

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

Школа Инженерная школа ядерных технологий  
 Направление подготовки 03.04.02. Физика  
 Отделение школы (НОЦ) Отделение экспериментальной физики

### МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Влияние объемной доли частиц TiC на микроструктуру и механические свойства композита TiC/Ti-6Al-4V, полученного методом электронно-лучевого плавления проволоки

УДК 620.22-419.8:669.295.5:621.7.048.2-023.871

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
ОБМ81	Буйлук Артем Олегович		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ОЭФ ИЯТШ ТПУ	Панин А.В.	д.ф.-м.н.		

### КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

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

По разделу «Социальная ответственность»

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

### ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

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

Планируемые результаты освоения

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

Р6	Способен планировать проведение аналитических имитационных исследований по профессиональной деятельности с применением современных достижений науки и техники, передового отечественного и зарубежного опыта в области научных исследований, умеет критически оценивать полученные теоретические и экспериментальные данные и делает выводы, знает правовые основы в области интеллектуальной собственности.	Требования ФГОС ВО (ОПК-7,ПК-2, ПК-3, ПК-4, ПК-7), СУОС ТПУ (УК- 2, УК- 6), <i>CDIO Syllabus</i> (2.4), Критерий 5 АИОР (п. 1.1, 1.4, 1.6), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE u FEANI</i>
Р7	Способен применять полученные знания для решения нечетко определенных задач, в нестандартных ситуациях, использует творческий подход для разработки новых оригинальных идей и методов исследования в области физики металлов, материаловедения и термообработки.	Требования ФГОС ВО ( ОПК-4, ОПК-5, ОПК-6,: ПК-2, ПК-5), СУОС ТПУ (УК- 1, УК- 4), <i>CDIO Syllabus</i> ( 2.1, 2.2, 2.3, 2.4), Критерий 5 АИОР (п. 1.1, 1.2, 1.3, 1.5, 1.6), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE u FEANI</i>
Р8	Способен планировать и проводить фундаментальные исследования в проектах в области ядерно-физических исследований, взаимодействия излучения с веществом, а также модернизация современных и создание методов изучения механических, электрических, магнитных, тепловых свойств твердых тел и критически оценивать полученные результаты	Требования ФГОС ВО (ОПК-3,ОПК- 5, ОПК- 6,ОПК-7, ПК-2, ПК-3 ), СУОС ТПУ (УК- 1, УК- 2), <i>CDIO Syllabus</i> ( 4.4), Критерий 5 АИОР (п. 1.1., 1.2, 1.4, 1.6), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE u 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 ядерных технологий  
 Направление подготовки 03.04.02 Физика  
 Отделение школы (НОЦ) Отделение экспериментальной физики

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

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

В форме:

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

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

Студенту:

Группа	ФИО
ОБМ81	Буйлук Артем Олегович

Тема работы:

Влияние объемной доли частиц TiC на микроструктуру и механические свойства композита TiC/Ti-6Al-4V, полученного методом электронно-лучевого плавления проволоки	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	26.05.2020 г., №147-53/с

Срок сдачи студентом выполненной работы:

08.06.2020 г.

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

<p><b>Исходные данные к работе</b></p> <p>(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.).</p>	<p>Объектом исследования является металло-матричный композит TiC/Ti-6Al-4V, полученный методом электронно-лучевого плавления проволоки.</p>
--	---

<p><b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b> (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).</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Обзор литературных источников;</li> <li>– Исследование микроструктуры и механических свойств металло-матричных композитов TiC/Ti-6Al-4V, полученных методом электронно-лучевого плавления проволоки;</li> <li>– Анализ полученных результатов;</li> <li>– Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение;</li> <li>– Социальная ответственность;</li> <li>– Заключение и выводы.</li> </ul>
--	---

**Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы**  
(с указанием разделов)

Раздел	Консультант
1. Литературный обзор; 2. Материалы и методы; 3. Экспериментальная часть	Панин Алексей Викторович
4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Кашук Ирина Вадимовна
5. Социальная ответственность	Сечин Андрей Александрович
6. Раздел на английском языке (Приложение А)	Аксенова Наталья Валерьевна

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

Литературный обзор

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

**Задание выдал руководитель:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ОЭФ ИЯТШ ТПУ	Панин А.В.	д.ф.-м.н.		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
ОБМ81	Буйлук А.О.		

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

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
ОБМ81	Буйлук Артем Олегович

<b>Школа</b>	<b>ИЯТШ</b>	<b>Отделение школы</b>	<b>ОЭФ</b>
Уровень образования	Магистр	Направление/специальность	03.04.02 Физика

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

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

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

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

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

1. Оценка конкурентоспособности НИ
2. Матрица SWOT
3. Диаграмма Ганта
4. Основные показатели эффективности НИ

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

**Задание выдал консультант:**

<b>Должность</b>	<b>ФИО</b>	<b>Ученая степень, звание</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
Доцент	Кашук Ирина Вадимовна	к.т.н, доцент		

**Задание принял к исполнению студент:**

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
ОБМ81	Буйлук Артем Олегович		

## ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
ОБМ81	Буйлук Артем Олегович

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

### Тема ВКР:

Влияние объемной доли частиц TiC на микроструктуру и механические свойства композита TiC/Ti-6Al-4V, полученного методом электронно-лучевого плавления проволоки

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

<p>1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области применения</p>	<p>Объектом исследования является металло-матричный композит TiC/Ti-6Al-4V, полученный методом электронно-лучевого плавления проволоки. Основные области применения авиа- ракетно-космическая отрасль.</p>
---	--

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

<p><b>1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства;</li> <li>– организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны</li> </ul>	<p>По данной теме рассматриваются следующие документы:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– инструкция № 2-08 по охране труда при работе с ПЭВМ и ВДТ;</li> <li>– СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03. Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организация работы;</li> <li>– ГОСТ Р 50948-01. Средства отображения информации индивидуального пользования. Общие эргономические требования и требования безопасности;</li> <li>– ГОСТ Р 50949-01. Средства отображения информации индивидуального пользования. Методы измерений и оценки эргономических параметров и параметров безопасности;</li> <li>– ГОСТ Р 50923-96. Рабочее место оператора. Общие эргономические требования и требования к производственной среде. Методы измерения.</li> </ul>
<p><b>2. Производственная безопасность:</b></p> <p>2.1 Анализ выявленных вредных и опасных факторов</p> <p>2.2 Обоснование мероприятий по снижению</p>	<p>При проведении исследования возможны проявления следующих вредных и опасных факторов:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Освещение;</li> <li>– Шум;</li> <li>– Микроклимат;</li> <li>– Химическое воздействие реактива для травления;</li> <li>– Электричество</li> </ul>

3. Экологическая безопасность:	Факторы рабочего места, влияющие на окружающую среду: – Утилизация люминесцентных ламп; – Переработка бытового мусора
4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:	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
Ассистент ООД	Сечин Андрей Александрович	к.т.н		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
ОБМ81	Буйлук Артем Олегович		

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

---

Школа Инженерная школа ядерных технологий  
Уровень образования Магистратура  
Направление подготовки 03.04.02 Физика  
Отделение школы (НОЦ) Отделение экспериментальной физики  
Период выполнения 2019-2020

Форма представления работы:

Магистерская диссертация
--------------------------

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

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

Срок сдачи студентом выполненной работы:	08.06.2020 г.
--	---------------

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
09.01.2020	Аналитический обзор литературы	15
28.04.2020	Исследования микроструктуры металло-матричных композитов TiC/Ti-6Al-4V, полученных методом электронно-лучевого плавления проволоки	15
25.04.2020	Исследования механических свойств металло-матричных композитов TiC/Ti-6Al-4V, полученных методом электронно-лучевого плавления проволоки	15
3.05.2020	Анализ результатов	15
25.05.2020	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	15
25.05.2020	Социальная ответственность	15
25.05.2020	Заключение	10

Составил преподаватель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ОЭФ ИЯТШ ТПУ	Панин А.В.	д.ф.-м.н.		

**СОГЛАСОВАНО:**

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

## Реферат

Магистерская диссертация содержит 105 с., 18 рис., 28 табл., 38 источников, 1 приложение.

Ключевые слова: Аддитивные технологии, электронно-лучевое плавление проволочного материала, металло-матричный композит, титановый сплав Ti-6Al-4V, карбид титана.

Объектом исследования является металло-матричный композит TiC/Ti-6Al-4V, полученный в результате электронно-лучевого сплавления карбидных порошковых частиц и титановой проволоки.

Цель работы – изготовление композитов TiC/Ti-6Al-4V с повышенными механическими характеристиками, методом электронно-лучевого плавления проволочного материала.

В данной работе были получены металло-матричные композиты TiC/Ti-6Al-4V с различной объемной долей карбидных фаз в титановой связке. В процессе работы проводились исследования влияния объемной доли частиц TiC на микроструктуру и механические свойства металло-матричных композитов TiC/Ti-6Al-4V, полученных методом электронно-лучевого плавления проволоки.

В результате исследования установлено, что композиты TiC/Ti-6Al-4V, полученные методом электронно-лучевого плавления титановой проволоки и карбидных частиц имеют структуру с пластинами альфа фазы и выделениями гранулированных эвтектических фаз TiC, которые распределяются как по границам зерен, так и внутри их. Эвтектические фазы выделяются в виде глобулярных частиц и в форме цепочек, при увеличении объемной доли TiC в композите TiC/Ti-6Al-4V размер эвтектических фаз также увеличивается. Также обнаружено, что увеличение объемной доли TiC обуславливает повышение значения микротвердости и прочности на растяжение, однако приводит к постепенному снижению пластичности металло-матричных композитов.

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 на основе титанового сплава Ti-6Al-4V и карбидных включений, с повышенными механическими характеристиками.

## Оглавление

Введение.....	15
Глава 1. Литературный обзор.....	17
1.1 Классификация аддитивных технологий.....	17
1.2 Фазовые равновесия, фазы и соединения в системе Ti-C.....	23
1.3 Изготовление композитов TiC/Ti-6Al-4V методами аддитивных технологий.....	26
1.3.1 Изготовление композитов TiC/Ti-6Al-4V методом laser metal deposition.....	26
Глава 2. Материалы и методика эксперимента.....	34
2.1 Технологические параметры 3D-печати.....	34
2.2 Методы подготовки и исследования 3D-напечатанных образцов.....	37
Глава 3. Экспериментальная часть.....	39
3.1 Исследование микроструктуры и фазового состава композитов TiC/Ti-6Al-4V, полученных методом EBF <sup>3</sup> .....	39
3.2 Исследование механических свойств композитов TiC/Ti-6Al-4V, полученных методом EBF <sup>3</sup> .....	44
Заключение.....	48
Глава 4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.....	50
Введение.....	50
4.1 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научного исследования с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения.....	51
4.1.1 Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения.....	51
4.1.2 SWOT-анализ.....	53
4.2 Планирование научно-исследовательской работы.....	55
4.2.1 Структура работ в рамках научного исследования.....	55
4.2.2 Определение трудоемкости выполнения работ.....	56
4.2.3 Разработка графика проведения научного исследования.....	57
4.3 Бюджет научного исследования.....	61

4.3.1 Сырье, материалы, комплектующие изделия и покупные полуфабрикаты.....	61
4.3.2 Специальное оборудование для научных работ.....	61
4.3.3 Основная заработная плата.....	63
4.3.4 Дополнительная заработная плата научно-производительного персонала.....	65
4.3.5 Отчисления на социальные нужды.....	65
4.3.6 Накладные расходы.....	66
4.4 Определение ресурсоэффективности исследования .....	66
4.4.1 Интегральный финансовый показатель.....	67
4.4.2 Интегральный показатель ресурсоэффективности.....	68
4.4.3 Интегральный показатель эффективности .....	69
Выводы .....	70
Глава 5. Социальная ответственность.....	71
Ведение.....	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 .....	73
5.2 Производительная безопасность .....	74
5.2.1 Анализ вредных и опасных факторов объекта исследования.....	74
5.2.2 Анализ вредных и опасных факторов на рабочем месте .....	75
5.2.2.1 Недостаток освещения рабочей зоны.....	76
5.2.2.2 Превышение уровня шума .....	78
5.2.2.3 Микроклимат.....	80
5.2.2.4 Контакт с реактивом для травления образцов.....	81
5.2.2.5 Электробезопасность .....	81
5.3 Экологическая безопасность.....	82
5.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях.....	83
5.4.1 Защита в чрезвычайных ситуациях.....	84
5.4.1.1 Техногенные ЧС.....	84
5.4.1.2 Природные ЧС.....	86

Выводы .....	88
Список использованной литературы.....	89
Приложение А .....	93
1. Literature review .....	94
<i>1.1 Classification of additive technologies .....</i>	<i>94</i>
<i>1.2 Manufacturing of TiC/Ti-6Al-4V composites using additive technologies...</i>	<i>99</i>

## Введение

Современные темпы развития промышленности требуют выбора технологий производства, которые выполняют задачи в кратчайшие сроки с наименьшими затратами. Наряду с новыми и передовыми технологиями можно отметить быстрое развитие аддитивных технологий, позволяющих создавать металлические изделия уникальной формы [1]. Они позволяют пересмотреть весь процесс технологического производства из широкого класса материалов, таких как, металлы, композиционные материалы, неметаллы, керамики и т.д.

Титан и сплавы на его основе находят широкое применение в космическом материаловедении и машиностроении, благодаря своим уникальным свойствам, таким как малый удельный вес, высокая прочность и коррозионная стойкость [2]. Разработка композитных материалов, где в качестве матрицы используется сплав Ti-6Al-4V, представляют значительный интерес для этих отраслей не только с точки зрения повышения прочностных свойств, но и для облегчения веса конструкции, удешевления изделий и др. Обычно титановый сплав упрочняют высокопрочными керамическими частицами, такими как, TiB, TiC, SiC для получения металло-матричного композита (ММК). Частицы карбида титана являются наиболее предпочтительными в керамическом армировании титановой матрицы, вследствие большой стабильности и совместимости с титановой матрицей, а также близких коэффициентов теплового расширения, высоких твердости и модуля Юнга[1,3].

Традиционными методами производства металло-матричных композитов являются литье и порошковая металлургия. В настоящее время наблюдается громадный интерес к изготовлению металлических матричных композитов методом аддитивных технологий. Особый интерес представляют аддитивные технологии, основанные на электронно-лучевом плавлении проволоочного материала (англ. Electron Beam Freeform Fabrication, EBF<sup>3</sup>).

Неоспоримым преимуществом  $\text{EBF}^3$  метода является практически 100% эффективность использования расходного материала, а также чрезвычайно высокая скорость послойного выращивания, которая достигает  $2500 \text{ см}^3/\text{час}$  [4]. Несмотря на то, что основным недостатком  $\text{EBF}^3$  – изделий из титанового сплава Ti-6Al-4V является их невысокая прочность вследствие большого размера первичных бета зерен, введение высокопрочных керамических частиц успешно нивелирует указанный недостаток.

**Целью настоящей работы** является изготовление композитов TiC/Ti-6Al-4V с повышенными механическими характеристиками, методом электронно-лучевого плавления проволочного материала.

Для достижения поставленной цели будут решены следующие **задачи**:

1. Исследовать закономерности формирования микроструктуры и фазового состава композита TiC/Ti-6Al-4V, полученного методом электронно-лучевого плавления проволоки.
2. Провести экспериментальные исследования механических свойств композитов TiC/Ti-6Al-4V, полученных методом электронно-лучевого плавления проволоки.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Одновременное электронно-лучевое плавление титановой проволоки и порошка карбида титана позволяет получить безпористые металло-матричные композиты с однородным распределением карбидных частиц.
2. Объемная доля TiC влияет на размер первичных бета зерен, альфа пластин и выделяющихся эвтектических фаз TiC. С увеличением содержания карбидных фаз происходит повышение прочности и снижение пластичности  $\text{EBF}^3$ -композитов.

