздела выпускной квалификационной работы является формирование навыков оценки результатов научной работы и поиск источников финансирования для проведения научного исследования. Для достижения обозначенной цели необходимо решить следующие поставленные задачи:

- 1 Произвести анализ организации и планирования работ;
  - 1.1 Определить продолжительность этапов работ;
- 2 Сделать расчет сметы затрат на выполнение проекта;
  - 2.1 Выполнить расчет затрат на материалы;
  - 2.2 Выполнить расчет заработной платы;
  - 2.3 Выполнить расчет затрат на социальный налог;
  - 2.4 Выполнить расчет затрат на электроэнергию;
  - 2.5 Выполнить расчет амортизационных расходов;
  - 2.6 Выполнить расчет общей себестоимости разработки;
  - 2.7 Выполнить расчет прибыли;
  - 2.8 Выполнить расчет НДС;
  - 2.9 Дать оценку разработки НИР.

#### 4.1 Организация и планирование работ

При организации процесса реализации проекта необходимо рационально спланировать занятость каждого из его участников и сроки проведения работ. Наглядно представим линейный график реализации проекта.

В данном пункте составляется полный перечень проводимых работ, определяются их исполнители и рациональная продолжительность.

Таблица 4.1

*Перечень работ и продолжительность их выполнения*

Этапы работы	Исполнит ели	Загрузка исполнителей
Постановка целей и задач, получение исходных данных	НР	НР – 100%
Составление и утверждение ТЗ	НР, И	НР – 100% И – 10%
Подбор и изучение материалов по тематике	НР, И	НР – 30% И – 100%
Разработка календарного плана	НР, И	НР – 100% И – 10%
Обсуждение литературы	НР, И	НР – 30% И – 100%
Выбор методов исследования	НР, И	НР – 100% И – 70%
Подготовка образцов для исследования	НР, И	НР – 20% И – 100%
Проведение эксперимента	И	И – 100%
Анализ полученных данных, выводы	И	И – 100%
Оценка эффективности полученных результатов	И	И – 100%
Оформление расчетно-пояснительной записки	НР, И	НР – 30% И – 100%

## 4.2 Продолжительность этапов работ

Трудовые затраты в большинстве случаев образуют основную часть стоимости разработки, поэтому важным моментом является определение трудоемкости работ каждого из участников научного исследования. Трудоемкость выполнения научного исследования оценивается экспертным путем в человеко-днях и носит вероятностный характер, т.к. зависит от множества трудно учитываемых факторов. Для определения ожидаемого (среднего) значения трудоемкости  $t_{ож}$  используется следующая формула:

$$t_{ож} = \frac{3 \cdot t_{min} + 2 \cdot t_{max}}{5}, \quad (4.1)$$

где  $t_{min}$  – минимальная продолжительность работы, дн.;

$t_{max}$  – максимальная продолжительность работы, дн.;

Для выполнения перечисленных в таблице 4.1 работ требуются специалисты:

- инженер – в его роли действует исполнитель НИР (ВКР);
- научный руководитель.

Для построения линейного графика необходимо рассчитать длительность этапов в рабочих днях, а затем перевести ее в календарные дни. Расчет продолжительности выполнения каждого этапа в рабочих днях ( $T_{РД}$ ) ведется по формуле:

$$T_{РД} = \frac{t_{ож}}{K_{ВН}} \cdot K_{Д} \quad (4.2)$$

где  $t_{ож}$  – продолжительность работы, дн.;

$K_{ВН}$  – коэффициент выполнения работ, учитывающий влияние внешних факторов на соблюдение предварительно определенных длительностей, в частности, возможно  $K_{ВН} = 1$ ;

$K_{\text{д}}$  – коэффициент, учитывающий дополнительное время на компенсацию непредвиденных задержек и согласование работ ( $K_{\text{д}} = 1-1,2$ ; в этих границах конкретное значение принимает сам исполнитель).

Расчет продолжительности этапа в календарных днях ведется по формуле:

$$T_{\text{КД}} = T_{\text{РД}} \cdot T_{\text{К}}, \quad (4.3)$$

где  $T_{\text{КД}}$  – продолжительность выполнения этапа в календарных днях;

$T_{\text{К}}$  – коэффициент календарности, позволяющий перейти от длительности работ в рабочих днях к их аналогам в календарных днях, и рассчитываемый по формуле

$$T_{\text{К}} = \frac{T_{\text{КАЛ}}}{T_{\text{КАЛ}} - T_{\text{ВД}} - T_{\text{ПД}}} \quad (4.4)$$

где  $T_{\text{КАЛ}}$  – календарные дни ( $T_{\text{КАЛ}} = 365$ );

$T_{\text{ВД}}$  – выходные дни ( $T_{\text{ВД}} = 101$ );

$T_{\text{ПД}}$  – праздничные дни ( $T_{\text{ПД}} = 14$ ).

$$T_{\text{К}} = \frac{365}{365 - 101 - 14} = 1,46$$

Приведем расчет основных показателей:

$$t_{\text{ож1}} = \frac{3 * 3 + 2 * 10}{5} = 5,8$$

$$t_{\text{ож2}} = \frac{3 * 10 + 2 * 30}{5} = 18,0$$

$$t_{\text{ож3}} = \frac{3 * 7 + 2 * 15}{5} = 10,2$$

$$t_{\text{ож4}} = \frac{3 * 2 + 2 * 4}{5} = 2,8$$

$$t_{\text{ож5}} = \frac{3 * 3 + 2 * 6}{5} = 4,2$$

$$t_{\text{ож6}} = \frac{3 * 8 + 2 * 15}{5} = 10,8$$

$$t_{\text{ож7}} = \frac{3 * 11 + 2 * 26}{5} = 17,0$$

$$t_{\text{ож8}} = \frac{3 * 8 + 2 * 18}{5} = 12,0$$

$$t_{\text{ож9}} = \frac{3 * 7 + 2 * 15}{5} = 10,2$$

$$t_{\text{ож10}} = \frac{3 * 8 + 2 * 14}{5} = 10,4$$

$$t_{\text{ож11}} = \frac{3 * 10 + 2 * 14}{5} = 11,6$$

Продолжительность этапов в рабочих днях для научного руководителя:

$$T_{\text{РДНР1}} = \frac{6}{1} * 1,1 = 6,6$$

$$T_{\text{РДНР2}} = \frac{18}{1} * 1,1 = 19,8$$

$$T_{\text{РДНР3}} = \frac{10}{1} * 1,1 = 11,0$$

$$T_{\text{РДНР4}} = \frac{3}{1} * 1,1 = 3,3$$

$$T_{\text{РДНР5}} = \frac{4}{1} * 1,1 = 4,4$$

$$T_{\text{РДНР6}} = \frac{11}{1} * 1,1 = 12,1$$

$$T_{\text{РДНР7}} = \frac{17}{1} * 1,1 = 18,1$$

$$T_{\text{РДНР11}} = \frac{12}{1} * 1,1 = 13,3$$

Продолжительность этапов в рабочих днях для исполнителя:

$$T_{\text{РДИ2}} = \frac{18}{1} * 1,2 = 21,5$$

$$T_{\text{РДИ3}} = \frac{10}{1} * 1,2 = 12,0$$

$$T_{\text{РДИ4}} = \frac{3}{1} * 1,2 = 3,6$$

$$T_{\text{РДИ5}} = \frac{4}{1} * 1,2 = 4,8$$

$$T_{РДИ6} = \frac{11}{1} * 1,2 = 13,2$$

$$T_{РДИ7} = \frac{17}{1} * 1,2 = 20,4$$

$$T_{РДИ8} = \frac{12}{1} * 1,2 = 13,2$$

$$T_{РДИ9} = \frac{10}{1} * 1,2 = 12,0$$

$$T_{РДИ10} = \frac{10}{1} * 1,2 = 12,0$$

$$T_{РДИ11} = \frac{12}{1} * 1,2 = 14,4$$

Продолжительность этапов в календарных днях для научного руководителя:

$$T_{КДНР1} = 6,6 * 1,46 = 9,6$$

$$T_{КДНР2} = 19,8 * 1,46 = 28,9$$

$$T_{КДНР3} = 11,0 * 1,46 = 16,1$$

$$T_{КДНР4} = 3,3 * 1,46 = 4,8$$

$$T_{КДНР5} = 4,4 * 1,46 = 6,4$$

$$T_{КДНР6} = 12,1 * 1,46 = 17,7$$

$$T_{КДНР7} = 18,7 * 1,46 = 27,3$$

$$T_{КДНР11} = 13,3 * 1,46 = 21,0$$

Продолжительность этапов в календарных днях для исполнителя:

$$T_{КДИ2} = 21,6 * 1,46 = 31,5$$

$$T_{КДИ3} = 12,0 * 1,46 = 17,5$$

$$T_{КДИ4} = 3,6 * 1,46 = 5,3$$

$$T_{КДИ5} = 4,8 * 1,46 = 7,0$$

$$T_{КДИ6} = 13,2 * 1,46 = 19,3$$

$$T_{КДИ7} = 20,4 * 1,46 = 29,8$$

$$T_{КДИ8} = 13,2 * 1,46 = 19,3$$

$$T_{КДИ9} = 12,0 * 1,46 = 17,5$$

$$T_{\text{кди10}} = 12,0 * 1,46 = 17,5$$

$$T_{\text{кди2}} = 14,4 * 1,46 = 21,0$$

В таблице 4.2 приведены данные определения продолжительности этапов работ и их трудоемкости по исполнителям, занятым на каждом этапе. Величины трудоемкости этапов по исполнителям  $T_{\text{кд}}$  (данные столбцов 8 и 9 кроме итогов) позволяют построить линейный график осуществления проекта – см. в табл. 4.3.