## Глава 1. Литературный обзор

### *1.1 Классификация аддитивных технологий*

Высокая стоимость производства изделий из титановых сплавов, главным образом связанная с их механической постобработкой. Привела к исследованию и разработке различных технологий, для изготовления деталей, которые позволяли бы получать изделия максимально приближенные по форме и свойствам к конечной детали [5]. Методы аддитивных технологий, позволяют создавать объемные изделия сложной формы по трехмерной компьютерной модели путем послойного нанесения материала [6].

Интерес к аддитивным технологиям, в качестве альтернативы традиционным технологическим методам для производства металлических изделий возник в авиационной промышленности, космической и энергетическом машиностроении [6-7]. Мотивацией для введения аддитивных технологий в промышленность являлась экономическая целесообразность.

Аддитивные технологии предлагают новые возможности при производстве изделий, а также в ряде случаев оказываются менее дорогостоящими, чем традиционные методы [8]. В отличие от традиционных технологий, в которых процессы изготовления деталей осуществляются методом вычитания материала из заготовки, использование аддитивных технологий подразумевает построение детали путем добавления слоя за слоем до получения готового изделия. Отходы материала по традиционным технологиям обработки деталей иногда превышают 70%, в то время как при использовании аддитивных технологий, этот показатель стремится к нулю.

При внедрении АТ в авиационную промышленность это обеспечило изменение в подходе к конструированию: улучшение массогабаритных и иных функциональных показателей эффективности изделий [9].

«Непосредственное выращивание» изделий методом аддитивных технологий может осуществляться разными способами и с использованием различных материалов, но в основе любого из них лежит принцип послойного создания (выращивания) твёрдого объекта [8-10]. Приведем классификацию аддитивных технологий. В настоящее время АТ представлены несколькими способами печати, которые различаются расходными материалами и принципами их нанесения (Табл. 1).

По принципу формирования изделий выделяют два направления развития аддитивных технологий:

Процесс создания изделий происходит за счет объединения материала, находящегося на рабочей поверхности платформы технологического оборудования (Bed deposition) [11]. Таким образом, формируются детали в селективном лазерном плавлении (SLM) и электронно-лучевом плавлении (EBM). После окончания процесса изготовления остается некоторый объем материала, который может использоваться для формирования следующей детали.

Формирование изделий путем прямого осаждения материала (Direct deposition). Готовое изделие формируется послойно за счет разогретого до необходимой температуры материала, поступающего на рабочую платформу из специального распределяющего устройства [11]. Такой принцип формирования детали заложен в методах (EBF<sup>3</sup>, LMD).

В свою очередь формирование изделий путем прямого осаждения, также можно классифицировать на два метода. Принципиальное различие в подаче расходного материала из распределяющего устройства (дозатора). Подавать расходный материал можно в виде порошка (LMD) или проволоки (EBF<sup>3</sup>). При изготовлении деталей из порошка, большой процент частиц порошка разлетается по камере из-за своих малых размеров, что приводит к большим потерям материала, так как повторное использование разлетевшихся частиц порошка не рекомендуется. Поэтому на смену порошку, на рынок современной 3D-печати, приходит более выгодный в

экономическом плане, расходный материал в виде проволоки, ничем не уступающий порошку.

*Таблица 1 – Классификация аддитивных технологий в зависимости от исходного материала и его состояния [10]*

Состояние материала	Материалы	Процесс
Жидкое	Полимеры	Изготовление объектов послойной наплавки (FDM) Струйная печать (JP)
Порошкообразное	Полимеры, металлы, керамика	Селективное лазерное спекание (SLS) Прямое лазерное сплавление (DMLS) Селективная лазерная плавка (SLM) Электронно-лучевая плавка (EBM)
Проволочное	Полимеры, металлы и композиционные материалы	Электронно-лучевое плавление проволочного материала (EBF <sup>3</sup> ) Электронно-лучевое аддитивное производство (EBAM)

Из приведенных в таблице 1 методов АТ наиболее востребованы и активно разрабатываются две основные технологии создания металлических матричных композитов – лазерное плавление (selective laser melting – SLM, laser metal deposition – LMD) и электронно-лучевое сплавление (electron beam melting – EBM). Данные методы позволяют одновременно подавать в ванну расплава металлические матричные порошки и армирующие порошки, что дает возможность создания объемных изделий сложной формы по трехмерной компьютерной модели путем послойного нанесения материала [12]. Несмотря на то, что наиболее распространенным методом получения

композитов на основе Ti-6Al-4V является метод LMD [13], в последние годы активно развиваются аддитивные технологии металлокерамических композитов путем их электронно-лучевого сплавления [14]. В отличие от метода LMD, процесс электронно-лучевой плавки происходит в вакууме, что позволяет получать лучшую микроструктуру титановых сплавов и их композитов, которые характеризуются высокой химической активностью при повышенных температурах. Недостатком метода LMD также является то, что в процессе лазерного сплавления из-за высокой скорости охлаждения в деталях возникают большие остаточные напряжения [15].

Производственный цикл метода прямого лазерного плавления (LMD) состоит из нанесения тонкого слоя порошка на рабочую поверхность – как правило, металлический стол, способный передвигаться в вертикальном направлении (Рис.1). Процесс печати протекает в рабочей камере, заполняемой инертными газами (аргоном). Отсутствие кислорода позволяет избегать оксидации расходного материала, что делает возможной печать такими материалами, как титан. Каждый слой модели сплавляется, повторяя контуры слоев цифровой модели. Плавка производится с помощью лазерного луча, направляемого по осям X и Y двумя зеркалами с высокой скоростью отклонения. Мощность лазерного излучателя достаточно высока для плавки частиц порошка в гомогенный материал. Процесс создания изделий происходит в результате локального послойного сплавления металлических материалов под действием лазерного излучения [16]. В качестве расходных материалов используются практически любые металлы и сплавы в порошковой форме. Пошагово технология процесса выглядит следующим образом:

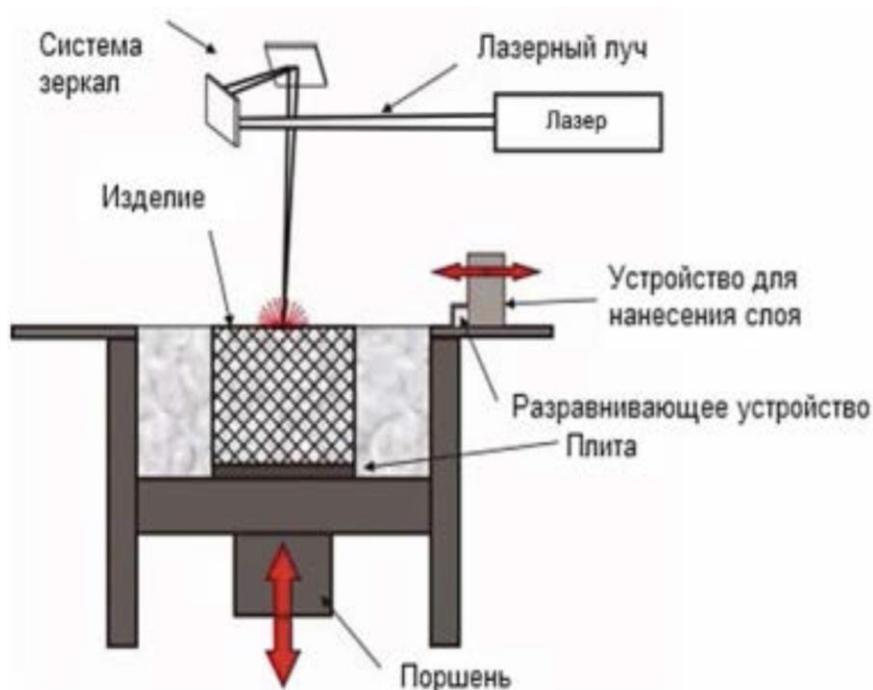
Специальное программное обеспечение разбивает трехмерную компьютерную модель на слои определенной толщины;

На рабочую поверхность наносится слой порошка при помощи специального подвижного блока;

Лазерный луч, в соответствии с 3D-моделью, спекается первый слой;

Затем рабочая поверхность опускается на толщину слоя, насыпается новый слой порошка, лазер выжигает второй слой объекта поверх первого и т.д. За счет высокой температуры в рабочей камере, происходит сплавление слоев [16].

Этот процесс повторяется от слоя к слою до полного создания модели.



*Рисунок 1 – Схематичное изображение процесса работы LMD-технологии*

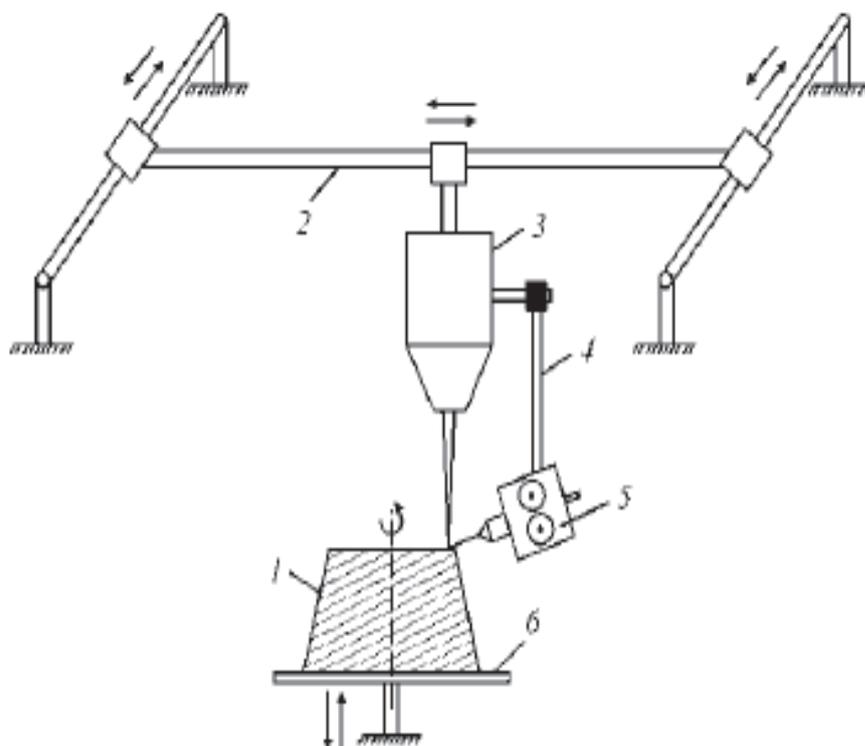
Прямое лазерное сплавление нашло применение в следующих сферах:  
Аэрокосмическая – производство элементов газовых турбин, двигателей и корпусов летательных аппаратов;

Медицина – изготовление протезов и имплантатов;

Мелкосерийное производство – изготовление пресс-форм, заготовок, вставок [16].

Особый интерес представляют аддитивные технологии, основанные на одновременном электронно-лучевом плавлении проволоки Ti-6Al-4V (англ. Electron Beam Free-Form Fabrication, EBF3) [17]. Технология электронно-лучевого плавления проволоочного материала это процесс получения деталей и изделий с заранее заданными формой и свойствами

путем послойного локального наплавления металлической проволоки с помощью электронного луча. Технология основана на уникальной способности электронного луча концентрировать энергию. Электронный луч высокой мощности фокусируется в рабочей зоне в небольшое пятно диаметром 2-3 миллиметра. Затем этот сгусток энергии направляется на проволоку, расположенную вблизи подложки. Под действием электронного луча металлическая проволока начинает плавиться в области поглощения энергии луча. Электронный луч создает на поверхности формируемого изделия ванну расплавленного металла. В ванну с определенной скоростью подается проволока. Скорость подачи проволоки оказывает влияние на свойства формируемого изделия. На рисунке 2 представлена принципиальная схема установки и процесс электронно-лучевого послойного выращивания методом EBF<sup>3</sup>.



*Рисунок 2 – Схематичное изображение аддитивной проволоочной электронно-лучевой 3D-технологии (EBF<sup>3</sup>): 1 – изготавливаемое изделие; 2 – манипулятор; 3 – электронно-лучевая пушка; 4 – штанга держателя подающего механизма; 5 – подающий механизм; 6 – поворотный стол с механизмом вертикального перемещения [18]*

Формируемое изделие перемещается внутри вакуумной камеры относительно неподвижной электронной пушки и устройства подачи проволоки с помощью стола манипулятора, который имеет четыре степени свободы (перемещение вдоль осей X и Y, вращение относительно оси z, перемещение вдоль оси Z). Диаметр проволоки может изменяться от десятых долей миллиметра до 3 мм.

Технология EBF<sup>3</sup> нацелена на аддитивное производство комплексных моделей с пониженным расходом материала по сравнению с традиционными методами и практическим отсутствием необходимости механической обработки. Технологические особенности электронно-лучевого плавления, наряду с экономичностью и эффективностью, делают процесс привлекательным для использования в космосе. Процесс формирования изделий осуществляется в вакуумной камере, ведь любая газовая или воздушная среда создает для электронов слишком высокое сопротивление. При этом в такой вакуумной среде сохраняются свойства материала, утрачиваемые во время плавления [19-21].

### ***1.2 Фазовые равновесия, фазы и соединения в системе Ti-C***

Для получения композитных материалов TiC/Ti-6Al-4V с заданными структурными и механическими свойствами, необходимо изучение фазовых превращений происходящих при создании изделий. Подробное изучение фазовых равновесий в двойной системе Ti-C позволит исследователю при создании композита контролировать формируемую структуру и варьировать объемные доли фаз. Фазовая диаграмма системы Ti-C представлена на рисунке 3.

Наряду с  $\beta$ -Ti (объемно-центрированная кубическая структура) и  $\alpha$ -Ti (гексагональная плотноупакованная структура) в этой системе существует кубический карбид. Температура плавления чистого металлического  $\beta$ -Ti равна 1670°C. При добавлении углерода к титану его температура плавления

снижается до температуры эвтектики, а именно до 1648°C [23-24]. Из рисунка  $L \leftrightarrow \beta\text{-Ti} + \text{TiC}$  содержит 1,8 ат.%.

Температура аллотропного превращения  $\alpha\text{-Ti} \leftrightarrow \beta\text{-Ti}$  равна 882°C. При добавлении углерода к титану температура этого превращения повышается до температуры перитектоидного превращения  $\beta\text{-Ti} + \text{TiC} \leftrightarrow \alpha\text{-Ti}$ , равна 960°C.