Таблица 4.2

## Трудозатраты на выполнение проекта

Этап	Исполнители	Продолжительность работ, дни			Трудоемкость работ по исполнителям чел.-дн.			
		$t_{min}$	$t_{max}$	$t_{ож}$	$T_{РД}$		$T_{КД}$	
					НР	И	НР	И
<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>
Постановка задачи	НР	3	10	6	6,6	–	9,6	–
Разработка и утверждение технического задания (ТЗ)	НР, И	10	30	18	19,8	21,6	28,9	31,5
Подбор и изучение материалов по тематике	НР, И	7	15	10	11,0	12,0	16,1	17,5
Разработка календарного плана	НР, И	2	4	3	3,3	3,6	4,8	5,3
Обсуждение литературы	НР, И	3	6	4	4,4	4,8	6,4	7,0
Выбор методов исследования	НР, И	8	15	11	12,1	13,2	17,7	19,3
Подготовка образцов для исследования	НР, И	11	26	17	18,7	20,4	27,3	29,8
Проведение эксперимента	И	8	18	2	–	13,2	–	19,3
Анализ полученных данных, выводы	И	7	15	0	–	12,0	–	17,5
Оценка эффективности полученных результатов	И	8	4	10	–	12,0	–	17,5
Оформление расчетно-пояснительной записки	НР, И	10	14	12	13,3	14,4	21,0	21,0
<b>Итого:</b>				<b>112</b>	<b>75,9</b>	<b>127,2</b>	<b>131,8</b>	<b>175,7</b>

Таблица 4.3

*Линейный график работ*

Этап	НР	И	Январь			Февраль			Март			Апрель			Май			Июнь		
			10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180
1	9,6	–	■																	
2	28,9	31,5		■	■	■														
3	16,1	17,5					■	■	■											
4	4,8	5,3						■	■											
5	6,4	7,0							■	■										
6	17,7	19,3								■	■	■								
7	27,3	29,8										■	■	■	■					
8	–	19,3													■	■	■			
9	–	17,5															■	■		
10	–	17,5																■	■	
11	21,0	21,0																	■	■

НР – ■ ; И – ■

### **4.3 Расчет сметы затрат на выполнение проекта**

При планировании бюджета должно быть обеспечено полное и достоверное отражение всех видов расходов, связанных с его выполнением.

Расчет сметной стоимости ее выполнения производится по следующим статьям затрат:

- материалы и покупные изделия;
- заработная плата;
- социальный налог;
- расходы на электроэнергию (без освещения);
- амортизационные отчисления;
- прочие (накладные расходы) расходы.

#### **4.3.1 Расчет затрат на материалы**

К данной статье расходов относится стоимость материалов, покупных изделий, полуфабрикатов и других материальных ценностей, расходуемых непосредственно в процессе выполнения работ над объектом проектирования. Сюда же относятся специально приобретенное оборудование, инструменты и прочие объекты, относимые к основным средствам, стоимостью до 40 000 руб. включительно. Цена материальных ресурсов определяется по соответствующим ценникам или договорам поставки. Кроме того статья включает так называемые транспортно-заготовительные расходы, связанные с транспортировкой от поставщика к потребителю, хранением и прочими процессами, обеспечивающими движение (доставку) материальных ресурсов от поставщиков к потребителю. Сюда же включаются расходы на совершение сделки купли-продажи (т.н. транзакции). Приблизительно они оцениваются в процентах к отпускной цене закупаемых материалов, как правило, это 5 ÷ 20 %. Исполнитель работы самостоятельно выбирает их величину в указанных границах. Пример см. в табл. 4.4

Таблица 4.4

*Расчет затрат на материалы*

Наименование материалов	Цена за ед., руб.	Кол-во	Сумма, руб.
Проволока	6500	1 ролик	6500
Алмазная паста для шлифования	250	1 уп.	250
Наждачная бумага	1500	1 уп.	1550
Ткань полировочная	300	1 м.	300
<b>Итого:</b>			<b>8600</b>

Допустим, что ТЗР составляют 5 % от отпускной цены материалов, тогда расходы на материалы с учетом ТЗР равны  $C_{\text{мат}} = 8600 * 1,05 = 9030$  руб.

**4.3.2 Расчет заработной платы**

Данная статья расходов включает заработную плату научного руководителя и инженера (в его роли выступает исполнитель проекта), а также премии, входящие в фонд заработной платы. Расчет основной заработной платы выполняется на основе трудоемкости выполнения каждого этапа и величины месячного оклада исполнителя.

Среднедневная тарифная заработная плата ( $ЗП_{\text{дн-т}}$ ) рассчитывается по формуле:

$$ЗП_{\text{дн-т}} = MO/20,833 \quad (4.5)$$

$$ЗП_{\text{дн-тНР}} = 33664,00/20,833 = 1615,90 \text{ руб.}$$

$$ЗП_{\text{дн-тИ}} = 15470,00/20,833 = 742,57 \text{ руб.}$$

В данной формуле учтено, что в году 250 рабочих дней и, следовательно, в месяце в среднем 20,833 рабочих дня (при пятидневной рабочей неделе).

Пример расчета затрат на полную заработную плату приведены в таблице 4.6. Затраты времени по каждому исполнителю в рабочих днях с

округлением до целого взяты из таблицы 4.2. Для учета в ее составе премий, дополнительной зарплаты и районной надбавки используется следующий ряд коэффициентов:  $K_{ПР} = 1,1$ ;  $K_{доп.ЗП} = 1,113$  (при пятидневной рабочей неделе);  $K_p = 1,3$ . Таким образом, для перехода от тарифной (базовой) суммы заработка исполнителя, связанной с участием в проекте, к соответствующему полному заработку (зарплатной части сметы) необходимо первую умножить на интегральный коэффициент  $K_{и} = 1,1 * 1,113 * 1,3 = 1,592$ .

Таблица 4.5

*Затраты на заработную плату*

Исполнитель	Оклад, руб./мес.	Среднедневная ставка, руб./раб.день	Затраты времени, раб.дни	Коэффициент	Фонд з/платы, руб.
НР	<b>33 664</b>	1615,90	76	1,592	<b>122808,40</b>
И	<b>15 470</b>	742,57	127	1,592	<b>94306,39</b>
<b>Итого:</b>					<b>217144,79</b>

#### 4.3.3 Расчет затрат на социальный налог

Затраты на единый социальный налог (ЕСН), включающий в себя отчисления в пенсионный фонд, на социальное и медицинское страхование, составляют 30 % от полной заработной платы по проекту, т.е.  $C_{соц.} = C_{зп} * 0,3$ . Итак, в нашем случае  $C_{соц.} = 217144,79 * 0,3 = 65134,44$  руб.

#### 4.3.4 Расчет затрат на электроэнергию

Данный вид расходов включает в себя затраты на электроэнергию, потраченную в ходе выполнения проекта на работу используемого оборудования, рассчитываемые по формуле:

$$C_{эл.об.} = P_{об} \cdot t_{об} \cdot Ц_{э} \quad (4.6)$$

где  $P_{об}$  – мощность, потребляемая оборудованием, кВт;

$Ц_{э}$  – тариф на 1 кВт·час;

$t_{об}$  – время работы оборудования, час.

Для ТПУ ЦЭ = 5,748 руб./кВт·час (с НДС).

ПК - Персональный компьютер

СП – Струйный принтер

$$C_{эл.об}ПК = 0,3 * 1825,8 * 5,748 = 3148,40$$

$$C_{эл.об}СП = 0,1 * 30 * 5,748 = 17,24$$

Время работы оборудования вычисляется на основе итоговых данных таблицы 4.2 для инженера ( $T_{РД}$ ) из расчета, что продолжительность рабочего дня равна 8 часов.

$$t_{об} = T_{РД} * K_t, \quad (4.7)$$

$t_{об} = 127 * 0,6 = 76,2$  в днях, умножим на 24 для перевода в часы и получим 1828,8.

Для принтера  $t_{об}$  примем равным 30 часам, так как он использовался эпизодично.

где  $K_t \leq 1$  – коэффициент использования оборудования по времени, равный отношению времени его работы в процессе выполнения проекта к  $T_{РД}$ , определяется исполнителем самостоятельно. В ряде случаев возможно определение  $t_{об}$  путем прямого учета, особенно при ограниченном использовании соответствующего оборудования.

Мощность, потребляемая оборудованием, определяется по формуле:

$$P_{об} = P_{ном.} * K_C \quad (4.8)$$

где  $P_{ном.}$  – номинальная мощность оборудования, для персонального компьютера равна 0,3, для струйного принтера 0,1, кВт;

$K_C \leq 1$  – коэффициент загрузки, зависящий от средней степени использования номинальной мощности. Для технологического оборудования малой мощности  $K_C = 1$ .

Пример расчета затраты на электроэнергию для технологических целей приведен в таблице 4.6.

Таблица 4.6

*Затраты на электроэнергию технологическую*

Наименование оборудования	Время работы оборудования $t_{\text{ОБ}}$ , час	Потребляемая мощность $P_{\text{ОБ}}$ , кВт	Затраты $C_{\text{элОБ}}$ , руб.
Персональный компьютер	1828,8	0,3	3148,40
Струйный принтер	30	0,1	17,24
<b>Итого:</b>			<b>3165,64</b>

**4.3.5 Расчет амортизационных расходов**

В данную статью включают все затраты, связанные с приобретением специального оборудования (приборов, контрольно-измерительной аппаратуры, стендов, устройств и механизмов), необходимого для проведения работ по конкретной теме. Определение стоимости спецоборудования производится по действующим прейскурантам, а в ряде случаев по договорной цене. При приобретении спецоборудования необходимо учесть затраты по его доставке и монтажу в размере 15% от его цены.

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

Однако в ходе эксплуатации основного оборудования средства были затрачены в соответствии с амортизационными отчислениями.

Так, расчет амортизационных отчислений производился линейным методом, результаты расчетов сведены в таблицу 4.7.

Таблица 4.7 – Амортизационные расходы

Наименование оборудования	Стоимость, руб.	Срок полезного использования, лет	Норма амортизации, %	Амортизационные расходы, руб.
ЭЛУ	4500000	10	64	114741
Микротвердомер	740000	7	45	18573,7
Оптический микроскоп	145000	10	59	3408,4
Дифрактометр	500000	10	64	12749
<b>Итого:</b>				<b>149472,1</b>

#### 4.3.6 Расчет прочих расходов

В статье «Прочие расходы» отражены расходы на выполнение проекта, которые не учтены в предыдущих статьях, их следует принять равными 10% от суммы всех предыдущих расходов, т.е.

$$C_{\text{проч.}} = (C_{\text{мат}} + C_{\text{зп}} + C_{\text{соц}} + C_{\text{эл.об.}} + C_{\text{ам}}) \cdot 0,1 \quad (4.9)$$

Для нашего примера это

$$C_{\text{проч.}} = (8600 + 217114,79 + 65134,44 + 3165,64 + 149472,10) \cdot 0,1 = 44348,69 \text{ руб.}$$

#### 4.3.7 Расчет общей себестоимости разработки

Проведя расчет по всем статьям сметы затрат на разработку, можно определить общую себестоимость проекта «Особенности структурно-фазового состояния сплава Ti-6Al-4V при формировании изделий с использованием электронно-лучевой проволочной аддитивной технологии».

Таблица 4.8

*Смета затрат на разработку проекта*

Статья затрат	Условное обозначение	Сумма, руб.
Материалы и покупные изделия	$C_{\text{мат}}$	8600,00
Основная заработная плата	$C_{\text{зп}}$	217114,79
Отчисления в социальные фонды	$C_{\text{соц}}$	65134,44
Расходы на электроэнергию	$C_{\text{эл.}}$	3165,64
Амортизационные отчисления	$C_{\text{ам}}$	149472,10
Прочие расходы	$C_{\text{проч}}$	44348,69
<b>Итого:</b>		<b>487835,67</b>

Таким образом, затраты на разработку составили  $C = 487835,67$  руб.

#### 4.3.8 Расчет прибыли

Прибыль от реализации проекта в зависимости от конкретной ситуации (масштаб и характер получаемого результата, степень его определенности и коммерциализации, специфика целевого сегмента рынка и т.д.) может определяться различными способами. Если исполнитель работы не располагает данными для применения «сложных» методов, то прибыль следует принять в размере  $5 \div 20$  % от полной себестоимости проекта. В нашем примере она составляет 97567,13 руб. (20 %) от расходов на разработку проекта.

#### 4.3.9 Расчет НДС

НДС составляет 20% от суммы затрат на разработку и прибыли. В нашем случае это  $(487835,667 + 97567,13) * 0,2 = 117080,56$  руб.

#### 4.3.10 Цена разработки НИР

Цена равна сумме полной себестоимости, прибыли и НДС, в нашем случае

$$C_{\text{НИР(КР)}} = 487835,67 + 97567,13 + 117080,56 = 702483,36 \text{ руб.}$$

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА  
«СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»**

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
4АМ7К	Соловьёвой А.С.

<b>Школа</b>	<b>ИШНПТ</b>	<b>Отделение (НОЦ)</b>	<b>ОМ</b>
Уровень образования	Магистр	Направление/специальность	15.04.01 «Машиностроение»/ Технологии космического материаловедения

Тема ВКР:

<b>Особенности структурно-фазового состояния сплава Ti-6Al-4V при формировании изделий с использованием электронно-лучевой проволоочной аддитивной технологии</b>	
<b>Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:</b>	
1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	Объектом исследования является титановый сплав Ti-6Al-4V, сформированный в изделие при помощи электронно-лучевой аддитивной технологии. Основные области применения: медицина и авиастроение.
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
<b>1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:</b> - специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; - организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.	По данной теме рассматриваются следующие документы: - инструкция № 2-08 по охране труда при работе с ПЭВМ и ВДТ; - СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03. Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организация работы; - ГОСТ Р 50948-01. Средства отображения информации индивидуального пользования. Общие эргономические требования и требования безопасности; - ГОСТ Р 50949-01. Средства отображения информации индивидуального пользования. Методы измерений и оценки эргономических параметров и параметров безопасности; - ГОСТ Р 50923-96. Рабочее место оператора. Общие

	эргономические требования и требования к производственной среде. Методы измерения.
<b>2. Производственная безопасность:</b> 2.1. Анализ выявленных вредных и опасных факторов 2.2. Обоснование мероприятий по снижению воздействия	При проведении исследования возможны проявления следующих вредных и опасных факторов: - Освещение; - Шум; - Микроклимат; - Химическое воздействия реактива для травления; - Электричество;
<b>3. Экологическая безопасность:</b>	Факторы рабочего места, влияющие на окружающую среду: - утилизация люминесцентных ламп; - переработка бытового мусора.
<b>4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:</b>	Защита в чрезвычайных ситуациях: - разработка действий в результате возникшей ЧС и мер по ликвидации её последствий; - Действия для ликвидации пожара;

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

**Задание выдал консультант:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ст.преподаватель	Исаева Е.С.	-		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4АМ7К	Соловьёва А.С.		

## 5 СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ

### Введение

С быстрым развитием научно-технического прогресса остро встает вопрос о возможности безопасного исполнения людьми своих трудовых обязанностей. В связи с этим была создана и развивается наука о безопасности труда и жизнедеятельности человека.

Безопасность жизнедеятельности (БЖД) — наука о комфортном и безопасном взаимодействии человека с техносферой, представляет собой область научных знаний, изучающая опасности угрожающие человеку и разрабатывающие способы защиты от них в любых условиях обитания человека.

В данном разделе рассматривается экологическая безопасность и безопасность научно-исследовательской работы, которая была проведена в институте физики прочности и материаловедения, в лаборатории контроля качества материалов и конструкций. Работа проводилась на предмет исследования образцов из титанового сплава Ti-6Al-4V с использованием электронно-лучевой проволоочной аддитивной технологии.

На рабочем месте должны быть предусмотрены меры защиты от возможного воздействия опасных и вредных факторов производства. Уровни этих факторов не должны превышать предельных значений, оговоренных правовыми, техническими и санитарно-техническими нормами. Эти нормативные документы обязывают к созданию на рабочем месте условий труда, при которых влияние опасных и вредных факторов работающих либо устранено совсем, либо не превышают в допустимых пределах.

Объект исследования: вещество, материалы.

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

### **5.1.1 Специальные правовые нормы трудового законодательства**

Согласно трудовому законодательству, в РФ регламентируется 8-ми часовой рабочий день. Во время рабочего дня отводится специальные промежутки времени для перерывов на отдых и питание. Продолжительность перерывов на отдых и питание составляет от 30 до 60 мин.

К самостоятельной работе с оборудованием допускаются сотрудники ИФПМ СО РАН и других научно-исследовательских организаций сибирского региона РФ, а также аспиранты, студенты, работающие в этих организациях. Для получения допуска к самостоятельной работе работник должен ознакомиться с правилами работы на оборудовании сдать экзамен.

В соответствие с инструкцией по охране труда при работе с лабораторным комплексом в ИФПМ СО РАН к работе с электронным оборудованием допускаются лица (сотрудники Института, аспиранты, студенты и прикомандированные лица) не моложе 18 лет, не имеющие медицинских противопоказаний и прошедшие инструктаж (не реже 1 раза в год).

Эксплуатация каждого прибора должна выполняться согласно инструкции по его эксплуатации. К работе на персональном компьютере (ПК) допускаются лица, прошедшие медицинское освидетельствование, вводный инструктаж, первичный инструктаж, обучение и стажировку на рабочем месте, проверку знаний требований охраны труда, имеющие группу I по электробезопасности.

По данной теме рассматриваются законодательные и нормативные документы:

- 1) инструкция № 2-08 по охране труда при работе с ПЭВМ и ВДТ.

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

3) ГОСТ Р 50948-01. Средства отображения информации индивидуального пользования. Общие эргономические требования и требования безопасности.

4) ГОСТ Р 50949-01. Средства отображения информации индивидуального пользования. Методы измерений и оценки эргономических параметров и параметров безопасности.

5) ГОСТ Р 50923-96. Рабочее место оператора. Общие эргономические требования и требования к производственной среде. Методы измерения.

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

Основным объектом в производственных условиях является рабочее место, представляющее собой в общем случае пространство, в котором может находиться человек при выполнении производственного процесса. Рабочее место является основной подсистемой производственного процесса.

Основные требования к размерам и конструкции рабочего стула в зависимости от вида выполняемых работ установлены в ГОСТ 12.2.032—78 и ГОСТ 21889-76. Рабочее место для выполнения работ сидя организуют при легкой работе, не требующей свободного передвижения работающего. Конструкция рабочего места и взаимное расположение всех его элементов (сиденье, органы управления, средства отображения информации и т. д.) должны соответствовать антропометрическим, физиологическим и психологическим требованиям, а также характеру работы.

Компоновка рабочих столов, стеллажей и другой мебели подобрана таким образом, чтобы не создавать заторов и препятствий при

эвакуации людей из помещения во время возникновения чрезвычайных ситуаций.

Согласно СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 «Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы» экран видеомонитора должен находиться от глаз пользователя на оптимальном расстоянии 600-700 мм, но не ближе 500 мм с учетом размеров алфавитно-цифровых знаков и символов.

Согласно ГОСТ 12.2.032-78 рабочее место должно быть по высоте таким, чтобы при выполнении исследований и проведении расчетов и обработке данных не было необходимости сгибать корпус или приседать.

Рациональный режим чередования труда и отдыха снижает утомляемость и травматизм, повышает производительность труда. В работе, требующей тонкой координации движений и не столько физического, сколько нервного напряжения, желательны короткие (3...5 мин) частые перерывы. Для борьбы с монотонностью работы, которая ускоряет наступление усталости и приводит к быстрому нервному истощению, надо менять ритм работы, позу, вводить кратковременные перерывы и использовать их для упражнений производственной физкультуры.

## **5.2 Производственная безопасность**

### **5.2.1 Анализ вредных и опасных факторов, которые может создать объект исследования**

Самостоятельно объект исследования, а именно титановый сплав Ti-6Al-4V, не сопутствует вредными и опасными факторами. Соответствует всем нормам СанПиНа. Не выделяет токсических веществ, излучения, постороннего запаха, в общем, не подвергает опасности жизнь человека.