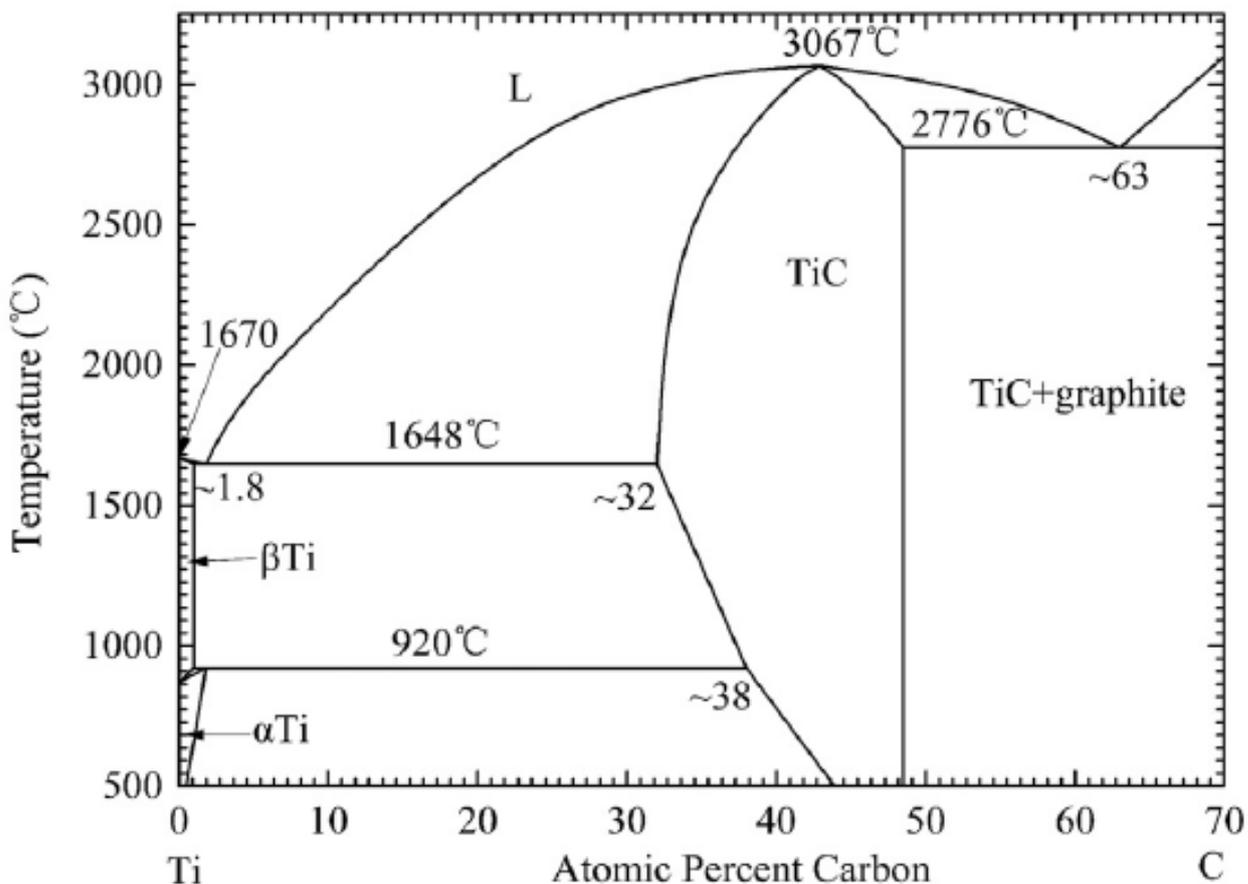


Рисунок 3 – Бинарная фазовая диаграмма системы Ti-C [22]

Выделения эвтектической фазы TiC наблюдаются по всей линии эвтектической изотермы в диапазоне от 0,6 до 32 ат.% C. При увеличении объемной доли C от 32 до 49 ат.% C. образовывается соединение TiC. Дальнейшее увеличение от 49 до 100 ат.% C. приводит к выделениям твердого соединения TiC и C. Второе эвтектическое превращение TiC+C также осуществляется по всей изотерме от 49 до 100 ат.% C.

Таблица 2 – Характеристики особых точек фазовой диаграммы системы Ti-C [22]

Фазовое превращение	Состав фаз, участвующих в реакции (С, ат.%)			Т, °С	Тип фазового превращения
$L \leftrightarrow \beta\text{-Ti} + \text{TiC}$	1,8	0,6	32	1648	Эвтетическое превращение
$L \leftrightarrow \text{TiC}$	-	45	-	3067	Конгруэнтное превращение
$L \leftrightarrow \text{TiC} + \text{C}$	63	49	100	2776	Эвтектическое превращение
$\beta\text{-Ti} + \text{TiC} \leftrightarrow \alpha\text{-Ti}$	0,4	38	2,1	920	Перитектоидное превращение
$L \leftrightarrow \beta\text{-Ti}$	-	0	-	1670	Плавление
$\beta\text{-Ti} \leftrightarrow \alpha\text{-Ti}$	-	0	-	882	Аллотропное превращение

Закономерности структурно-фазовых превращений, развивающихся в композитах TiC/Ti-6Al-4V в процессе электронно-лучевого плавления тугоплавких керамических частиц и титановой проволоки, существенно отличаются от аналогичных процессов, протекающих при плавлении карбидных и титановых порошков. Особенностью метода электронно-лучевого плавления проволочного материала является формирование неоднородной структуры с крупными столбчатыми зёрнами, размеры которых существенно превышают размеры зёрен в изделиях, полученных методами электронно-лучевого или лазерного плавления порошкового материала. Последнее связано с многократным плавлением и продолжительным нагревом нижележащих слоев в процессе послойного формирования изделий. В то же время, скорость охлаждения ванны расплава в 3D-напечатанных изделиях, полученных в процессе электронно-лучевого плавления тугоплавких керамических частиц и титановой проволоки,

оказывается существенно ниже, что также будет оказывать влияние на тип и объемную долю образующихся неравновесных мартенситных фаз.

### ***1.3 Изготовление композитов TiC/Ti-6Al-4V методами аддитивных технологий***

Металло-матричные композиты (ММК) полученные методами аддитивных технологий привлекают большое внимание в различных областях, что связано с их высокими физико-механическими и эксплуатационными свойствами в авиа- и ракетно-космической отрасли. Одной из основных проблем при получении металло-матричных композитов является обеспечение физико-химической совместимости матрицы и армирующей фазы. В получении качественного изделия важную роль играет равномерное распределение частиц в объеме сплава и готового изделия, чего сложно добиться вследствие различных размеров частиц и различных физических свойств частиц и матрицы.

#### ***1.3.1 Изготовление композитов TiC/Ti-6Al-4V методом laser metal deposition***

В настоящее время существует достаточно большое количество работ, посвященных получению композитов TiC/Ti-6Al-4V методом лазерного сплавления порошков титанового сплава Ti-6Al-4V и карбида титана TiC. При этом большинство статей посвящено исследованию влияние технологических параметров 3D-печати на закономерности формирования структуры и фазового состава композита TiC/Ti-6Al-4V [25-27], а, следовательно, на их твердость [28], прочность [29] и трибологические свойства [30]. Показано, что существует оптимальное содержание частиц TiC, обеспечивающее максимальное увеличение прочностных характеристик металлического матричного композита.

В работе [31] авторами было проведено исследование микроструктурных и механических свойств композита TiC/Ti-6Al-4V, полученного методом LMD. Показано, что в процессе лазерного плавления порошка Ti-6Al-4V и карбидных частиц TiC недостаточно мощности лазера

для полного расплавления частиц TiC. Таким образом, TiC может быть частично расплавлен под действием лазерного излучения, а также некоторые частицы TiC могут быть частично растворены в расплавленном Ti-6Al-4V, что приводит к обогащению расплавленного металла углеродом. В результате лазерного плавления порошка Ti-6Al-4V и карбидных частиц TiC формируется структура представленная на рисунке 4. Структура композита TiC/Ti-6Al-4V состоит из эвтектической фазы TiC в виде цепочек и гранул, нерасплавленных частиц TiC, дендритных фаз TiC, а также характерной для Ti-6Al-4V структурой состоящей из пластин  $\alpha$ -Ti и распределенной по границам зерен фазой  $\beta$ -Ti.

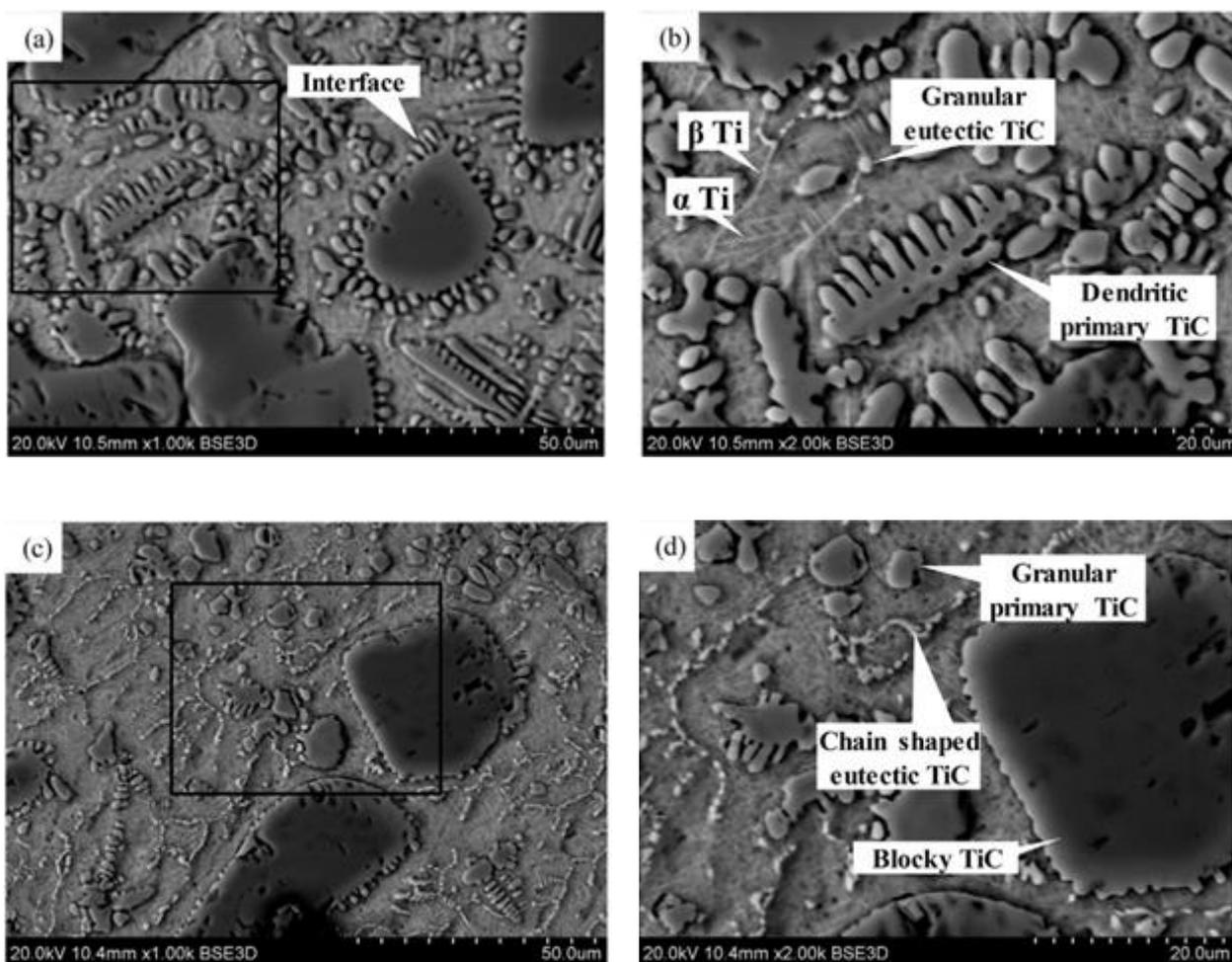


Рисунок 4 – РЭМ изображение микроструктуры композита TiC/Ti-6Al-4V, полученного методом laser melting deposition [31]

Согласно [31], прочность на растяжение и пластичность образцов, полученных методом лазерного плавления порошка титанового сплава Ti-6Al-4V, составляют 1090 МПа и 6%, соответственно. При лазерном плавлении порошкового композита TiC<sub>5об.%</sub>/Ti-6Al-4V удается увеличить его прочность почти на 12,3%, которая достигает 1250 МПа. При этом, однако, существенно снижается его пластичность (до 1,5%). При дальнейшем увеличении объемной доли TiC прочность на растяжение и относительное удлинение композитов TiC/Ti-6Al-4V постепенно снижаются. Основная причина заключается в том, что нерасплавленные частицы TiC и дендритные фазы TiC с большим средним размером способствуют преждевременному разрушению композитов (Рис.5). Также показано, что с увеличением объемной доли частиц TiC повышается значение микротвердости (Табл. 3).

*Таблица 3 – Механические свойства композитов TiC/Ti-6Al-4V с различным содержанием TiC [31]*

Образцы	Прочность, МПа	Пластичность, %	Микротвердость, HV
Ti-6Al-4V	1100	5,5	375
TiC <sub>5%</sub> /Ti-6Al-4V	1250	1,5	430
TiC <sub>10%</sub> /Ti-6Al-4V	1100	0,5	445
TiC <sub>15%</sub> /Ti-6Al-4V	1000	0,3	450
TiC <sub>20%</sub> /Ti-6Al-4V	900	0,2	485
TiC <sub>30%</sub> /Ti-6Al-4V	850	0,1	500

Увеличение объемной доли TiC в композите TiC/Ti-6Al-4V способствует формированию пор в композите TiC/Ti-6Al-4V, которые также негативно сказываются на механических свойствах образцов. Поры могут образовываться как в матрице Ti-6Al-4V, так и в нерасплавленных TiC (Рис.5).