Таблица 5.1 - Возможные опасные и вредные факторы

Факторы (ГОСТ 12.0.003-2015)	Этапы работ			Нормативные документы
	Разработка	Изготовление	Испытания	
1.Отклонение показателей микроклимата	+	+	+	Требования к освещению устанавливаются СП 52.13330.2016 Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95 [16]. Требования к уровню шума СН 2.2.4/2.1.8.562–96. Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории застройки[17] Требования к микроклимату устанавливаются СанПиН 2.2.4.548–96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений [18] ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений
2. Превышение уровня шума		+		
3.Отсутствие или недостаток естественного света	+	+	+	
4.Недостаточная освещенность рабочей зоны		+	+	
5.Повышенное значение напряжения в	+	+	+	

электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело человека				прикосновения и токов[19].
6.Контакт с реактивом для травления образцов			+	ГН 2.2.5.3532–18. Предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ в воздухе рабочей зоны. [20]

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

При выполнении данной работы возникает вероятность воздействия таких производственных факторов как: шума, тепловыделений, недостаточной освещенности, электрический ток, физические и эмоциональные перегрузки, умственное перенапряжение.

Все опасные и вредные производственные факторы в соответствии с ГОСТ 12.0.003-74 подразделяются на физические, химические, биологические и психофизиологические.

К физическим факторам можно отнести:

- повышенная запыленность;
- повышенная или пониженная температура воздуха рабочей зоны;
- повышенный уровень шума на рабочем месте;
- опасность поражения электрическим током;

К химическим факторам относится реактив для травления образцов, в состав которого входит 96 %  $H_2O$ , 2 %  $HNO_3$ , 2 %  $HF$  (указаны объемные доли). 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.

К психофизическим факторам можно отнести шумовое воздействие, монотонность работы, умственное перенапряжение и т.п. При подготовке шлифов рабочий выполняет монотонную работу, связанную с однообразным набором последовательных действий, которые могут вызвать возникновение переутомляемости.

### **5.2.2.1 Превышение уровня шума**

Шум — это совокупность звуков, неблагоприятно воздействующих на организм человека и мешающих его работе и отдыху. Шум, возникающий при работе производственного оборудования и превышающий нормативные значения, воздействует на центральную и вегетативную нервную систему человека, органы слуха. Основное физиологическое воздействие шума заключается в том, что повреждается внутреннее ухо, возможны изменения, биоэлектрической активности головного мозга, сердца и скорости дыхания, общей двигательной активности, кровяного давления, сужение кровеносных сосудов, расширение зрачков глаз. Рабочий человек в условиях продолжительного шумового воздействия испытывает раздражительность, головную боль, головокружение, снижение концентрации внимания, повышенную утомляемость. Уровень шума в лабораториях для теоретических работ и обработки данных, не должен превышать 50-60 дБа .

Основными источниками шума при выполнении исследовательской работы в помещении являются принтер, персональные компьютеры, периодическая работа вытяжной системы.

#### **5.2.2.2 Контакт с реактивом для травления образцов**

Вредными являются вещества, которые при контакте с организмом могут вызвать производственные травмы, профессиональные заболевания или отклонения в состоянии здоровья, как в процессе работы, так и в отдалённые сроки жизни настоящего и последующего поколений.

При выполнении работы для исследования образцов, в лаборатории используется реактив для травления образцов, который является едким веществом, по степени воздействия на организм человека относится к веществам 3-го класса опасности. Как оговаривалось выше, раствор для травления вызывает сильные ожоги при контакте с кожей, пары поражают слизистые оболочки. В качестве защиты от вредного воздействия вещества рабочим выдаются средства индивидуальной защиты: стерильные диагностические латексные перчатки, маску 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. При проглатывании раствора келлера показано промывание желудка обильным количеством воды, инъекции морфина, атропина

### 5.2.2.3 Отклонение показателей микроклимата

Микроклимат это комплекс метеорологических условий в помещении: температура, относительная влажность, воздухообмен, скорость движения воздуха, содержание в воздухе твердых частиц (пыли), наличие запахов и др.

Оптимальными для микроклимата жилых и общественных помещений в тёплое время года считаются: температура воздуха 22-25° С, относительная влажность 40-60 %, скорость движения воздуха не более 0,25 м/с; в холодное время года эти показатели составляют соответственно 20-22° С, 30-45 % и 0,1-0,15 м/с.

В таблица 5.2 – Допустимые параметры микроклимата на рабочем месте (СанПиН 2.2.4.548-96).

Таблица 5.2

Период года	Температура воздуха, °С		Температура поверхности, °С	Относительная влажность воздуха, %	Скорость движения воздуха, м/с	
	Диапазон ниже оптимальных величин	Диапазон выше оптимальных величин			Ниже оптимально величины не более	Выше оптимальной величины не более
Холодный	17,0-18,9	21,1-23,0	16,0-24,0	15-75	0,1	0,3
Теплый	18,0-19,9	22,1-27,0	17,0-28,0	15-75	0,1	0,4

Температура в рабочей зоне поддерживается отоплением в холодный период и вентиляцией в теплый период.

#### **5.2.2.4 Отсутствие или недостаток естественного света.**

##### **Недостаточная освещенность рабочей зоны**

Освещение исключительно важно для человека. С помощью зрения человек получает большую часть информации (около 90 %), поступающей из окружающего мира, напрямую в головной мозг. Свет — это ключевой элемент нашей способности видеть, оценивать форму, цвет и перспективу окружающих нас предметов. Освещение влияет не только на функционирование зрительного аппарата, то есть определяет зрительную работоспособность, но и на психику человека, его эмоциональное состояние. Различными исследователями накоплено огромное количество исследовательских данных по биологическому воздействию видимого света на организм. Установлено, что свет, помимо обеспечения зрительного восприятия, воздействует через нервную оптико-вегетативную систему на эндокринную систему, и влияет на многие основные процессы жизнедеятельности, регулируя обмен веществ и устойчивость к воздействию неблагоприятных факторов окружающей среды. Сравнительная оценка естественного и искусственного освещения по его влиянию на работоспособность показывает преимущество естественного света. Ведущим фактором, определяющим биологическую неадекватность естественного и искусственного света, является разница в спектральном составе излучения, а также динамичность естественного света в течение дня. Уровни освещённости при этом должны составлять 1000-1500 лк, и могут быть обеспечены дневным светом, если он имеется, или электрическим светом от общего или локализованного освещения, например настольных ламп или комбинацией дневного и естественного света. Работая при освещении плохого качества или низких уровней, люди могут ощущать усталость глаз и переутомление, что приводит к снижению работоспособности и уменьшению концентрации внимания. В ряде случаев это может привести к головным болям. Причинами во многих случаях являются слишком низкие уровни

освещенности, слепящее действие источников света и соотношение яркостей, которое недостаточно хорошо сбалансировано на рабочих местах.

#### *Расчет искусственного освещения.*

Самым распространенным источниками света на рабочем месте являются люминесцентные лампы. В помещении лаборатории используются люминесцентная лампа ШОД. ШОД - для нормальных помещений с хорошим отражением потолка и стен, допускается при умеренной влажности и запыленности.

Основные требования и значения нормируемой освещенностей рабочих поверхностей изложены в строительных нормах и правилах СП 52.13330.2011, выбор освещенности осуществляется в зависимости от размера объекта различения, контраста объекта с фоном, характеристики фона. Для того чтобы установить в каждом конкретном случае все перечисленные предметы, необходимо знание особенностей зрительной задачи на данном рабочем месте.

При работе с персональным компьютером в сочетании с работой с нормативной и технической документацией согласно нормам СП 52.13330.2011 регламентируется максимальная искусственная освещенность рабочих мест. Первый подразряд зрительной работы.

Получение из СП 52.13330.2011 величина освещенности корректируется с учетом коэффициента запаса, т.к. со временем за счет загрязнения светильников и уменьшения светового потока ламп снижается освещенность. Значение коэффициента запаса, выбираемого для помещения с малым выделением пыли, при люминесцентных лампах  $KЗ = 1,5$ .

#### *Естественное освещение.*

Помещения с постоянным пребыванием людей должны иметь, как правило, естественное освещение. Без естественного освещения допускается

проектировать помещения, которые определены соответствующими главами СНиП на проектирование зданий и сооружений, нормативными документами по строительному проектированию зданий и сооружений отдельных отраслей промышленности, утвержденными в установленном порядке, а также помещения, размещение которых разрешено в подвальных этажах зданий и сооружений. Естественное освещение подразделяется на боковое, верхнее и комбинированное (верхнее и боковое). Нормированные значения КЕО (коэффициента естественной освещенности) для зданий, располагаемых в различных районах, следует определять по формуле:

$$e_N = e_H m_N \quad (5.1)$$

где N - номер группы обеспеченности естественным светом;  $e_H$  - значение КЕО;

$m_H$  - коэффициент светового климата. Соответственно, при  $e_H=1$ ,  $m_H=0,75$ .

$$e_N=1 * 0,75 = 0,75$$

При верхнем или комбинированном естественном освещении помещений любого назначения нормируется среднее значение КЕО в точках, расположенных на пересечении вертикальной плоскости характерного разреза помещения и условной рабочей поверхности (или пола). Первая и последняя точки принимаются на расстоянии 1 м от поверхности стен (перегородок) или осей колонн.

### **5.2.3 Анализ опасных факторов**

#### **5.2.3.1 Повышенное значение напряжения в электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело человека**

Опасное и вредное воздействия на людей электрического тока, электрической дуги и электромагнитных полей проявляются в виде электротравм и профессиональных заболеваний. Степень опасного и вредного воздействия на человека электрического тока, электрической дуги и электромагнитных полей зависит от:

- рода и величины напряжения и тока;
- частоты электрического тока;
- пути тока через тело человека;
- продолжительности воздействия электрического тока или электромагнитного поля на организм человека;
- условий внешней среды [13].

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. пожарная нагрузка относительно мала.

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.

### **5.2.3.2 Обоснование мероприятий по защите исследователя от действия опасных и вредных факторов**

При выходе на новую работу с каждым с сотрудником проводится инструктаж по технике безопасности, что сразу фиксируется в соответствующем журнале.

Каждый сотрудник знакомится с правилами оказания первой помощи при поражениях электрическим током, в помещении лаборатории находится аптечка со всеми необходимыми медикаментами. На стене вывешивается инструкция по технике безопасности, план эвакуации при пожаре.

Основные меры по технике безопасности на рабочем месте:

1. К работе с электроустановками допускаются лица, имеющие третью либо четвертую группу допуска, устанавливаемые квалификационной комиссией.