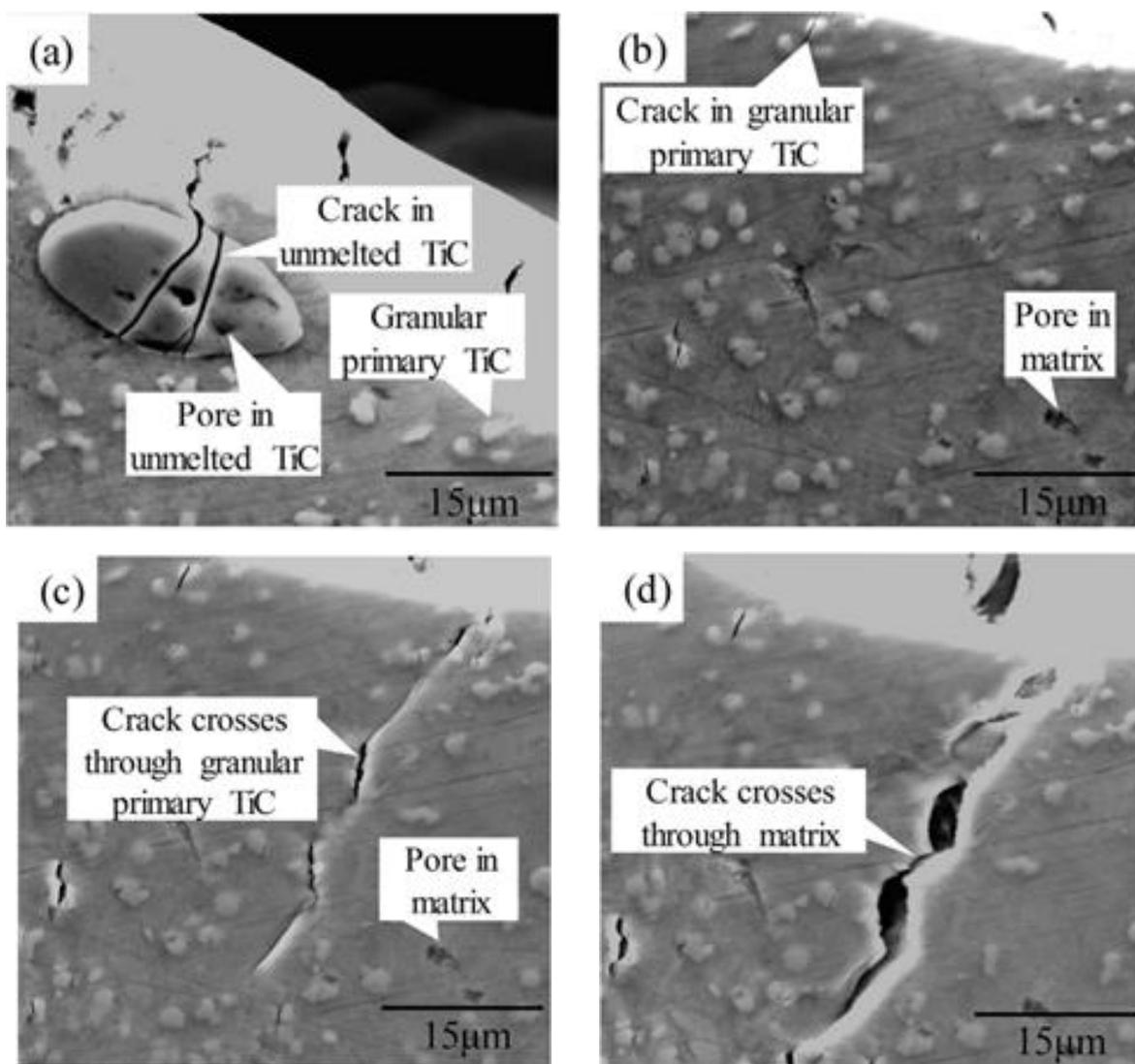
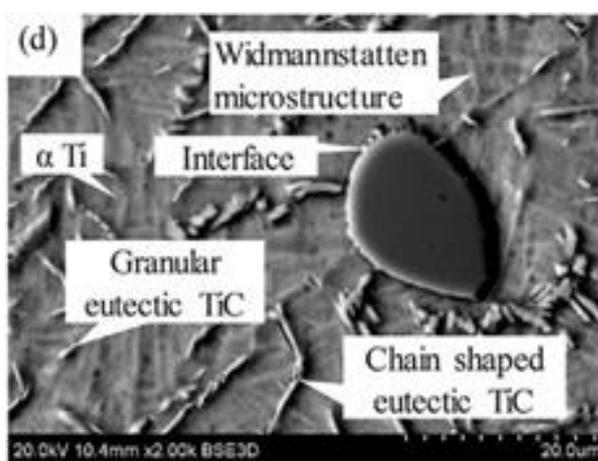
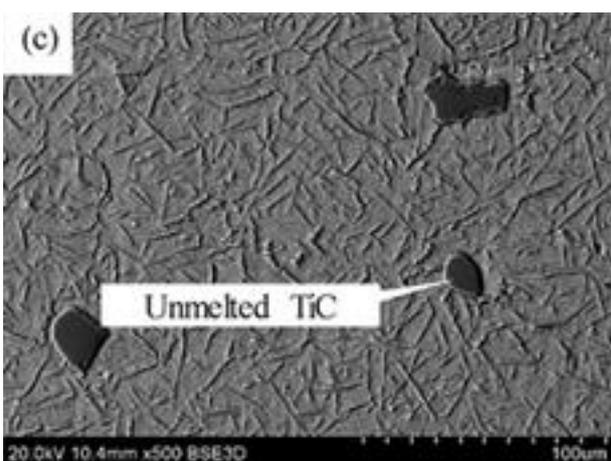
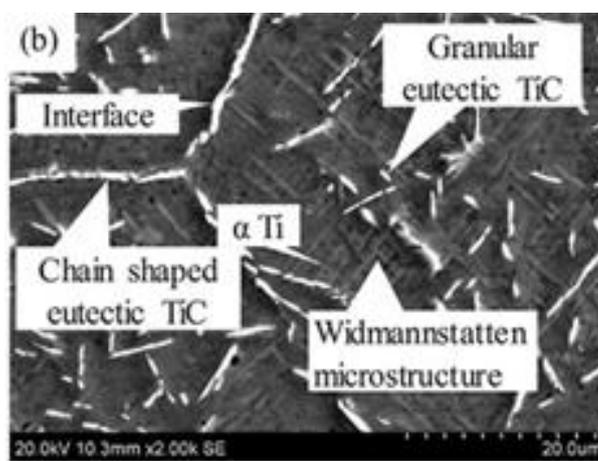
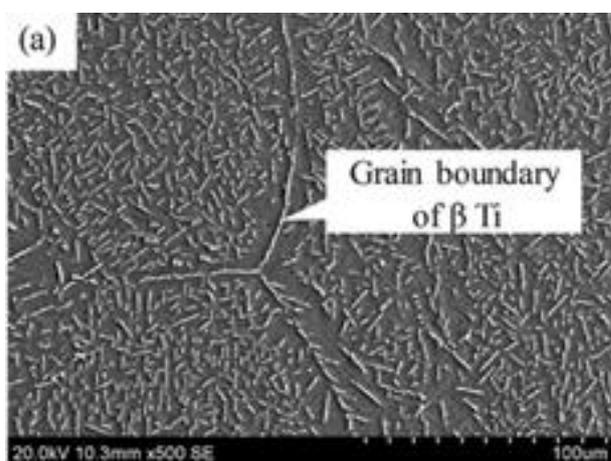


Рисунок 5 – СЭМ-изображения микроструктуры титанового матричного композита TiC/Ti-6Al-4V, после испытаний на растяжение [31]

В работе [32] авторами были проведены исследования формирования микроструктуры и механических свойств композита TiC/Ti-6Al-4V, полученного методом LMD. В работе использовались 4 композиции в зависимости от размеров TiC: 1).  $< 10\ \mu\text{m}$ ; 2).  $10\text{-}45\ \mu\text{m}$ ; 3).  $45\text{-}75\ \mu\text{m}$ ; 4).  $75\text{-}100\ \mu\text{m}$ . Металлографический анализ показал, что в упрочняющих композитах TiC/Ti-6Al-4V, изготовленных с мелкодисперсными порошками (TiC:  $< 10\ \mu\text{m}$ ), в структуре выделяются только гранулированные и цепочечные эвтектические фазы TiC, так как мелкодисперсные частицы TiC были полностью расплавлены и растворены в матрице из титанового сплава Ti-6Al-4V (Рис.6, a-b). Количество эвтектических фаз TiC в композитах,

изготовленных с мелкодисперсными порошками, было самым большим в этом исследовании, и эвтектические фазы TiC равномерно распределены в титановой матрице, в свою очередь титановая матрица состоит из пластин видманштеттовой структуры. При увеличении размеров упрочняющих частиц (25-100  $\mu\text{m}$ ) образуются зерна с видманштеттовой структурой с эвтектическими фазами TiC в форме цепочек и гранул. Помимо гранулированных и цепочечных эвтектических фаз TiC, в композитах, изготовленных из порошков TiC (25-100  $\mu\text{m}$ ), из-за частичного расплава частиц TiC выделяются нерасплавленные частицы TiC. Эвтектические фазы TiC и нерасплавленные частицы TiC выделяются как внутри, так и по границам зерен (Рис.6, с-h).



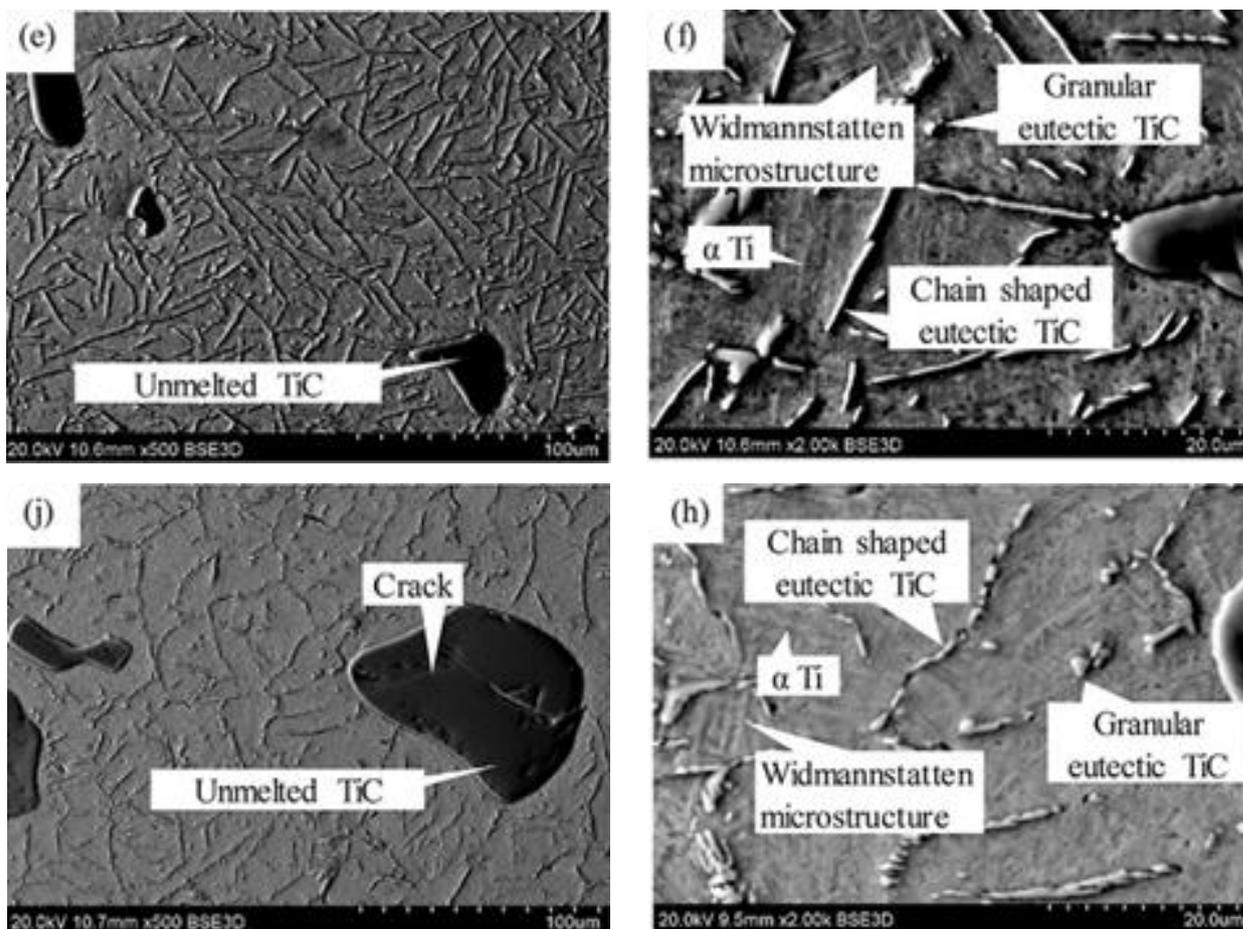


Рисунок 6 – СЭМ-изображения микроструктуры титанового матричного композита  $TiC/Ti-6Al-4V$ , с различными размерами  $TiC$ : (a-b) ультрадисперсные порошки  $< 10\mu m$ ; (c-d) порошки малого размера  $10-45\mu m$ ; (e-f) порошки среднего размера  $45-75\mu m$ ; (j-h) порошки крупного размера  $75-100\mu m$  [32]

При исследовании механических свойств, а именно, при испытаниях на растяжение авторами были получены результаты, приведенные в таблице 4. Значение прочности образцов, полученных методом лазерного плавления порошка титанового сплава  $Ti-6Al-4V$ , составило 1000 МПа. Для композитов, полученных с мелкодисперсными частицами значение прочности на растяжение (1230 МПа) и относительное удлинение (2,12%), были самыми высокими в данном исследовании. Более равномерное распределение эвтектических фаз  $TiC$  и сильное сцепление эвтектических фаз  $TiC$  с ТМК приводит к улучшению прочностных свойств композитов, изготовленных с

мелкодисперсными порошками. В механизме разрушения этих композитов преобладало растрескивание эвтектических фаз с последующим пластическим разрушением титановой матрицы. Как прочность на растяжение (1170 МПа), так и относительное удлинение (0,59%) достигли минимального значения при использовании крупных порошков TiC (75-100  $\mu\text{m}$ ) для изготовления композитов TiC/Ti-6Al-4V. Преждевременное растрескивание крупных нерасплавленных частиц TiC на начальной стадии пластической деформации и декогезия границы раздела между крупными частицами TiC и титановой матрицей уменьшили свойства при одноосном растяжении. В механизме разрушения композитов, изготовленных из порошков TiC с размерами (25-100  $\mu\text{m}$ ), преобладало растрескивание нерасплавленных частиц TiC с последующим растрескиванием эвтектических фаз TiC и затем пластическим разрушением титановой матрицы.

*Таблица 4 – Механические свойства композитов TiC/Ti-6Al-4V с различным размером TiC [32]*

Образец	Прочность, МПа	Пластичность, %
Ti-6Al-4V	1091	5,52
TiC/Ti-6Al-4V (< 10 $\mu\text{m}$ )	1231	2,12
TiC/Ti-6Al-4V (10-45 $\mu\text{m}$ )	1222	1,52
TiC/Ti-6Al-4V (45-75 $\mu\text{m}$ )	1225	1,31
TiC/Ti-6Al-4V (75-100 $\mu\text{m}$ )	1177	0,59

В отличие от лазерного сплавления порошкового сырья, называемого «фидсток» («Feedstock»), работ, посвященных исследованиям 3D-напечатанных изделий методом лазерного плавления проволоочного материала с добавлением армирующих карбидных частиц, значительно меньше. Тем не менее, в существующих работах [33] описана принципиальная возможность создания плотного, однородного композита TiC/Ti-6Al-4V путем лазерного сплавления титановой проволоки Ti-6Al-4V и

порошка TiC. Описаны оптимальные режимы лазерного плавления и объемной доли порошка TiC, который можно использовать для получения хорошо связанного композита, обладающего высокими прочностными характеристиками.

Электронно-лучевые аддитивные технологии наиболее часто используются для наплавки покрытий на основе TiC, TiB, SiC и др. Данная технология позволяет существенно увеличить износостойкость изделий из титанового сплава Ti-6Al-4V [34,35]. В настоящее время EBM метод успешно применяется для 3D-печати различных металлических матричных композитов (WC/NiBSi, B4C/Ti, TiC/Ti и др.) из соответствующих порошковых материалов [36-38]. При этом информация о получении композитов Ti-6Al-4V/TiC методами электронно-лучевого спекания EBM и EBF<sup>3</sup> в литературе отсутствуют.

## Глава 2. Материалы и методика эксперимента

### 2.1 Технологические параметры 3D-печати

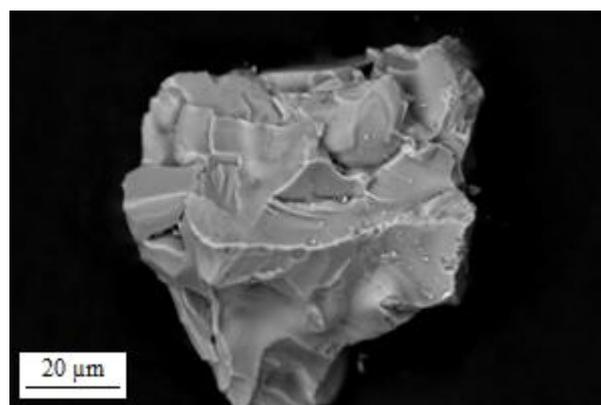
В данной работе формирование 3D-напечатанных металло-матричных композитов TiC/Ti-6Al-4V осуществлялось путем электронно-лучевого плавления коммерческой проволоки титанового сплава Ti-6Al-4V с добавлением в ванну расплава керамических частиц TiC. Диаметр титановой проволоки марки Grade5 составлял 1,6 мм (Рис.7,а). Порошок TiC представлял собой частицы неправильной формы, размер которых варьировался от 45 до 90 мкм (Рис.7,б). По данным микроанализа состав порошка TiC составил 83вес.% Ti и 17 вес.% C. Состав титановой проволоки Ti-6Al-4V представлен в таблице 5.