2. Лица, не имеющие непосредственного отношения к обслуживанию электроустановок, к работе с ними не допускаются.

3. Все питающие части должны быть заземлены. Сопротивление заземления должно не превышать 40м.

4. Для исключения поражения электрическим током запрещается: часто включать и выключать компьютер без необходимости, прикасаться к экрану и к тыльной стороне блоков компьютера, работать на средствах вычислительной техники и периферийном оборудовании мокрыми руками, работать на средствах вычислительной техники и периферийном оборудовании, имеющих нарушения целостности корпуса, нарушения изоляции проводов, неисправную индикацию включения питания, с признаками электрического напряжения на корпусе, класть на средства вычислительной техники и периферийном оборудовании посторонние предметы.

5. Запрещается под напряжением очищать от пыли и загрязнения электрооборудование.

6. Запрещается проверять работоспособность электрооборудования в непригодных для эксплуатации помещениях с токопроводящими полами, сырых, не позволяющих заземлить доступные металлические части.

7. Недопустимо под напряжением проводить ремонт средств вычислительной техники и оборудования. Ремонт электроаппаратуры производится только специалистами-техниками с соблюдением необходимых технических требований.

8. Во избежание поражения электрическим током, при пользовании электроприборами нельзя касаться одновременно каких-либо трубопроводов, батарей отопления, металлических конструкций, соединенных с землей. 1

9. При приближении грозы необходимо оперативно закончить работу на компьютере и отключить его от сети во избежание повреждения последовательного порта и исключения сбоев при возможных скачках напряжения в сети, характерных в подобных случаях.

### **5.3 Экологическая безопасность**

Любое предприятие, осуществляющее свою деятельность в сфере создания материальных благ, в процессе работы наносит тот или иной вред окружающей среде. Это производственные отходы, которые необходимо утилизировать, вредные газы, выделяемые при осуществлении технологического процесса, сточные воды.

Основными факторами, обуславливающим необходимость обращения особого внимания вопросам охраны окружающей среды, являются следующие:

– токсичность или другое физиологическое действие порошков ряда металлов и неметаллов, газов применяемых в производстве;

– взрывоопасность и пожароопасность некоторых материалов и газов;

– слив кислот, щелочей, солей отходов вредных веществ в общую систему канализации;

– пыль на рабочем месте.

В настоящее время на первый план выдвигаются задачи борьбы с загрязнением атмосферы, так как от их решения в значительной мере зависит здоровье людей. Охрана атмосферы включает в себя:

– уменьшение и полное прекращение выбросов вредных веществ в атмосферу;

– сохранение и увеличение биомассы производителей кислорода и поглотителей углекислоты;

– сохранение и восстановление оптимальной циркуляции атмосферы в региональном масштабе;

– утилизация отходов вредных производств.

В настоящее время нет какого-либо кардинального способа позволяющего решить проблему загрязнения атмосферы. Однако существует, ряд мер, которые в комплексе позволяют существенно снизить степень загрязнения воздуха. Основными мерами, которые необходимо предусмотреть при проектировании и строительстве новых реконструкций и расширение действующих производств являются совершенствование их технологии, обеспечивающей сокращение выбросов и оснащение их современным оборудованием и пылеуловительной аппаратурой по очистке газов, дымовых и вентиляционных выбросов.

Важнейшим направлением уменьшением выбросов и экономии капитальных затрат является максимально возможная утилизация тепла в промышленности.

Совершенствование техники газоочистителей повышает степень очистки выбросов. Для обезвреживания выделяемых производствами органических растворителей применяются адсорбционные методы, которые наряду с полным извлечением примесей из газов обеспечивают и их рекуперацию.

В лаборатории в процессе работы образуются такие вещества как пыль, и аэрозоли. Для их удаления применяют вытяжную вентиляцию, для снижения выбросов этих веществ в атмосферу применяются фильтры.

Вследствие использования работниками душевых, туалетов, специальных веществ для обработки материалов, а так же средств хозяйственного назначения, образуются жидкие отходы для удаления которых применяют канализационную систему. Система канализации подсоединена к городской канализационной сети, поэтому полная очистка сточных вод на нем не проводится.

Также из-за использования обтирочных материалов образуются твердые отходы, для которых предусмотрены места хранения, и в конце рабочего дня они очищаются. При удалении отходов с территории предприятия им присваиваются категории опасности и вывозятся на соответствующие полигоны (промышленных отходов, токсичных отходов и т.д.).

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

Возможные чрезвычайные ситуации при выполнении проекта являются: поражение электрическим током, замыкание электрической цепи,

и как следствие, пожар. Для предотвращения чрезвычайной ситуации необходимо осуществлять меры по технике безопасности на рабочем месте.

Пожар – это неконтролируемый процесс горения, причиняющий материальный ущерб, вред жизни и здоровью человека, интересам общества и государства.

К основным причинам возникновения пожаров можно отнести: неосторожное обращение с огнём; несоблюдение правил эксплуатации производственного оборудования и электрических устройств; самовозгорание веществ и материалов; разряды статического электричества; грозовые разряды; поджоги.

Опасные факторы пожара, воздействующие на людей:

- высокая температура среды в зоне горения, открытый огонь, искры;
- дымообразование, токсичные продукты горения;
- пониженная концентрация кислорода в зоне пожара за счет его роли как окислителя в химических реакциях при горении;
- обрушение конструкций здания, падение обгоревших предметов;
- вероятность взрыва.

Высокая температура в зоне горения может привести к ожогам или обгоранию кожного покрова тела, вызвать потерю несущей способности строительных конструкций зданий и сооружений, и как следствие их обрушение.

Дымообразование, как сопутствующая характеристика пожара, чрезвычайно опасно для человека. Дым — это сложная смесь газообразных и мелкодисперсных продуктов горения. Вдыхание продуктов горения приводит к острым отравлениям и необратимым последствиям.

На рабочем месте целесообразно проводить комплекс мероприятий направленных на пожарную безопасность. Используемый технологический процесс согласно техническому регламенту о требованиях пожарной безопасности относится к категории Д, так как использует негорючие вещества в холодном состоянии. В данном случае источникам возгорания может оказаться неисправность и неправильная эксплуатация электроустановок.

Существует 5 степеней огнестойкости зданий, сооружений. Помещение лаборатории можно отнести к первой ступени огнестойкости. Предусмотренные средства пожаротушения (согласно требованиям противопожарной безопасности СНиП 2.01.02.-85) огнетушитель ручной углекислотный ОУ-5, пожарный кран с рукавом и ящик с песком (в коридоре). Кроме того, каждое помещение оборудовано системой противопожарной сигнализации.

Пожар - одно из самых страшных бедствий. Он беспощаден. Возгорание, как правило, происходит очень быстро, и потушить его не всегда удается. Поэтому действия при пожаре прописаны в инструкции, которую каждый гражданин должен знать. На предприятиях специально проводятся мероприятия по защите населения от этой чрезвычайной ситуации. Действия персонала при пожаре на предприятии:

- услышав крики: "Пожар", ни в коем случае не поддаваться панике, сохранять спокойствие;
- осмотреться вокруг. Заметив телефон или кнопку пожарной безопасности, действовать незамедлительно - сообщить службам о возгорании;
- попробовать самостоятельно потушить возгорание, используя огнетушитель, землю;

- если ликвидировать пожар не получается, покинуть помещение через эвакуационный выход;
- не поддаваться панике, стараться успокоить других;
- двигаться к выходу, дышать через рукав одежды или носовой платок;
- если в помещении сильная задымленность, перемещаться, опираясь на стены или поручни;
- оказавшись на свежем воздухе, немедленно вызвать "Скорую помощь".

Основными мероприятиями, обеспечивающими успешную эвакуацию людей и имущества из горящего здания, являются:

- составление планов эвакуации;
- назначение лица, ответственного за эвакуацию, которое должно следить за исправностью дверных проемов, окон, проходов и лестниц;
- ознакомление работающих в лаборатории сотрудников с планом эвакуации, который должен висеть на видном месте.

### **Вывод по разделу**

В данном разделе были рассмотрены и проанализированы опасные и вредные факторы, которые могут оказывать воздействие на обслуживающий персонал исследовательской лаборатории, а также средства защиты от этих факторов. При выполнении исследовательской работы в лаборатории существует вероятность воздействия таких вредных производственных факторов, как повышенный уровень шума, повышенное значение напряжения в электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело человека, недостаточная освещенность, контакт человека с реактивом для травления образцов, отклонение показателей микроклимата. В

результате анализа были предложены решения, обеспечивающие снижение влияния выявленных опасных и вредных факторов на работающих. Даны рекомендации по обеспечению оптимальных условий труда и охране окружающей среды.

Кроме того, был произведен анализ наиболее вероятных чрезвычайных ситуаций, которые могут возникнуть в ходе исследования, и предложены превентивные меры по предупреждению их возникновения, а именно возникновение пожара на рабочем месте.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе изучены особенности формирования микроструктуры титанового сплава Ti-6Al-4V при многопроходной вакуумной электронно-лучевой наплавке. Исследована эволюция микроструктур образцов из сплава Ti-6Al-4V, изготовленных послойным выращиванием посредством электроннолучевой проволочной аддитивной технологии. На основе полученных данных сделаны следующие выводы.

1. Исследованные образцы имеют гетерогенную микроструктуру, которая включает в себя помимо формирующихся в процессе эпитаксиального роста столбчатых предшествовавших  $\beta$ -зерен со средним размером не выше 1,5 мкм систему ортогональных пластин мартенситной  $\alpha'$ -фазы. При этом по направлению в вершине построенного образца уменьшается толщина пластин  $\alpha'$ -фазы и количество остаточной  $\beta$ -фазы (от 4 мкм и 10 об.% для нижнего слоя до 2 мкм и 5 об.% – для верхнего).

2. Обнаружен эффект повышения значений твердости по Виккерсу с ростом высоты наплавленных слоев до значений порядка 3,5 ГПа. Сопоставление с соотношением Холла–Петча показывает, что эффект повышения твердости в направлении послойного выращивания реализуется за счет градиентной микроструктуры, формирующейся вследствие сложной термической истории.

## Список использованной литературы

1. Зленко, М.А. Аддитивные технологии в машиностроении : пособие для инженеров / М.А. Зленко, М.В. Нагайцев, В.М. Довбыш. – М.: ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ», 2015. – 220 с.
2. Whittaker D. Developments in the additive manufacturing of titanium at PM Titanium 2015 / D. Whittaker // Metal Additive Manufacturing, Autumn/Fall. – 2015. – Vol. 1, №3.– P. 53–60.
3. Ильин А.А., Колачев Б.А., Польшкин И.С. Титановые сплавы. Состав, структура, свойства. Справочник. - М.: ВИЛС-МАТИ, 2009. - 520 с.
4. Солонина О.П., Глазунов С.Г. Титановые сплавы. Жаропрочные титановые сплавы. – М.6 Металлургия, 1976.
5. Dutta B. The additive manufacturing (AM) of titanium alloys / B. Dutta, Francis H. Froes // Titanium Powder Metallurgy. 2015. P. 447
6. И.Ю. Бакеев, Ю.А. Бурачевский, В.А. Бурдовицин, И.В.Осипов, А.Г. Рау, Г.В. Семенов. Установка электронно-лучевого выращивания металлических изделий. «ТУСУРу – 55 лет: Некоторые итоги».2017, 76с.
7. Электронно-лучевая плавка (EBM) [Электронный ресурс]:URL: [http://3dtoday.ru/wiki/EBM\\_print/](http://3dtoday.ru/wiki/EBM_print/)
8. А.А. Елисеев, Е.А. Колубаев, А.В. Боронцов. Мультипучковая электронно-лучевая технология для высокопроизводительного аддитивного производства крупногабаритных металлических изделий. «НИ ТПУ».2018, 16с.
9. Д.Н. Трушников, Ю.Д. Щицын, Д.С. Белинин. Послойный синтез материалов в вакууме на основе плавления присадочной проволоки электрической дугой: Пермский национальный исследовательский политехнический университет, журнал «Аддитивные технологии».2018, 24с.
10. Аддитивные технологии. Журнал об аддитивном производстве [Электронный ресурс] :URL: <https://additiv-tech.ru/publications/materialy-dlya-additivnogo-proizvodstva.html>

11. Аддитивное производство (АП). Additive Manufacturing (AM) [Электронный ресурс] :URL: <http://www.tadviser.ru/a/394648>
12. Титан VT6. [Электронный ресурс] :URL: [http://metallicheckiy-portal.ru/marki\\_metallov/tit/VT6](http://metallicheckiy-portal.ru/marki_metallov/tit/VT6)
13. Фазовые превращения в титановых сплавах. [Электронный ресурс] :URL: <http://www.ticom-m.ru/O-titane-i-titanovyh-splavah/Fazovye-prevrashcheniya-v-titanovyh-splavah>
14. Магистерская диссертация «Разработка рекомендаций по внедрению аддитивных технологий в российское металлургическое производство». [Электронный ресурс] :URL: [http://elar.urfu.ru/bitstream/10995/61446/1/m\\_th\\_i.a.sokolov\\_2018.pdf](http://elar.urfu.ru/bitstream/10995/61446/1/m_th_i.a.sokolov_2018.pdf)
15. Сомонов В. В. Прямое лазерное выращивание из титановых сплавов: сравнение методов получения изделий из порошка и проволоки [Текст] // Технические науки: проблемы и перспективы: материалы VI Междунар. науч. конф. (г. Санкт-Петербург, июль 2018 г.). — СПб.: Свое издательство, 2018. — С. 44-50.
16. Е.А. Левашов, А.С. Рогачев, В.И. Юхвид, И.П. Боровинская. Физико-химические и технологические основы самораспространяющегося высокотемпературного синтеза. — М.: Бином, — 1999, — 176 с.
17. Попов А.А., Илларионов А.Г., Россина Н.Г., Гриб С.В., Металловедение и термообработка сплавов титана. Структура и свойства: учебное пособие. — Екатеринбург. : УрФУ, — 2013. — 268 с.
18. The origin of microstructural diversity, texture, and mechanical properties in electron beam melted Ti-6Al-4V / S.S. Al-Bermani, M.L. Blackmore, W. Zhang, I. Todd // Metallurgical and Materials Transactions A. — 2010. — Vol. 41, iss. 13. — P. 3422–3434. — doi: 10.1007/s11661-010-0397-x.
19. Microstructures and mechanical properties of electron beam-rapid manufactured Ti-6Al-4V biomedical prototypes compared to wrought Ti-6Al-4V L.E. Murr, E.V. Esquivel, S.A. Quinones, S.M. Gaytan, M.I. Lopez, E.Y. Martinez, F. Medina, D.H. Hernandez, E. Martinez, J.L. Martinez, S.W. Stafford,

D.K. Brown, T. Hoppe, W. Meyers, U. Lindhe, R.B. Wicker // *Materials Characterization*. – 2009. – Vol. 60, iss. 2. – P. 96–105. – doi: 10.1016/J.MATCHAR.2008.07.006.

20. *Hrabe N., Quinn T.* Effects of processing on microstructure and mechanical properties of a titanium alloy (Ti–6Al–4V) fabricated using electron beam melting (EBM), part 1: Distance from build plate and part size // *Materials Science and Engineering A*. – 2013. – Vol. 573. – P. 264–270. – doi: 10.1016/J.MSEA.2013.02.064.

21. Anisotropy and heterogeneity of microstructure and mechanical properties in metal additive manufacturing: a critical review / Y. Kok, X.P. Tan, P. Wang, M.L.S. Nai, N.H. Loh, E. Liu, S.B. Tor // *OBRABOTKA METALLOV* Vol. 20 No. 4 2018 69 *MATERIAL SCIENCE Materials and Design*. – 2018. – Vol. 139. – P. 565–586. – doi: 10.1016/j.matdes.2017.11.021.

22. *Basak A., Das S.* Epitaxy and microstructure evolution in metal additive manufacturing // *Annual Review of Materials Research*. – 2016. – Vol. 46. – P. 125–149. – doi: 10.1146/annurev-matsci-070115-031728.

23. *Karimzadeh F., Ebnonnasir A., Foroughi A.* Artificial neural network modeling for evaluating of epitaxial growth of Ti6Al4V weldment // *Materials Science and Engineering: A*. – 2006. – Vol. 432, iss. 1–2. – P. 184–190. – doi: 10.1016/J.MSEA.2006.05.141.

24. *Stanford N., Bate P.S.* Crystallographic variant selection in Ti–6Al–4V // *Acta Materialia*. – 2004. – Vol. 52, iss. 17. – P. 5215–5224. – doi: 10.1016/J.ACTAMAT.2004.07.034.

25. *Roy L.* Variation in mechanical behavior due to different build directions of Ti6Al4V fabricated by electron beam: a thesis / The University of Alabama. Tuscaloosa, 2013. – URL: <https://ir.ua.edu/handle/123456789/1891> (accessed: 07.11.2018).

26. *Baufeld B., Brandl E., Biest O.* Wire based additive layer manufacturing: comparison of microstructure and mechanical properties of Ti–6Al–4V components fabricated by laser-beam deposition and shaped metal deposition //

Journal of Materials Processing Technology. – 2011. – Vol. 211. – P. 1146–1158.  
– doi: 10.1016/j.jmatprotec.2011.01.018.

27. Intra-layer closed-loop control of build plan during directed energy additive manufacturing of Ti–6Al–4V / A.R. Nassar, J.S. Keist, E.W. Reutzel, T.J. Spurgeon // Additive Manufacturing. – 2015. – Vol. 6. – P. 39–52. – doi: 10.1016/j.addma.2015.03.005.

28. The effects of forced interpass cooling on the material properties of wire arc additively manufactured Ti6Al4V alloy / B. Wu, Z. Pan, D. Ding, D. Cuiuri, H. Li, Z. Fei // Journal of Materials Processing Technology. – 2018. – Vol. 258. – P. 97–105. – doi: 10.1016/j.jmatprotec.2018.03.024.

29. Deformation characteristics of age hardened Ti-6Al-4V / G. Welsch, G. Lütjering, K. Gazioglu, W. Bunk // Metallurgical Transactions A. – 1977. – Vol. 8, iss. 1. – P. 169–177. – doi: 10.1007/BF02677278.

30. Correlation between tensile strength and hardness of electron beam welded TC4-DT joints / W. Lu, Y. Shi, X. Li, Y. Lei // Journal of Materials Engineering and Performance. – 2013. – Vol. 22, iss. 6. – P. 1694–1700. – doi: 10.1007/s11665-012-0469-8.

31. Ильин А.А., Колачев Б.А., Полькин И.С. Титановые сплавы. Состав, структура, свойства. Справочник. - М.: ВИЛС-МАТИ, 2009. - 520 с.

32. Солонина О.П., Глазунов С.Г. Титановые сплавы. Жаропрочные титановые сплавы. – М.6 Metallurgia, 1976.

33. Dutta B. The additive manufacturing (AM) of titanium alloys / B. Dutta, Francis H. Froes // Titanium Powder Metallurgy. 2015. P. 447–468.

34. Зленко М.А., Попович А.А., Мутылина И.Н. Аддитивные технологии в машиностроении. Изд-во СПбГУ, 2013, 221 с.

35. Илларионов А.Г. Технологические и эксплуатационные свойства титановых сплавов: учебное пособие / Попов А.А. – Екатеринбург : Урал. ун-та, 2014. – 137 с.

36. Зайнудинов А.М., Александров Ю.Б. Перспективы использования 3D-печати в авиастроении. Международный научно-исследовательский журнал. №5 2015. 64-65 с.

37. Зленко М.А., Аддитивные технологии в машиностроении /Нагайцев.М.В, Довбыш В.М. // пособие для инженеров. – М.ГНЙ РФ ФГУА «НАМИ» 2015. 220 с.

38. Xiaoqing Wang. Scanning speed effect on mechanical properties of Ti–6Al–4V alloy processed by electron beam additive manufacturing / Xiaoqing Wang, Xibing Gong, Kevin Chou // 43rd Proceedings of the North American Manufacturing Research Institution of SME. – 2015. – Vol. 1. – P. 287–295.

39. Medical applications of titanium and its alloys: the material and biological issues. – American Society for Testing and Materials, USA, 1996. – 475 p.