Таблица 5 – Химический состав проволоки титанового сплава Ti-6Al-4V

Концентрация элементов, вес.%		
Al	Ti	V
6,4±0,1	87,3±0,1	4,3±0,1



(а)



(б)

Рисунок 7 – Внешний вид титановой проволоки Ti-6Al-4V и РЭМ изображение порошковой частицы TiC

Процесс 3D-печати проводили на установке 6E400, оснащенной электронной пушкой с плазменным катодом (Рис.8). Варьируя объемную долю TiC, были получены четыре партии образцов для исследования

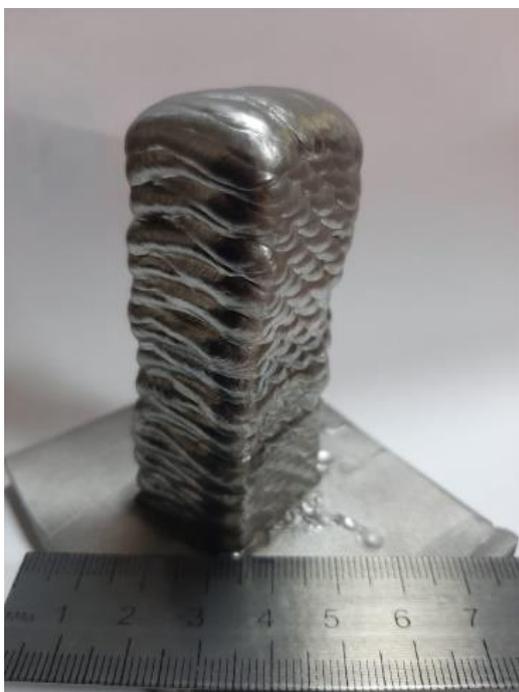
$\text{TiC}_{10\text{об.}\%}/\text{Ti-6Al-4V}$ ,  $\text{TiC}_{50\text{об.}\%}/\text{Ti-6Al-4V}$ ,  $\text{TiC}_{80\text{об.}\%}/\text{Ti-6Al-4V}$  и  $\text{TiC}_{200\text{об.}\%}/\text{Ti-6Al-4V}$ . С целью изменения подачи объемной доли TiC в ванну расплава проволочного материала было решено использовать наконечник для сварочного полуавтомата с различным диаметром сопла. Наконечник крепился к механизму подачи проволоки, что позволило при движении проволоки одновременно и равномерно вытягивать карбидный порошок из подачника. Различный диаметр сопла наконечника позволял варьировать объемную долю карбидного порошка, который подавался в ванну расплава одновременно с проволокой. При изготовления 3D-напечатанного металло-матричного композита необходимого состава, следует установить наконечник с диаметром сопла под данную композицию. Смена наконечника в общей сложности продолжается меньше минуты.



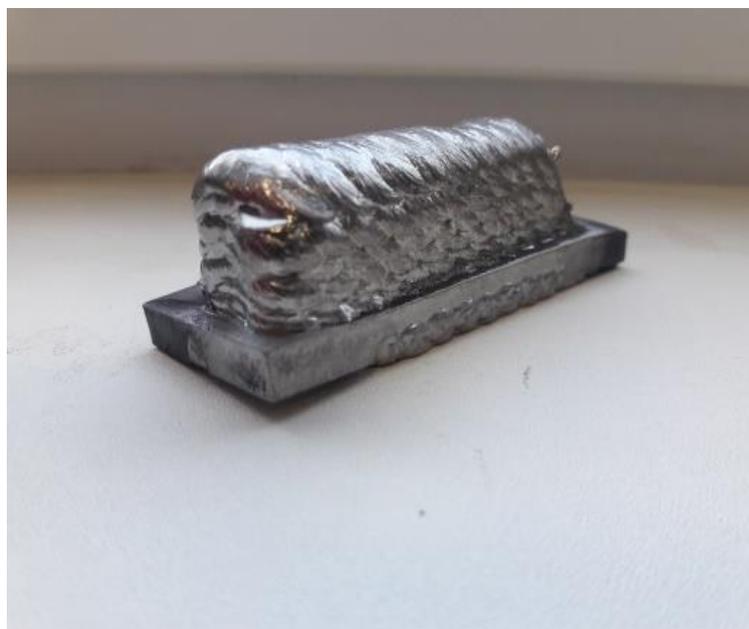
*Рисунок 8 – Внешний вид электронно-лучевой установки 6E400*

Технологический процесс получения изделий осуществлялся следующим образом. В камере для формирования изделий предварительно откачивался воздух, для получения вакуума до  $10^{-3}$  Па (Табл. 6). Источником электронов является плазменный катод, электроны в свою очередь ускоряются под разностью потенциалов 30 кВ и фокусируются в пятно, что

способствует образованию ванны расплава из расходного материала. Размер пятна зависит от мощности электронного пучка, а мощность в свою очередь от значения тока катода (21 мА), которое задается оператором в программе. Размер пятна при данных параметрах составлял по  $X = 3$  мм и по  $Y = 2$  мм. Движение стола по оси  $Z$  составило 1 мм за каждый проход. Стоит отметить, что при изготовлении каждого последующего слоя предыдущие слои прогревались за счет заданной мощности электронного пучка, что приводит к меньшей вероятности формирования пор в готовых изделиях. На рисунке 9 приведены изображения изделий, полученных методом  $EBF^3$ .



(a)



(б)

*Рисунок 9 – Изображение изделий, полученных методом  $EBF^3$*

При выборе постоянной мощности электронного пучка и скорости сканирования в данном эксперименте учитывались две основные причины. Во-первых, как известно, температура плавления  $TiC$  ( $3057^{\circ}C$ ) намного выше, чем у  $Ti-6Al-4V$  ( $1670^{\circ}C$ ). Это означает, что требуется увеличение мощности пучка, когда объемная доля  $TiC$  увеличивается при формировании композита. Однако объемные доли частиц  $TiC$  используемые при создании композита располагаются в пределах эвтектической изотермы, что приводит

к плавлению частиц вместе с проволокой Ti-6Al-4V, и температура плавления составляет 1650°C (см. фазовую диаграмму Ti-C). Поэтому мощность электронного пучка и скорость сканирования могут быть постоянными при увеличении объемной доли TiC. Во-вторых, в данной работе в основном исследовались микроструктура и механические свойства композитов при различных объемных долях TiC. Поэтому для удобного исследования влияния объемной доли TiC на микроструктуру и механические свойства композитов следует величину энергозатрат принять как величину постоянную.

*Таблица 6 – Технологические параметры 3D-печати*

Наименование технологического параметра	Проволока + Порошок	Единицы измерения
Вакуум	$10^{-3}$	Па
Ток катода	21	мА
Ускоряющее напряжение	30	кВ
Масштаб луча	X=3;Y=2	мм
Скорость подачи	12,6	мм/с
Время подачи	25	мкс
Скорость движения стола	9,5	мм/с
Перемещение стола по Z	1	мм

## ***2.2 Методы подготовки и исследования 3D-напечатанных образцов***

Для измерения твердости методом Виккерса требуется тщательная подготовка поверхности – тонкого шлифования и полировки. Поверхность образцов проходила дополнительную механическую обработку из-за высокой поверхностной шероховатости. Шлифовка проводилась с помощью наждачной бумаги. Маркировка шлифовальных шкурок, которые

использовались для подготовки поверхности Р 80, Р 360, Р 600, Р 1000 и Р 2000. Полировка проводилась с помощью полировальной пасты.

Металлографические исследования образцов проводили с использованием оптического микроскопа ZEISS AXIOVERT 25. Прежде чем посмотреть структуру образцы подвергли травлению кислотой.

Исследования фазового состава и структурных параметров образцов проводились на дифрактометре Shimadzu XRD-7000 на  $\text{CuK}_\alpha$ -излучения. Анализ фазового состава проведен с использованием баз данных PCPDFWIN, а так же программы полнопрофильного анализа POWDER CELL 2.5.

Измерение микротвердости Н<sub>ц</sub> исследуемых образцов выполняли на микротвердомере ПМТ – 3 с использованием пирамидки Виккерса (нагрузка на индентор составляла 50 г).

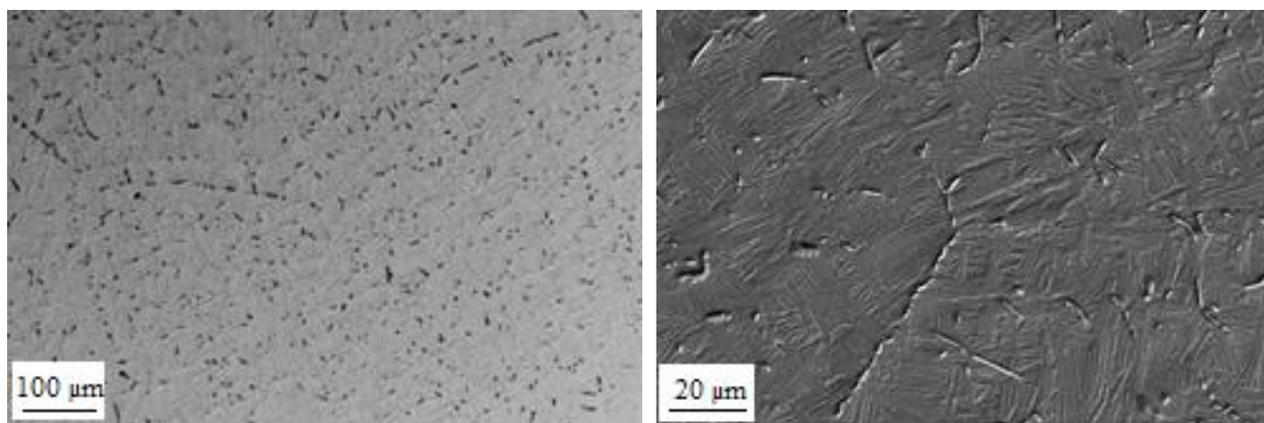
Микроструктуру и элементный анализ образцов проводили на многоцелевом растровом электронном микроскопе исследовательского класса Carl Zeiss EVO 50 с приставкой для рентгеновского энергодисперсионного микроанализа Oxford Instruments INCAx-act.

Испытания на одноосное статическое растяжение проводили на испытательной машине INSTRON 5582 при комнатной температуре.

## Глава 3. Экспериментальная часть

### 3.1 Исследование микроструктуры и фазового состава композитов $\text{TiC}/\text{Ti-6Al-4V}$ , полученных методом $\text{EBF}^3$

Методом растровой электронной микроскопии были получены изображения микроструктуры формирующейся в композите  $\text{TiC}_{10\text{об.}\%}/\text{Ti-6Al-4V}$ . Микроструктура образца состоит из равноосных зерен средний размер которых составляет 500 мкм (Рис.10,а). Внутри зерен наблюдается пластинчатая морфология разной ориентации и выделения гранулированных частиц эвтектической фазы  $\text{TiC}$ , хаотично распределяющиеся по границам зерен в виде гранул и цепочек. Поперечный размер пластин альфа фазы не превышает 4 мкм. В свою очередь средний поперечный размер гранулированных частиц эвтектической фазы  $\text{TiC}$  составляет 3 мкм. Стоит отметить, что в композите не наблюдаются другие выделения частиц  $\text{TiC}$ , кроме эвтектической фазы, это может указывать на полное расплавление и растворение данной концентрации  $\text{TiC}$  в титановой матрице.



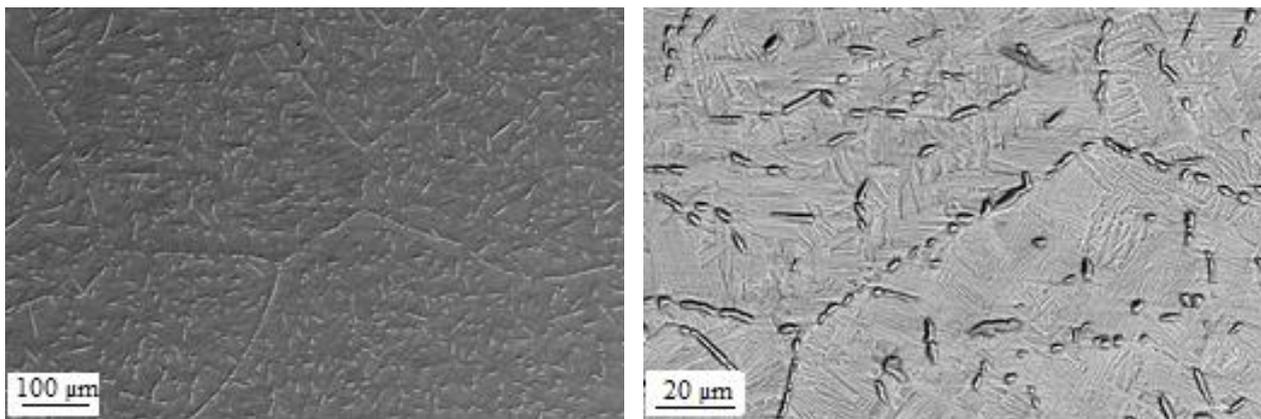
(a)

(б)

Рисунок 10 – РЭМ изображение микроструктуры композита  $\text{TiC}_{10\text{об.}\%}/\text{Ti-6Al-4V}$

При увеличении объемной доли  $\text{TiC}$  в композите до  $\text{TiC}_{50\text{об.}\%}/\text{Ti-6Al-4V}$  формируются относительно мелкие равноосные зерна, размер которых варьируется от 200 до 350 мкм. Внутри зерен формируется структура с

пластинами альфа фазы, поперечный размер которых составляет 4 мкм, а также с выделениями эвтектической фазы TiC. Эвтектическая фаза TiC принимает форму глобулярных частиц TiC, которые распределяются преимущественно внутри зерен, а также в форме цепочек выделяющихся по границам. В данном композите, также как и в предыдущем, порошковые частицы TiC были полностью расплавлены и выделялись исключительно в виде гранулированных эвтектических фаз TiC.

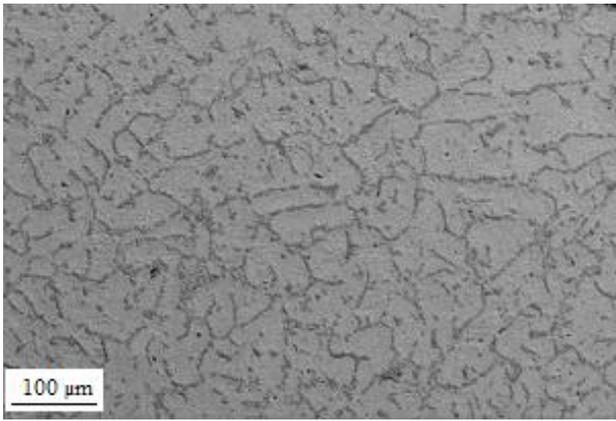


(a)

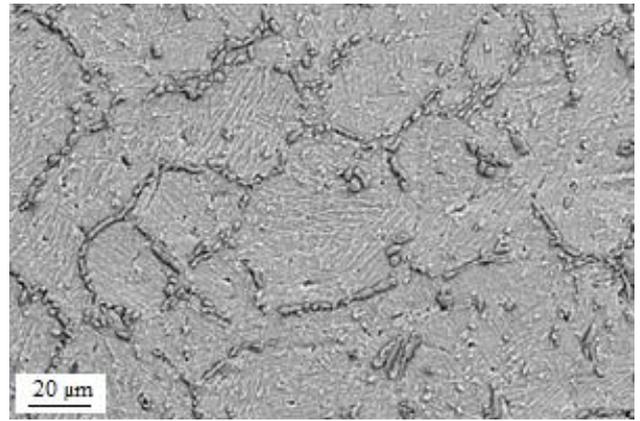
(б)

*Рисунок 11 – РЭМ изображение микроструктуры композита  $TiC_{50.6\%}/Ti-6Al-4V$*

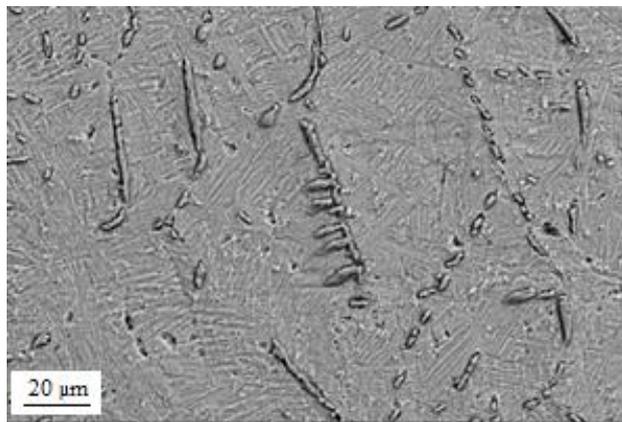
В композите  $TiC_{80.6\%}/Ti-6Al-4V$  формируется структура с более мелкими равноосными зернами, размеры которых варьируются от 30 до 100 мкм (Рис.12,а). Зерна состоят из пластин альфа фазы, эвтектической фазы TiC (Рис.12,б), а также формируются первичные дендриты TiC (Рис.12,в). Средний размер пластин альфа фазы уменьшился и составил 3 мкм, в то время как размеры гранулированных эвтектических частиц TiC увеличиваются. При данной объемной доли TiC в композите  $TiC_{80.6\%}/Ti-6Al-4V$  карбидные частицы полностью расплавляются в титановой матрице, однако начинает происходить перенасыщение расплава углеродом, что приводит к формированию дендритов, которые негативно сказываются на механических характеристиках образцов, способствуя преждевременному разрушению металло-матричного композита.