40. Heintz P. et al. Cellular Ti–6Al–4V structures with interconnected macro porosity for bone implants fabricated by selective electron beam melting //Acta biomaterialia. – 2008. – Vol. 4. №. 5. – P. 1536-1544.

41. С.В. Ахонин, Э.Л. Врижижевский, В.Ю.Белоус, И.К.Петриченко. 3D электронно-лучевая наплавка титановых деталей // автоматическая сварка №5-6. 2016. 141-144 с. 87

42. Ненад Драганович Симич-Лафицкий. Селективное электронно-лучевое плавление титанового сплава ВТ6. «Студенческая научная весна 2014: Машиностроение технологии». 2014, 220-226 с.

43. Вульф Б.К. «Термическая обработка титановых сплавов», металлургия, 1969 – 376 с.

## Приложение А

Раздел №1  
Литературный обзор

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4АМ7К	Соловьёва А.С.		

Консультант школы отделения (НОЦ)

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОМ ИШНПТ	Сорокова С.Н.	к.ф.-м.н.		

Консультант – лингвист отделения (НОЦ) школы

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Начальник отдела международных программ и грантов	Рыбушкина С.В.			

# 1 LITERATURE REVIEW

## 1.1 Electron-beam additive technologies

At the moment, the engineering industry doesn't have fully automated equipment in all production facilities. The participation of people is required at almost all stages, as a result there is high labor costs, slow speed, and corruption. According to the number of accidents at work, engineering is one of the most dangerous professional fields for people. The possibility of producing complex-shaped products, without spending time on adjusting the technological process for each component, and cost-effective material consumption caused great interest to the creation and implementation of 3D printing technologies in the machine-building areas.

3D printing or "additive manufacturing" is the process of creating integral three-dimension objects of any geometric shape based on the basis of a digital model. The additive technology is based on the concept of an object constructing by applying a layer by layer, that displays the outlines of the model. In fact, 3D printing totally differs from the traditional methods of mechanical production and processing, such as milling or cutting, where the appearance of the product is formed by removing excess material (the so-called "subtractive production"). 3D printers are software-controlled machines that build a component in an additive way.

Although the technology of 3D printing appeared in the 80s of the last century, 3D printers were widely commercialized only in the early 2010s. The first able to function 3D printer was created by Charles Hall, one of the founders of 3D Systems Corporation.

**Electron beam melting** refers to the technology of additive manufacturing and is the most advanced one among other 3D printing technologies.

Electron beam melting (EBM) is similar to selective laser melting (SLM) - the main difference lies in using of high-energy electrons beam instead of a laser as a source of energy for melting. EBM technology differs from selective laser sintering (SLS) and direct laser sintering of metals (DMLS) in that the last one often requires firing after printing to achieve maximum strength characteristics. In comparison with SLS, SLM and DMLS, EBM has a higher building speed due to a higher power of emitters and electronic, rather than electromechanical deflection of beams.

To date, the printing of fully functional metal products is carried out by layer-by-layer material buildup with molten metal powder or wire, both by laser radiation and by an electron beam. A non-porous monolithic material is formed while surfacing by an electron beam, the mechanical properties of which are comparable to those ones, produced by traditional casting and forging, and in some cases even surpass them.

Consider a little more detail of the powder and wire electron beam surfacing technology.

#### *Powder electron beam surfacing.*

The technology is based on the use of high-power electron beams for alloying metal powder in a vacuum chamber with the formation of successive layers that follow the contours of a digital model.

The device reads data from a file, that contains a 3D model. After that, a special platform is poured or sprayed a dose of powder material, which is leveled with a roller or knife. According to the coordinates, obtained from the computer model, the surface of the powder is bombarded by electrons using an electron beam gun, tracing the outlines of the model layers. At this time, a sufficient amount of heat is generated, melting the powder at the points of contact. At the same time, part of the metal powder remains intact. The platform goes down and

the process repeats. The figure schematically shows the electron beam surfacing set with powder technology of details manufacturing.

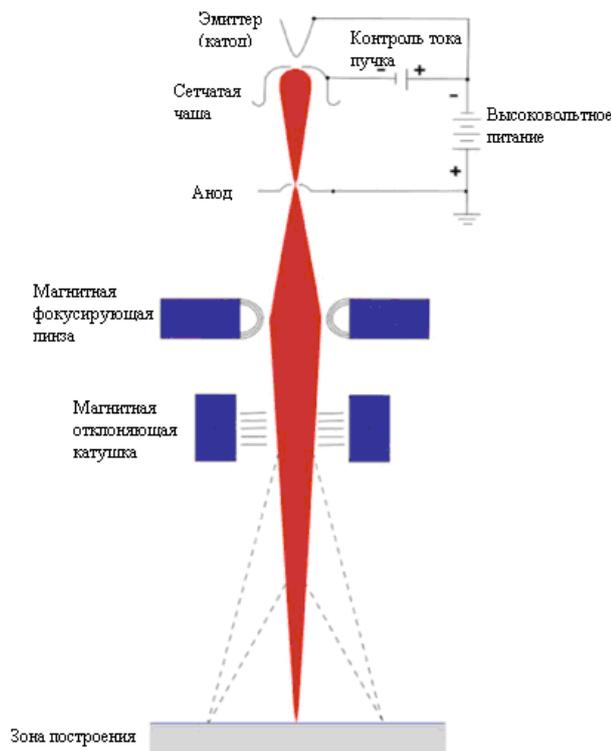


Figure 1.1- Electron-beam surfacing set with powder technology of details manufacturing.

Electron-beam melting is carried out in vacuum working chambers with elevated background temperatures, reaching up to 700-1000 ° C, this allows to create details that do not suffer from residual mechanical stress caused by the temperature gradient between the already cooled and still hot layers, as well as to work with materials, sensitive to oxidation - for example, with pure titanium. In addition, the complete melting of the consumable powder allows to produce solid products – as a result we have the maximum strength and there is no need for firing. Another feature of such devices is the possibility to simultaneous "irradiating" of several parts of the workpiece, which speeds up the manufacturing process.

The consumable material for EBM is usually a metal powder, usually these are titanium alloys, that are grounded to the powder with the help of ball mills. But sometimes other metals are used to obtain any specific properties.

Consumables consist of pure metal powder without binder filler, and finished models do not have porosity. Thus, the printed model doesn't require burning to achieve the required mechanical strength.

The main disadvantage of using this technology is the undeveloped structure of manufacturing (this process is situated at an experimental level) and the promotion of Russian powders on the economic market. Powders have to be bought on the foreign market at a very high price.

*Electron beam wire deposition.*

The technology consists in layer-by-layer deposition of metal in the form of a wire / rod, melted using electron-beam guns, to obtain high-precision billets, as close as possible to the parameters to the final products. The competitive advantages of the technology are high formation rate of products - up to 12 kg / h, unattainable for other technologies of additive production of metal products (Ding D., 2015). The technology makes it possible to produce large-sized (up to 5000 mm) metal products, including from refractory and high-temperature alloys, with high density and uniformity (Lewandowski J.J., 2015).

The high repeatability of the results of the technology of electron-beam surfacing, together with the flexibility of process control, allows the formation of parts with the necessary structure and desired properties. As well as the technology of electron-beam additive surfacing can be carried out in an air atmosphere, which greatly simplifies the equipment of the equipment. The electron beam creates a molten metal bath on the part surface. The weld piece moves relative to the fixed electron gun and wire metering unit, or the electron gun with the metering unit moves relative to the fixed part.

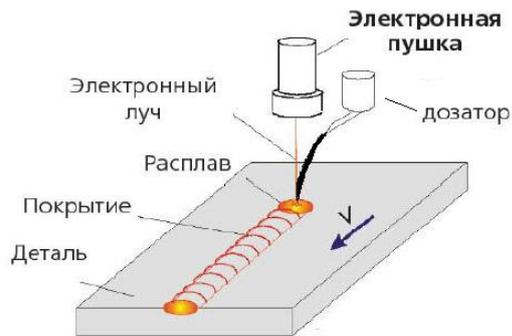


Figure 1.2 - The principle of electron-beam wire additive technology

The technology of multipass electron-beam surfacing is based on the phenomenon of "freezing" of the wire in the liquid-metal bath of the melt. With each subsequent pass, a new portion of the metal is "frozen" and the previous one is melted. The wire fed into the liquid metal bath of the melt, accelerates the process of its crystallization, thus contributing to the formation of fine-grained structure and reduction of residual stresses in the weld metal. The required thickness of the deposited layer is achieved by changing the wire feed speed or increasing the number of passes. The high rate of crystallization contributes to the formation of a uniform fine structure of the deposited layer.

Most of the currently existing additive manufacturing techniques for metal products are based on the use of powder systems as a starting material for the formation of products. This significantly narrows the range of structural materials from which it is possible to obtain finished products of high quality. In particular, the formation of products from most aluminum alloys, as well as alloys of active metals, such as titanium and magnesium alloys, leads to an increased porosity of the material of the obtained product with a significant decrease in its mechanical characteristics. The productivity of the formation of parts from powder materials in the existing additive technologies is extremely low, which practically excludes the prospects of using these technologies for the production of large-sized products. And after analyzing the market for the consumption of metallic materials for additive technologies, it was found that 1 kg of powder, for example, titanium

alloy costs an average of 200-250 dollars, as a standard wire queue of the same brand (which weighs 5 kg) costs many times cheaper, which is about 50-100 dollars for wire queues.

The formation of metal products using the melting of wire material is a key vector for the development of additive technologies. This solution eliminates the problems associated with the low productivity of existing methods, the high cost of the equipment used, the limited types of materials used, due to the traditional use of powder systems fused with a powerful heat source as the starting material for additive formation. The potential for the development of wire melt forming technology is very large and is not yet fully disclosed in the world.

There are examples of installations in which the part is manufactured in vacuum using an electron beam, which turns out to be a very productive solution for a number of promising materials, in particular, titanium and other chemically active metals and their alloys.