(a)



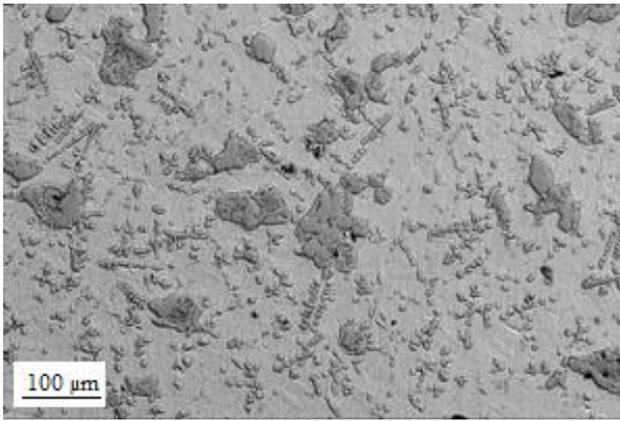
(б)



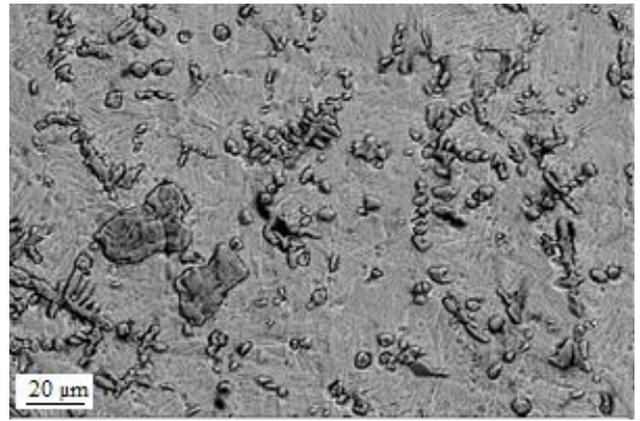
(в)

*Рисунок 12 – РЭМ изображение микроструктуры композита  $TiC_{80.6\%}/Ti-6Al-4V$*

Увеличение объемной доли  $TiC$  в композите до  $TiC_{20.6\%}/Ti-6Al-4V$  приводит к существенному изменению структуры металло-матричного композита. Формируется структура с альфа пластинами и эвтектическими фазами  $TiC$  (Рис.13,а), в форме глобулярных частиц выделяющихся как внутри, так и по границам зерен. Помимо эвтектических частиц выделяются дендриты  $TiC$  и частично расплавленные порошковые частицы  $TiC$  (Рис.13,б). Дендритные выделения и не расплавленные карбидные частицы служат источниками зарождения трещин и формирования пор, что приводит к хрупкому разрушения образца с низкими прочностными характеристиками.



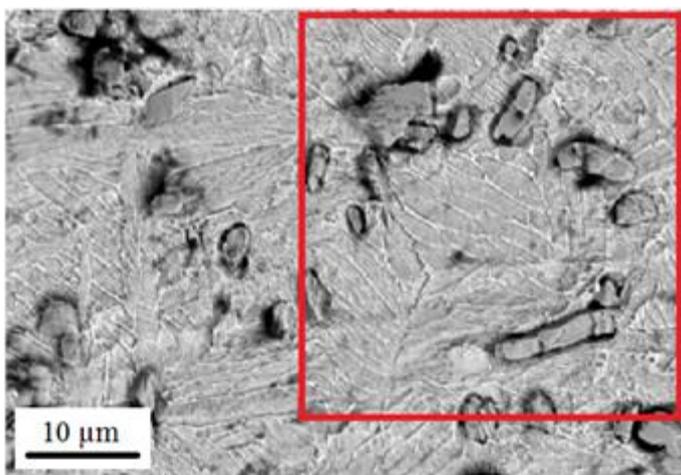
(a)



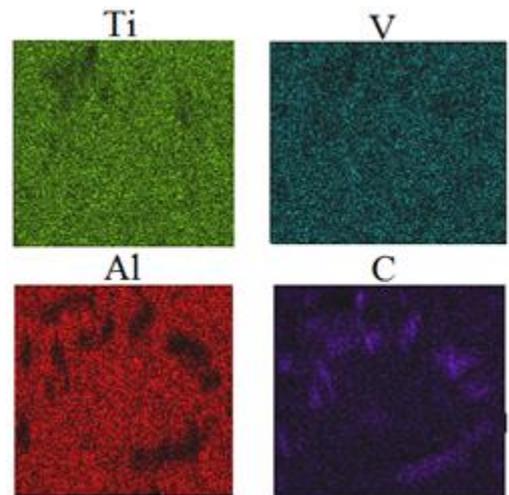
(б)

Рисунок 13 – РЭМ изображение микроструктуры композита  $TiC_{20wt\%}/Ti-6Al-4V$

На рисунке 14 приведена микроструктура композита  $TiC_{20wt\%}/Ti-6Al-4V$ , для подтверждения элементного состава фаз было проведено картирование. Если наложить карты распределения химических элементов (Рис.14,б) на микроструктуру (Рис.14,а), то можно заметить, что в гранулированных эвтектических частицах TiC преобладает светлая область, что соответствует наличию углерода в данной области. По полученным результатам весовой процент содержания углерода в данной области составляет 5 %, что соответствует фазовой диаграмме системы Ti-C.



(a)

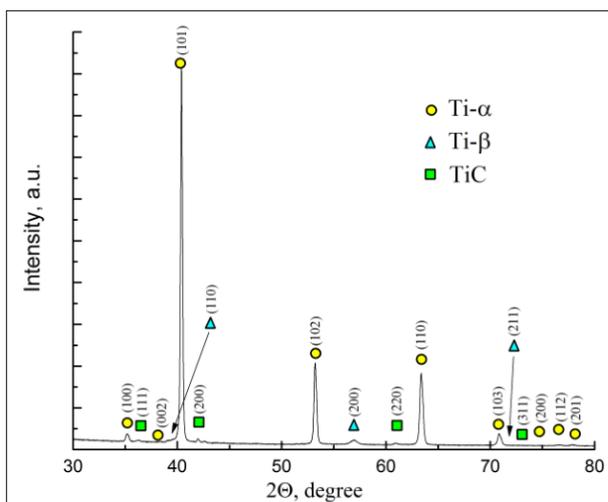


(б)

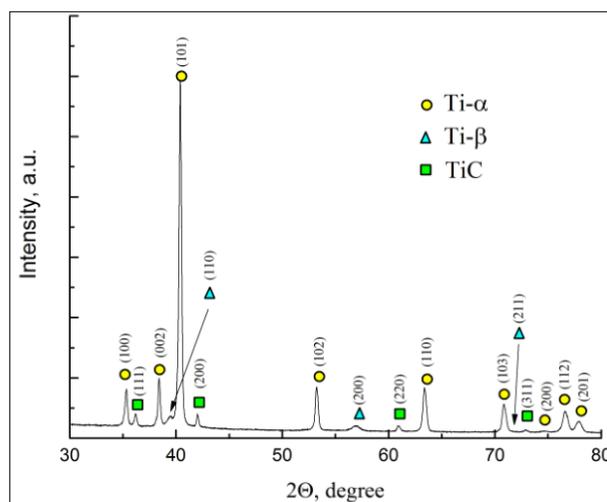
Рисунок 14 – РЭМ изображение микроструктуры композита  $TiC_{20wt\%}/Ti-6Al-$

#### 4V, а также соответствующие карты распределения элементов

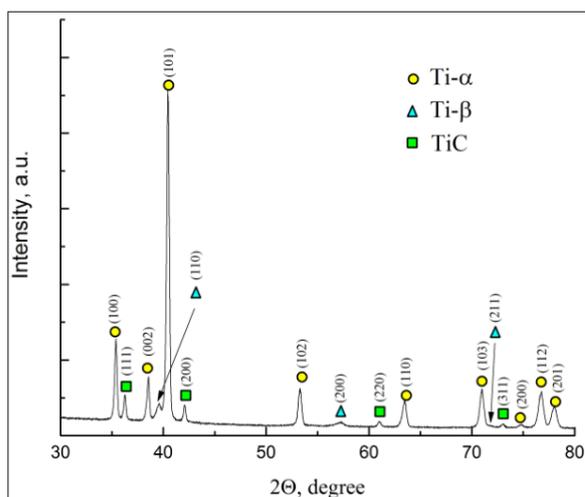
Проведенный рентгеноструктурный анализ подтверждает наличие  $\alpha$ - $\beta$ - и TiC- фаз во всех исследуемых металло-матричных композитах TiC/Ti-6Al-4V (Рис.15). Для композита TiC<sub>10б.%</sub>/Ti-6Al-4V объемная доля  $\alpha$ -фазы составила 97%,  $\beta$ -фазы – 2%, а TiC-фазы – 1%. Также рассчитаны параметры решетки: для (гексагональной плотноупакованной)  $\alpha$ -фазы  $a = 2,9399 \text{ \AA}$ ,  $c = 4,6856 \text{ \AA}$ , отношение  $c/a$  для  $\alpha$ -фазы равно 1,5938, что превышает значение  $c/a$ , для табличного значения – 1,5870. Для  $\beta$ -фазы параметры решетки (объемно-центрированная)  $a = 3,2307 \text{ \AA}$ . Для TiC-фазы  $a = 4,2961 \text{ \AA}$ . Качественный фазовый анализ композита TiC<sub>20%</sub>/Ti-6Al-4V, также подтвердил наличие  $\alpha$ -  $\beta$ - и TiC- фаз. По результатам количественного фазового анализа процентное содержание  $\alpha$ -фазы составило 75%,  $\beta$ -фазы – 5%, а для TiC-фазы – 20%. Рассчитанные параметры решетки для  $\alpha$ -фазы составляют  $a = 2,9331 \text{ \AA}$ ,  $c = 4,6885 \text{ \AA}$ , отношение  $c/a$  составило 1,5984, что также превышает табличное значение. Для  $\beta$ -фазы значение параметра решетки составило  $a = 3,2296 \text{ \AA}$ . Результаты качественного и количественного рентгеноструктурного анализа для исследуемых композитов TiC/Ti-6Al-4V приведены в таблице 7.



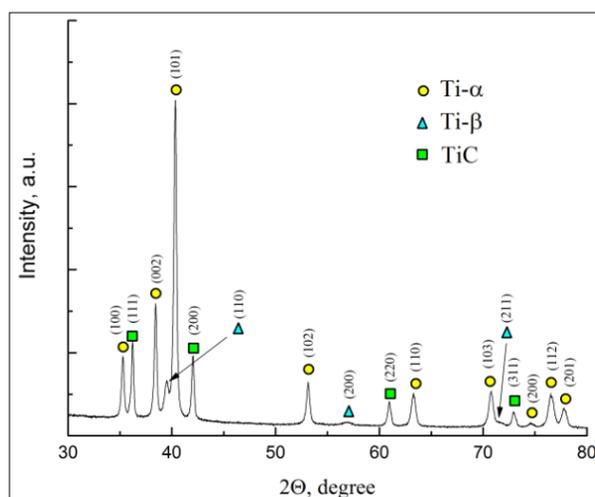
TiC<sub>10б.%</sub>/Ti-6Al-4V



TiC<sub>50б.%</sub>/Ti-6Al-4V



TiC<sub>80.6%</sub>/Ti-6Al-4V



TiC<sub>20.06%</sub>/Ti-6Al-4V

Рисунок 15 – Рентгенограммы композитов TiC/Ti-6Al-4V, полученных методом EBF<sup>3</sup>

### 3.2 Исследование механических свойств композитов TiC/Ti-6Al-4V, полученных методом EBF<sup>3</sup>

Увеличение объемной доли TiC в композитах TiC/Ti-6Al-4V, способствует повышению микротвердости. Значение микротвердости для композита TiC<sub>10.6%</sub>/Ti-6Al-4V в объеме составила 4600 МПа, а в эвтектических фазах TiC достигает 6500 МПа (Рис.16). При увеличении объемной доли TiC до TiC<sub>50.6%</sub>/Ti-6Al-4V, микротвердость повысилась как в объеме ( $H_{\mu}$ =5700 МПа) так и в гранулированных частицах TiC ( $H_{\mu}$ =8000 МПа). Для композита TiC<sub>80.6%</sub>/Ti-6Al-4V значение микротвердости в объеме составило (6400 МПа) в частицах TiC (8400 МПа). Формирующиеся дендриты и частично расплавленные частицы TiC повышают значение микротвердости в композите TiC<sub>20.06%</sub>/Ti-6Al-4V до 7000 МПа в объеме и 8500 в частицах TiC. Твердость включений объемная доля и поперечный размер пластин. Представленное изменение однозначно отражает выше изложенное изменение микроструктуры, чем больше содержание TiC в ванне расплава твердость эвтектических фаз становится больше, но и самое главное меньше становится поперечный размер пласти и большая объемная доля TiC и увеличивает твердость.

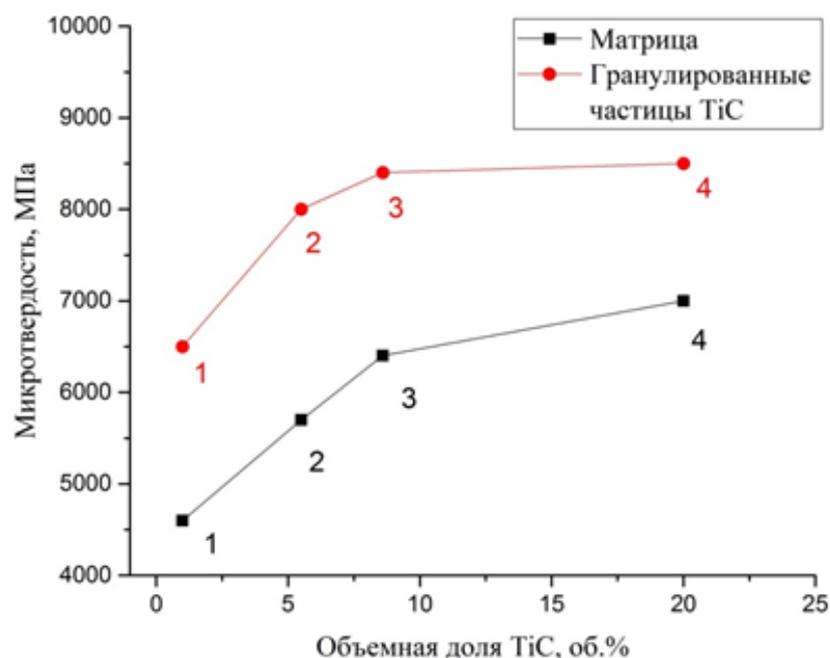
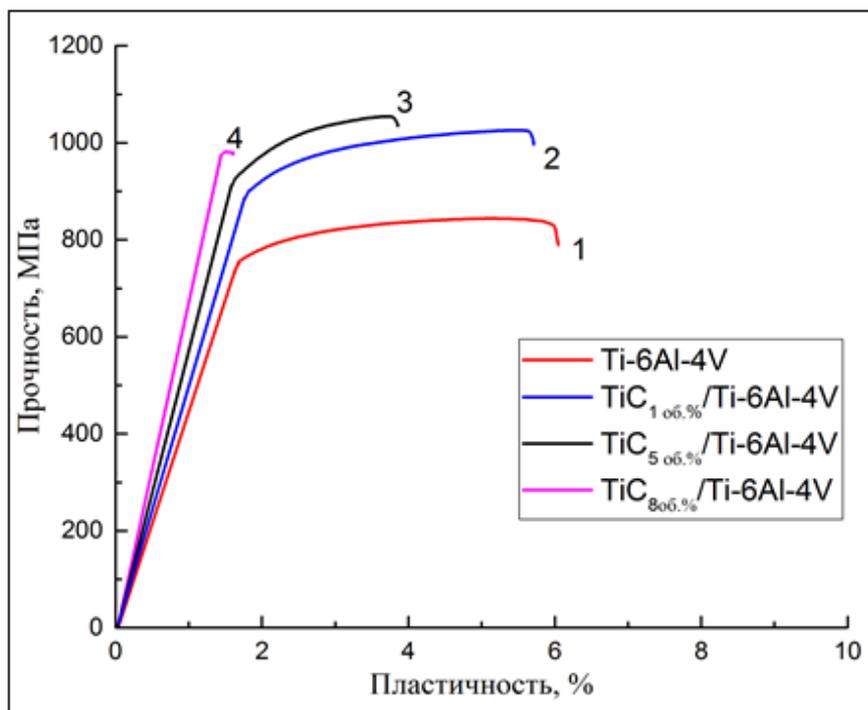


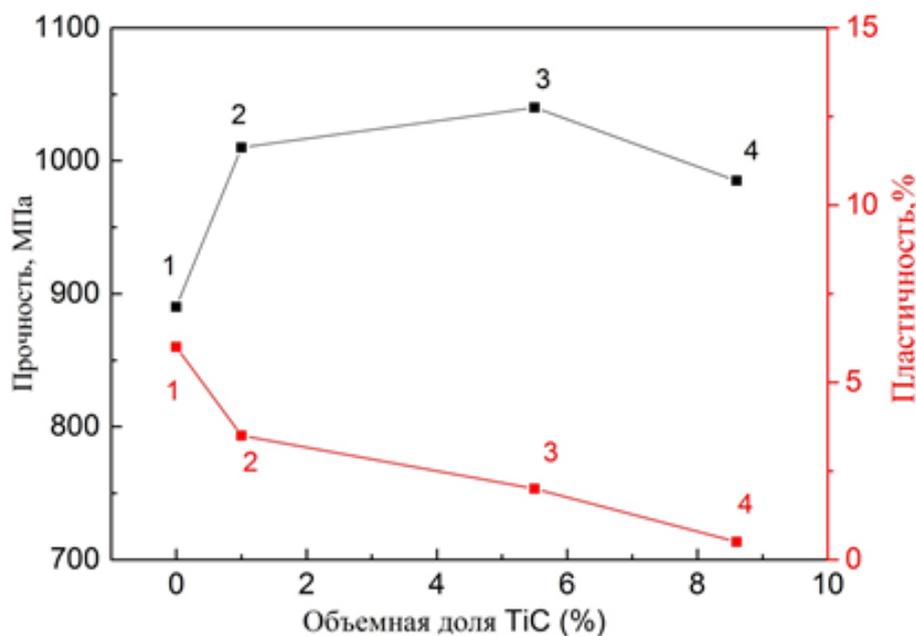
Рисунок 16 – Диаграмма значений микротвердости для композитов TiC/Ti-6Al-4V. Микротвердость в матрице (черные точки) и в гранулированных эвтектических частицах TiC (красные точки). 1 – TiC<sub>1об.%</sub>/Ti-6Al-4V; 2 – TiC<sub>5об.%</sub>/Ti-6Al-4V; 3 – TiC<sub>8об.%</sub>/Ti-6Al-4V; 4 – TiC<sub>20об.%</sub>/Ti-6Al-4V.

Подобное изменение микроструктуры и  $\text{H}_c$  оказывает существенное влияние на прочностные характеристики металло-матричных композитов при испытаниях на растяжение. Испытания на одноосное растяжение показали, что прочность и пластичность образцов, полученных методом электронно-лучевого плавления проволоки титанового сплава Ti-6Al-4V, составляют 890 МПа и 6%, соответственно. При электронно-лучевом плавлении металло-матричного композита TiC<sub>1об.%</sub>/Ti-6Al-4V удается увеличить его прочность почти на 13,4%, которая достигает значения 1010 МПа (Рис.17). При этом, существенно снижается его пластичность (до 3,5%). При дальнейшем увеличении объемной доли TiC в композите до TiC<sub>5об.%</sub>/Ti-6Al-4V прочность на растяжение увеличивается до 1040 МПа, однако снижается пластичность (2%). При увеличении объемной доли TiC композите до TiC<sub>8об.%</sub>/Ti-6Al-4V происходит снижение прочности (985 МПа) на растяжение и пластичности (0,8%). Основная причина заключается в том, что не расплавленные частицы

TiC и дендриты TiC с большим средним размером способствуют преждевременному разрушению композитов.



(a)



(б)

Рисунок 17 – Кривые (а) и диаграмма результатов (б) после испытаний на растяжение композитов TiC/Ti-6Al-4V, полученных методом EBF<sup>3</sup>. 1 – Ti-6Al-4V; 2 – TiC<sub>1 об.%</sub>/Ti-6Al-4V; 3 – TiC<sub>5 об.%</sub>/Ti-6Al-4V; 4 – TiC<sub>8 об.%</sub>/Ti-6Al-4V

Таблица 7 – Характеристики исследованных металло-матричных композитов TiC/Ti-6Al-4V

Образец	Фаза	Объемная доля, %	Параметры решетки, Å		Микротвердость, МПа
			a	c	
TiC <sub>10об.%</sub> /Ti-6Al-4V	Ti-α	97	a = 2,9399	c = 4,6856	Матрица – 4600 Эвтектические частицы TiC – 6500
	Ti-β	2	a = 3,2307		
	TiC	1	a = 4,2961		
TiC <sub>50об.%</sub> /Ti-6Al-4V	Ti-α	90	a = 2,9378	c = 4,6840	Матрица – 5700 Эвтектические частицы TiC – 8000
	Ti-β	5	a = 3,2183		
	TiC	5	a = 4,3044		
TiC <sub>80об.%</sub> /Ti-6Al-4V	Ti-α	88,3	a = 2,9345	c = 4,6811	Матрица – 6400 Эвтектические частицы TiC – 8400
	Ti-β	3,7	a = 3,2313		
	TiC	8	a = 4,3001		
TiC <sub>20об.%</sub> /Ti-6Al-4V	Ti-α	74,6	a = 2,9331	c = 4,6885	Матрица – 7000 Эвтектические частицы TiC – 8500
	Ti-β	5,4	a = 3,2296		
	TiC	20	a = 4,2955		

## Заклучение

По результатам исследований, представленных в данной магистерской диссертации, можно сделать следующие выводы:

1. Разработана технология 3D-печати металло-матричных композитов путем одновременной подачи в ванну расплава титановой проволоки Ti-6Al-4V и карбидного порошка TiC. При этом достигается однородное распределение карбидных фаз в процессе роста 3D-напечатанного металло-матричного композита TiC/Ti-6Al-4V.

2. Установлено, что варьируя объемной долей TiC в составе композита TiC/Ti-6Al-4V возможно изменение его внутренней микроструктуры. Так в композите TiC<sub>10об.%</sub>/Ti-6Al-4V формируется структура с пластинами альфа фазы и выделениями гранулированных эвтектических фазы TiC, распределяющихся как внутри, так и по границам зерен. При увеличении объемной доли карбидных частиц до TiC<sub>50об.%</sub>/Ti-6Al-4V увеличивается поперечный размер эвтектических фаз. В то время как при изготовлении композита TiC<sub>80об.%</sub>/Ti-6Al-4V кроме эвтектических фаз выделяются дендриты TiC, что может быть вызвано перенасыщением титановой связки углеродом. В то же время распределение мелкодисперсных карбидных частиц по границам пластин альфа фазы приводит к уменьшению их поперечного размера. Существенное изменение структуры композита наблюдается при увеличении объемной доли TiC до TiC<sub>200об.%</sub>/Ti-6Al-4V, структура состоит из не расплавленных порошковых частиц TiC и дендритных выделений.

3. Прочность и пластичность для образцов, полученных методом электронно-лучевого плавления проволоки титанового сплава Ti-6Al-4V, составляют 890 МПа и 6%. При формировании металло-матричного композита TiC/Ti-6Al-4V путем электронно-лучевого плавления проволоки Ti-6Al-4V с добавлением карбидных частиц TiC обуславливает существенное увеличение микротвердости и прочностных характеристик при испытаниях

на одноосное растяжение. Максимальное значение прочности (1040 МПа) достигается в композите состава  $\text{TiC}_{50\text{об.}\%}/\text{Ti-6Al-4V}$ . Дальнейшее увеличение  $\text{TiC}$  в композите  $\text{TiC}_{80\text{об.}\%}/\text{Ti-6Al-4V}$  способствует уменьшению значения прочности до 985 МПа. С увеличением содержания  $\text{TiC}$  в металло-матричном композите  $\text{TiC}_x/\text{Ti-6Al-4V}$  пластичность образцов, полученных методом  $\text{EBF}^3$  постепенно снижается.

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

### **Введение**

Темой настоящей магистерской диссертации является: Влияние объемной доли частиц TiC на микроструктуру и механические свойства композита TiC/Ti-6Al-4V, полученного методом электронно-лучевого плавления проволоки.

В процессе поиска источников финансирования для проведения научного исследования и коммерциализации его результатов, оценка коммерческой ценности работы является необходимым условием. Помимо превышения технических параметров над предыдущими разработками необходимо понимать коммерческую привлекательность научного исследования.

Целью выполнения финансово-экономической части выпускной квалификационной работы является формирование навыков оценки результата научной работы и поиск источников финансирования для проведения научного исследования. Данный раздел, предусматривает рассмотрение следующих задач:

- Оценка коммерческого потенциала разработки;
- Планирование научно-исследовательской работы;
- Расчет бюджета научно-исследовательской работы;
- Определение ресурсной, финансовой, бюджетной эффективности исследования.

## **4.1 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научного исследования с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения**

### ***4.1.1 Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения***

В процессе работы рассматривались три варианта реализации данного устройства:

Вариант 1 ( $B_{\phi}$ ) – метод, использовавшийся в данной работе Electron beam freeform fabrication (EBF<sup>3</sup>);

Вариант 2 ( $B_{к1}$ ) – изготовление деталей методом Selective laser melting (SLM);

Вариант 3 ( $B_{к2}$ ) – изготовление деталей основанных на традиционных методах (Литье).

Детальный анализ конструктивного исполнения необходим, т.к. каждый тип конструктивного исполнения имеет свои достоинства и недостатки. Данный анализ производится с применением оценочной карты, приведенной в таблице 8. Экспертная оценка производится по техническим характеристикам и экономическим показателям по 5 бальной шкале, где 1 – наиболее низкая оценка, а 5 – наиболее сильная. Общий вес всех показателей в сумме должен составлять 1.

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

$$K = \sum_i^n B_i \cdot B_i$$

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

Таблица 8 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений (разработок)

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		Б <sub>ф</sub>	Б <sub>к1</sub>	Б <sub>к2</sub>	К <sub>ф</sub>	К <sub>к1</sub>	К <sub>к2</sub>
1	2	3	4	5	6	7	8
Технические критерии оценки ресурсоэффективности							
1. Классы материалов для использования	0,2	5	4	3	1	0,8	0,6
2. Удобство в эксплуатации	0,25	5	5	3	1,25	1,25	0,75
3. Уровень шума работы установки	0,1	4	4	2	0,4	0,4	0,2
4. Качество изделий	0,1	4	4	3	0,4	0,4	0,3
5. Простота в эксплуатации	0,1	4	4	4	0,4	0,4	0,4
6. Скорость создания изделий	0,1	5	4	2	0,5	0,4	0,2
Экономические критерии оценки эффективности							
1. Цена изготавливаемой продукции	0,15	4	3	2	0,6	0,45	0,3
Итого:	1	31	28	17	4,55	4,1	2,75

Примеры расчетов конкурентоспособности для научной разработки и конкурентов:

$$K_{\phi} = 0,2 \cdot 5 + 0,25 \cdot 5 + 0,1 \cdot 4 + 0,1 \cdot 4 + 0,1 \cdot 4 + 0,1 \cdot 5 + 0,15 \cdot 4 = 4,55$$

$$K_{к1} = 0,2 \cdot 4 + 0,25 \cdot 5 + 0,1 \cdot 4 + 0,1 \cdot 4 + 0,1 \cdot 4 + 0,1 \cdot 4 + 0,15 \cdot 3 = 4,1$$

$$K_{к2} = 0,2 \cdot 3 + 0,25 \cdot 3 + 0,1 \cdot 2 + 0,1 \cdot 3 + 0,1 \cdot 4 + 0,1 \cdot 2 + 0,15 \cdot 2 = 2,75$$

Проведенный анализ конкурентных технических решений показал, что вариант №1, который используется в настоящей магистерской работе,

является наиболее предпочтительным, выгодным и эффективным типом исполнения готового устройства.

#### 4.1.2 SWOT-анализ

SWOT-анализ применяют для исследования внешней и внутренней среды проекта. В таблице 9, представлены результаты SWOT-анализа, для настоящей магистерской диссертации.

Таблица 9 – Матрица SWOT

	<b>Strengths (сильные стороны)</b>	<b>Weaknesses (слабые стороны)</b>
	<p>S1. Легкий интерфейс использования</p> <p>S2. Низкая стоимость производства по сравнению с другими технологиями</p> <p>S3. Высокая скорость создания изделий</p> <p>S4. Изготовление деталей с погрешностью в размерах на <math>\pm 0,2</math> мм на каждые 100 мм (высокоточное производство)</p>	<p>W1. Установка не транспортабельна из-за больших габаритов</p> <p>W2. Необходимость поддержания оптимальной влажности в помещении, для получения рабочего вакуума</p> <p>W3. Длительный процесс подготовки установки к работе из-за больших температур в камере</p>
<b>Opportunities (возможности)</b>	<p>Наличие необходимых материалов и оборудования, а также персонала в процессе исследований может способствовать повышению производительности в будущем.</p>	<p>Для повышения спроса на изготовленную продукцию необходимы квалифицированные кадры среди потенциальных потребителей</p>
<p>O1. Легкость управления мощностью электронного пучка позволяет использовать разнообразные режимы плавки</p> <p>O2. Возможность использовать расходный материал в виде проволоки и порошка</p> <p>O3. Изготовление деталей</p>		

методом EBF <sup>3</sup> возможно даже на космических станциях в открытом космосе O4. Технология может применяться в любом мелкосерийном производстве		
<b>Threats (угрозы)</b> T1. Периодическая неисправность электронной пушки T2. Недостаток квалифицированных специалистов T3. Неумышленное совершение НСД. T4. Несвоевременное финансирование научного исследования при дальнейшем развитии проекта	Периодическая не исправность электронной пушки может способствовать к изготовлению бракованной продукции, исправить данный недостаток будет не возможно во время работы установки, так как процесс автоматизирован	Низкий уровень проникновения на рынок способствует несвоевременному финансированию научного исследования при дальнейшем развитии проекта.

*Таблица 10 – Связь сильных сторон с возможностями*

	S1	S2	S3	S4
O1	+	-	-	+
O2	-	+	+	+
O3	-	+	+	+
O4	-	+	-	+

*Таблица 11 – Связь слабых сторон с возможностями*

	W1	W2	W 3
O1	+	-	+
O2	+	+	+
O3	-	+	-
O4	-	-	-

Таблица 12 – Связь сильных сторон с угрозами

	S1	S2	S3	S4
T1	-	-	-	-
T2	-	-	-	-
T3	-	-	-	-
T4	-	-	-	-

Таблица 13 – Связь слабых сторон с угрозами

	W1	W2	W 3
T1	-	+	+
T2	-	-	+
T3	-	-	-
T4	+	+	+

## 4.2 Планирование научно-исследовательской работы

### 4.2.1 Структура работ в рамках научного исследования

Комплекс предполагаемых работ включает в себя следующие задачи:

- Определить структуру работ в рамках исследования;
- Определить участников каждой работы;
- Установить продолжительность работ;
- Построить график проведения отдельных этапов исследования.