Research in the field of additive technologies, including using wire materials, is intensively carried out by the companies: 3D Systems Corporation (U.S.), 3T RPD (U. K.), Arcam AB (Sweden), Biomedical Modeling, Inc. (U.S.), Envisiontec GmbH (Germany), EOS GmbH Electro Optical Systems (Germany), Fcubic AB (Sweden), GPI Prototype and Manufacturing Services, Inc. (U.S.), Greatbatch, Inc. (U.S.), LayerWise NV (Belgium), Limacorporate SPA (Italy), Materialize NV (Belgium), Medical Modeling, Inc. (U.S.) Norsk Titanium (U.S.), Sciaky (U.S.).

In general, the mechanism of action, as in powder technology, and when the wire is almost the same, except for a small difference in the technological parameters of the process. The use of a vacuum chamber in both technologies allows working with chemically active materials and their alloys, as well as being a protective barrier against harmful x-rays. But in view of the foregoing, we can conclude that the wire additive technology is much more advantageous from the

point of availability of the source material for the manufacture of the final product (part).

## **1.2 Metallic materials used in additive technologies**

Materials are an integral part of additive technology. In 2016, these technologies are capable to process a wide range of homogeneous and heterogeneous materials. A key task in the creation and processing of materials is to improve quality, increase process stability, reproducibility and reliability for a variety of materials while maintaining the low cost of material, installation, manufacturing process and finishing. Traditional manufacturing surely provides reproducibility of structure and properties of materials. The processes of additive manufacturing are more complex, because it is important to obtain an acceptable product quality, the installation parameters must be set individually, and in some cases the structure of the material, properties and performance not only differ from one set to another, but also depend on the location inside one set.

Expanding the range of materials suitable for additive production will require the study of multi-element systems and forms, including alloyed / mixed / composite materials based on iron, nickel, titanium, aluminum, copper and magnesium.

It is possible to manufacture metal details using additive technology from the same material, which was used before, in similar technology.

If the metal shows good property set during welding or casting, it is also suitable for electron beam surfacing. There is a wide range of metals and alloys that can be used in 3d printing, either in the form of powder or in the form of wire.

These include:

- Aluminum
- Cobalt

- Copper
- Nickel
- Precious metals (gold, silver, platinum)
- Stainless steel
- Tantalum
- Titan
- Tool steel
- Tungsten.

Additive manufacturing also provides new opportunities for materials that have not been used in traditional production. For example, some 3d methods of metal printing allow to apply layers of various metals - aluminum, tantalum and nickel - during the manufacture of one detail. On the other hand, the 3d printing process also introduces new problems and possibility of errors, including porosity, residual stresses and strains.

Let us consider in details three metals that are used more often and more prospective.

#### *Additive production with titanium*

Titanium is one of the most popular materials for 3d printing in manufacturing, especially in aerospace and medical applications. It combines the lightness of aluminum with the strength of steel, and it is non-toxic. However, these advantages are confronted by the relatively high titanium cost. Therefore, waste reduction makes the AP an attractive option for titanium details.

Powdered titanium is flammable and explodes with contact with water and at temperatures exceeding 700 ° C. For this reason, 3d printing with titanium powder is performed in vacuum or in argon chambers. 3d printing can also be performed by using the melting of titanium wire with an electron beam, which eliminates the risks of an explosive reaction.

The two most common titanium alloys used in AP are 6Al-4V and 6Al-4V ELI.

### *Aluminum Additive Manufacturing*

Aluminum is a lightweight and multi-purpose metal, it can be used for 3d printing of aerospace components, and parts of racing cars. Although it does not have the strength of steel, aluminum is much lighter than it and more resistant to corrosion. It is also more expensive, but not as much as titanium.

The main advantage of using aluminum in 3d printing is the ability to produce details with small elements and thin walls (up to 50 microns). Aluminum details, made by methods of additive production, have a more textured, matte surface, in contrast to the polished surface in the production of aluminum parts on machine tools

A common aluminum alloy for 3d printing is AlSi10Mg.

### *Cobalt Chrome Additive Manufacturing*

This alloy has a very high specific strength (i.e., strength divided by density, which generally indicates the force required to apply per unit area for rupture). It is more often used in the manufacturing of turbines, dental, and orthopedic implants, wherever 3D printing has become the dominant technology.

### *Additive manufacturing with stainless steel*

Stainless steel can be used for 3d printing of waterproof parts of high strength and density, and used in extreme environments, such as jet engines of aircraft and rockets. Studies have been conducted of the applicability of 316L stainless steel for the production of nuclear reactor vessels using additive technologies. Despite the fact that 316L steel is usually amenable to non-thermal processing, Renishaw's report suggests, that the additive technology process produces more durable alloys in comparison with forging a metal, providing a tensile force greater than 600 MPa. Details of stainless steel are made on a 3d

printer, either by direct metal deposition, or using a composite material with a binder. Details can be coated with another metals to change the appearance or surface properties.

Widespread stainless steel alloys used in additive manufacturing are 17-4PH, 15-5-PH, ASM 316L and 304L.

Taking into account all mentioned above, we will make a choice in favor of the titanium alloy Ti-6Al-4V, which is most suitable for further researches.

### **1.3 Phase transformations of titanium alloys. The main characteristics and properties of the alloy Ti-6Al-4V**

Phase transformations connected with the polymorphism of titanium have decisive influence on the formation of the structure and, therefore, on the properties of titanium alloys. Figure 3 presents scheme of state diagrams of a titanium alloying element, that shows the division of alloying elements into four groups by their influence on the polymorphic transformations of titanium.

*$\alpha$  - Stabilizers* (Al, O, N), which increase the temperature of polymorphic transformation  $\alpha \ll \beta$  and expand the area of solid solutions based on  $\alpha$  - titanium (Figure 3, a). Taking into account the embrittlement effects of nitrogen and oxygen, only aluminum has practical importance for doping titanium. It is the main alloying element in all industrial titanium alloys, it reduces their density and tendency to hydrogen embrittlement, and increases the strength and modulus of elasticity as well. Alloys with a stable  $\alpha$  - structure are not hardened by heat treatment.

*Isomorphic  $\beta$ -stabilizers* (Mo, V, Ni, Ta, etc.), which lower the temperature of the  $\alpha \ll \beta$  transformation and expand the range of solid solutions based on  $\beta$  titanium (Figure 3, b).

*Eutectoid-forming  $\beta$ -stabilizers* (Cr, Mn, Cu, etc.) can form intermetallic compounds like TiX with titanium. In this case, upon cooling, the  $\beta$ -phase undergoes a eutectoid transformation of  $\beta$  into  $\alpha + \text{TiX}$  (Figure 3, c). Most  $\beta$ -stabilizers increases the strength, heat resistance and thermal stability of titanium alloys, slightly reducing their ductility (Figure 4). In addition, alloys with  $(\alpha + \beta)$  and pseudo- $\beta$ -structure can be hardened by heat treatment (quenching + aging).

*Neutral elements* (Zr, Sn) do not have a significant effect on the temperature of polymorphic transformation and do not change the phase composition of titanium alloys (Figure 3, g).

Polymorphic  $\beta$  in  $\alpha$ -transformation can occur in two ways. While slow cooling and high mobility of atoms, it goes by usual diffusion mechanism with the formation of a polyhedral structure of a solid  $\alpha$ -solution. While rapid cooling, it goes by diffusionless martensitic mechanism with the formation of a needle-like martensitic structure, marked  $\alpha'$  or with a greater degree of doping,  $\alpha''$ . The  $\alpha$ ,  $\alpha'$ ,  $\alpha''$  crystal structure is almost of the same type (HCP), but the  $\alpha'$  and  $\alpha''$  lattice is more distorted, and the degree of distortion increases with increasing of alloying elements concentration.

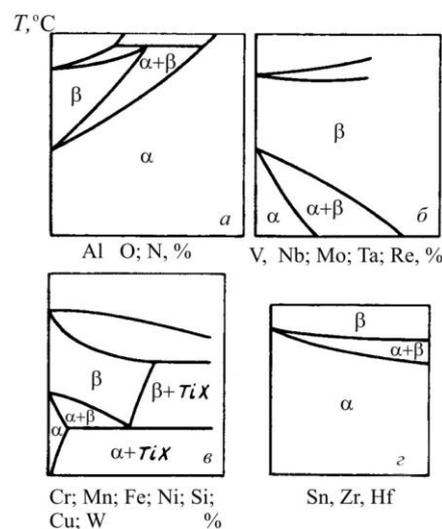


Figure 1.3 - State diagrams of systems "Ti-alloying element" (scheme):

- a) "Ti-a stabilizers";
- b) "Ti-isomorphic b-stabilizers";

c) "Ti-eutectoid b-stabilizers";

d) "Ti-neutral elements"

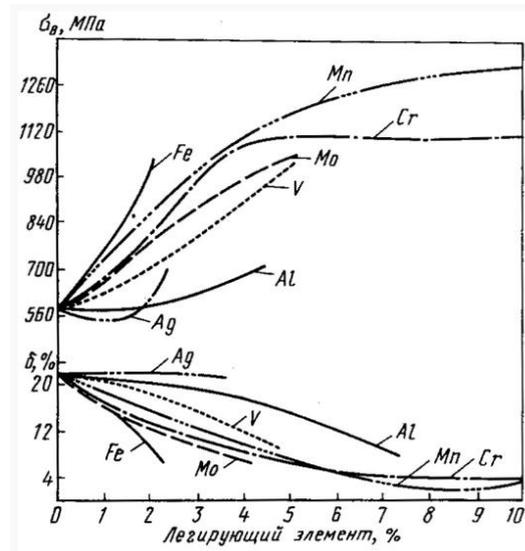


Figure 1.4 - Effect of alloying elements on the mechanical properties of titanium

In contrast to carbon steel martensite, which is a penetration solution and is characterized by high strength and brittleness, titanium martensite is a substitution solution, and quenching titanium alloys on martensite  $\alpha'$  leads to a slight hardening and is not accompanied by a sharp decrease in ductility.

Phase transformations that occur during the slow and rapid cooling of titanium alloys with different content of  $\beta$ -stabilizers, as well as the resulting structures are reflected in the generalized diagram (Figure 5). It is valid for isomorphous  $\beta$ -stabilizers (Figure 3, b) and, with some approximation, for eutectoid-forming  $\beta$ -stabilizers (Figure 3, c), since the eutectoid decomposition in these alloys is very slow and can be neglected.