Для выполнения данного исследования необходимо сформировать рабочую группу, в состав которой входят руководитель и инженер. Для каждой из запланированных работ, необходимо выбрать исполнителя этой работы.

Разработанный список задач и производимых работ, в рамках проектирования, а также распределение исполнителей по этим работам, представлен в виде таблицы 14.

Таблица 14 – Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№ работы	Содержание работ	Должность исполнителя
Разработка технического задания	1	Составление и утверждение задания	Руководитель
			Инженер
Выбор направления исследования	2	Изучение поставленной задачи и поиск материалов по теме	Инженер
	3	Выбор методов исследования	Руководитель
			Инженер
	4	Календарное планирование работ	Руководитель
Инженер			
Теоретические и экспериментальные исследования	5	Подготовка образцов для исследования	Инженер
	6	Проведение эксперимента	Инженер
Обобщение и оценка результатов	7	Анализ полученных результатов, выводы	Руководитель
			Инженер
	8	Оценка эффективности полученных результатов	Руководитель
			Инженер
Разработка технической документации и проектирование	9	Составление пояснительной записки	Инженер

#### 4.2.2 Определение трудоемкости выполнения работ

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

Несмотря на то, что трудоемкость зависит от трудно учитываемых параметров, т.е. носит вероятностный характер, ее можно определить

экспертным путем, в «человеко-днях». Ожидаемое (среднее) значение трудоемкости  $t_{ож}$  определяется по формуле:

$$t_{ож} = \frac{3t_{min} + 2t_{max}}{5}$$

где  $t_{min}$  – минимально возможное время выполнения поставленной задачи исполнителем (является оптимистичной оценкой: при удачном стечении обстоятельств), чел.-дн.;  $t_{max}$  – максимально возможное время выполнения поставленной задачи исполнителем (является пессимистичной оценкой: при неудачном стечении обстоятельств, чел.-дн.

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

$$T_p = \frac{t_{ож}}{Ч_i}$$

где  $Ч_i$  – численность исполнителей, выполняющих одновременно одну и ту же работу на данном этапе, чел.

По всем работам результаты расчета продолжительности в рабочих днях представлены в таблице 15.

#### ***4.2.3 Разработка графика проведения научного исследования***

Диаграмма Ганта является наиболее удобным и наглядным способом представления графика проведения работ.

Диаграмма Ганта представляет собой отрезки, размещенные на горизонтальной шкале времени. Каждый отрезок соответствует отдельной задаче или подзадаче. Начало, конец и длина отрезка на шкале времени соответствуют началу, концу и длительности задачи.

Для построения графика Ганта, следует, длительность каждой из выполняемых работ из рабочих дней перевести в календарные дни. Для этого необходимо воспользоваться следующей формулой, для каждого исполнителя расчеты производятся индивидуально:

$$T_{к\text{ рук}} = T_p \cdot k_{кал} ; T_{к\text{ инж}} = T_p \cdot k_{кал}$$

где  $k_{кал}$  – коэффициент календарности.

Коэффициент календарности определяется по следующей формуле:

$$k_{\text{кал.рук}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}}} ; k_{\text{кал.инж}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}}}$$

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

Расчет трудоемкости и продолжительности работ, на примере задачи «Составление и утверждение технического задания»:

$$t_{\text{ож}} = \frac{3t_{\text{min}} + 2t_{\text{max}}}{5} = \frac{3 \cdot 3 + 2 \cdot 10}{5} = 5,8 \text{ чел. - дн.},$$

$$T_{\text{р}} = \frac{t_{\text{ож}}}{\text{Ч}_i} = \frac{5,8}{2} = 2,9 \text{ раб. дн}$$

Расчет календарного коэффициента для пятидневной рабочей недели (рабочая неделя инженера):

$$k_{\text{кал.инж}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}}} = \frac{365}{365 - 104 - 14} = 1,48$$

Расчет календарной продолжительности выполнения работы, на примере задачи «Составление и утверждение технического задания»:

$$T_{\text{к инж}} = T_{\text{р}} \cdot k_{\text{кал}} = 2,9 \cdot 1,48 = 4,292 \approx 4 \text{ кал. дн.}$$

Расчет календарного коэффициента для шестидневной рабочей недели (рабочая неделя руководителя):

$$k_{\text{кал.рук}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}}} = \frac{365}{365 - 66 - 14} = 1,28$$

Расчет календарной продолжительности выполнения работы, на примере задачи «Составление и утверждение технического задания»:

$$T_{\text{к рук}} = T_{\text{р}} \cdot k_{\text{кал}} = 2,9 \cdot 1,28 = 3,712 \approx 4 \text{ кал. дн.}$$

Все полученные значения в календарных днях округляются до целого числа, а затем сводятся в таблицу 15.

*Таблица 15 – Временные показатели проектирования*

Название работы	Трудоёмкость работ						Длительность работ в рабочих днях $T_{pi}$		Длительность работ в календарных днях $T_{ki}$	
	$t_{min}$ , чел-дни		$t_{max}$ , чел-дни		$t_{ож}$ , чел-дни					
	Руководитель	Инженер	Руководитель	Инженер	Руководитель	Инженер	Руководитель	Инженер	Руководитель	Инженер
Составление и утверждение технического задания	3	3	10	10	5,8	5,8	2,9	2,9	4	4
Изучение поставленной задачи и поиск материалов по теме	-	10	-	30	-	18	-	18	-	27
Выбор методов исследования	7	7	15	15	10,2	10,2	5,1	5,1	7	8
Календарное планирование работ	8	8	12	12	9,6	9,6	4,8	4,8	6	7
Подготовка образцов для исследования	-	8	-	15	-	10,8	-	10,8	-	16
Проведение эксперимента	-	11	-	26	-	17	-	17	-	25
Анализ полученных результатов, выводы	8	8	18	18	12	12	6	6	8	9
Оценка эффективности полученных результатов	7	7	15	15	10,2	10,2	5,1	5,1	7	8
Составление пояснительной записки	-	12	-	35	-	21,2	-	21,2	-	31
<b>Итого:</b>							24	91	32	135

На основе таблицы 15 строятся календарный план-график. График строится, для максимального по длительности исполнения работ в рамках научно-исследовательского проекта на основании таблицы 15 с разбивкой по месяцам и декадам (10 дней) за период времени выполнения магистерской

диссертации. При этом работы на графике следует выделить различной штриховкой в зависимости от исполнителей, ответственных за ту или иную работу.

Таблица 16 – Календарный план проведения НИР

№	Вид работ	Исполнители	Т <sub>к</sub> , кал, дн.	Продолжительность выполнения работ														
				Январь			Февраль			Март			Апрель			Май		
				1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	Составление и утверждение технического задания	Руководитель	4	1														
		Инженер	4		1													
2	Изучение поставленной задачи и поиск материалов по теме	Инженер	27		1	2	3											
3	Выбор методов исследования	Руководитель,	7					1										
		Инженер	8						1	2	3							
4	Календарное планирование работ	Руководитель	6						1									
		Инженер	7							1	2	3						
5	Подготовка образцов для исследования	Инженер	16							1	2	3						
6	Проведение эксперимента	Инженер	25								1	2	3					
7	Анализ полученных результатов, выводы	Руководитель	8											1				
		Инженер	9													1	2	3
8	Оценка эффективности полученных результатов	Руководитель	7														1	
		Инженер	8															1
9	Составление пояснительной записки	Инженер	31														1	
<i>Итого календарных дней</i>			135															

 – Инженер     – Руководитель

В результате выполнения подраздела был разработан план-график выполнения этапов работ для руководителя и инженера, позволяющий оценить и спланировать рабочее время исполнителей, а также рассчитано количество дней, в течение которых работал каждый из исполнителей.

### **4.3 Бюджет научного исследования**

В данном разделе составлен полный бюджет научных исследований. Расходы научных исследований состоят из материальных затрат, расходов на специальные оборудования, основной и дополнительной заработной платы, социальные отчисления и накладные расходы.

#### ***4.3.1 Сырье, материалы, комплектующие изделия и покупные полуфабрикаты***

В статью расходов входят затраты на приобретение всех видов материалов, комплектующих изделий и полуфабрикатов, необходимых для выполнения работ по данному научному исследованию. В таблице 17 приведены расходы по данной статье.

*Таблица 17 – Сырье, материалы, комплектующие изделия и покупные полуфабрикаты*

Наименование	Марка, размер	Кол-во	Цена за единицу, руб.	Сумма, руб.
Проволока	кг	3	6500	19500
Порошок	кг	5	5500	27500
Канцелярские товары	шт.			1500
Спирт	100 мл	2	45	90
Абразивная бумага для шлифовки	Диаметр 300 мм	20	50	10000
Всего за материалы				58590
Транспортно-заготовительные расходы (3-5%)				2343,6
Итого по статье $C_m$				60933,6

#### ***4.3.2 Специальное оборудование для научных работ***

В рамках выполнения исследования использовалось имеющееся в собственности ИФПМ СО РАН оборудование, и закупка дополнительного

специального оборудования не производилась. В таком случае затраты на специальное оборудование отсутствуют. Однако в ходе эксплуатации оборудования средства были затрачены в соответствии с амортизационными отчислениями. Расчёт амортизации производится на находящееся в использовании оборудование. В итоговую стоимость проекта входят отчисления на амортизацию за время использования оборудования в статье накладных расходов.

Расчет амортизации проводится следующим образом:

Норма амортизации:

$$H_A = \frac{1}{n}$$

где  $n$  – срок полезного использования в количестве лет

Амортизация:

$$A = \frac{H_A \cdot I}{12} \cdot m$$

где  $I$  – итоговая сумма, тыс. руб.;  $m$  – время использования, мес.

Таблица 18 – Амортизационные расходы

№	Наименование оборудования	Стоимость, руб.	Срок полезного использования, лет	Норма амортизации, %	Время использования, мес.	Амортизационные расходы, руб
1	ЭЛУ 9	4500000	10	10	2	75000
2	Дифрактометр Shimadzu XRD-7000	740000	7	14	1	8757
3	Микротвердомер ПМТ – 3	145000	10	10	2	2417
4	Оптический микроскоп ZEISS AXIOVERT25	500000	10	10	2	8333
Итого:						94507

Рассчитаем амортизацию для ЭЛУ9, с учётом, что срок полезного использования 10 лет:

$$H_A = \frac{1}{10} = 0,1$$

Общую сумму амортизационных отчислений находим следующим образом:

ЭЛУ9:

$$A = \frac{0,1 \cdot 4500000}{12} \cdot 2 = 75000 \text{ руб.}$$

Микротвердомер:

$$A = \frac{0,1 \cdot 145000}{12} \cdot 2 = 2417 \text{ руб.}$$

Дифрактометр:

$$A = \frac{0,142 \cdot 740000}{12} \cdot 1 = 8757 \text{ руб.}$$

Микроскоп:

$$A = \frac{0,1 \cdot 500000}{12} \cdot 2 = 8333 \text{ руб.}$$

Суммарные затраты амортизационных отчислений:

$$A = 7500 + 2417 + 8757 + 8333 = 94507 \text{ руб.}$$

#### **4.3.3 Основная заработная плата**

В данном разделе рассчитывается заработная плата инженера и руководителя, помимо этого необходимо рассчитать расходы по заработной плате, определяемые трудоемкостью проекта и действующей системой оклада.

Основная заработная плата ( $Z_{\text{осн}}$ ) одного работника рассчитывается по следующей формуле:

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

где  $Z_{\text{осн}}$  – основная заработная плата одного работника;  $T_{\text{раб}}$  – продолжительность работ, выполняемых работником, раб. дн. (табл.15);  $Z_{\text{дн}}$  – среднедневная заработная плата работника, руб.

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_{\text{м}} \cdot M}{F_{\text{д}}}$$

где  $Z_m$  – месячный должностной оклад работника, руб.;  $F_d$  – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дн.

$M$  – количество месяцев работы без отпуска в течение года.

при отпуске в 28 раб. дня –  $M = 11,2$  месяца, 5-дневная рабочая неделя;

при отпуске в 56 раб. дней –  $M = 10,3$  месяца, 6-дневная рабочая неделя.

Для шестидневной рабочей недели (рабочая неделя руководителя):

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_m \cdot M}{F_d} = \frac{51285 \cdot 10,3}{246} = 2147,3 \text{ руб.}$$

Для пятидневной рабочей недели (рабочая неделя инженера):

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_m \cdot M}{F_d} = \frac{33150 \cdot 11,2}{213} = 1743,1 \text{ руб.}$$

Должностной оклад работника за месяц:

Для руководителя:

$$Z_m = Z_b \cdot (1 + k_{\text{пр}} + k_d) \cdot k_p = 26300 \cdot (1 + 0,3 + 0,2) \cdot 1,3 = 51285 \text{ руб.}$$

Для инженера:

$$Z_m = Z_b \cdot (1 + k_{\text{пр}} + k_d) \cdot k_p = 17000 \cdot (1 + 0,3 + 0,2) \cdot 1,3 = 33150 \text{ руб.}$$

где  $Z_b$  – базовый оклад, руб.;  $k_{\text{пр}}$  – премиальный коэффициент 0,3;  $k_d$  – коэффициент доплат и надбавок 0,2;  $k_p$  – районный коэффициент, равный 1,3 (для г. Томска).

Таблица 19 – Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель	Магистр-инженер
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней - выходные дни - праздничные дни	52/14	104/14
Потери рабочего времени - отпуск - невыходы по болезни	48/5	24/10
Длительный годовой фонд	246	213

рабочего времени		
------------------	--	--

*Таблица 20 – Расчет основной заработной платы*

Исполнители	Оклад	$k_p$	$k_{пр}$	$k_d$	$Z_m$ руб.	$Z_{дн}$ руб.	$T_{раб}$ дни	$Z_{осн}$ руб.
Руководитель	26300	1,3	0,3	0,2	51285	2147,3	24	51535,2
Инженер	17000	1,3	0,3	0,2	33150	1743,1	91	158622,1
<b>Итого:</b>								<b>210157,3</b>

#### **4.3.4 Дополнительная заработная плата научно-производительного персонала**

Дополнительная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{доп} = k_{доп} + Z_{осн}$$

где  $k_{доп}$  – коэффициент дополнительной зарплаты 0,15;

Дополнительная заработная плата руководителя:

$$Z_{доп} = 0,15 \cdot 51535,2 = 7730,28 \text{ руб.}$$

Дополнительная заработная плата инженера:

$$Z_{доп} = 0,15 \cdot 158622,1 = 23739,315 \text{ руб.}$$

#### **4.3.5 Отчисления на социальные нужды**

Данная статья включает в себя отчисления во внебюджетные фонды, которые рассчитываются по формуле:

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

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

Для руководителя:

$$C_{внеб} = k_{внеб} \cdot (Z_{осн} + Z_{доп}) = 0,3 \cdot (51535,2 + 7730,28) = 17779,644 \text{ руб.}$$

Для инженера:

$$C_{внеб} = k_{внеб} \cdot (Z_{осн} + Z_{доп}) = 0,3 \cdot (158622,1 + 23739,315) = 54708,42 \text{ руб.}$$

Таблица 21 – Отчисления во внебюджетные фонды

Заработная плата	Руководитель	Инженер
Зарплата	59265,48	182361,415
Отчисления во внебюджетные фонды	17779,644	54708,42
<b>Итого:</b>	<b>72488,064</b>	

#### 4.3.6 Накладные расходы

Накладными расходами учитываются прочие затраты организации, такие как: печать и ксерокопирование проектировочных документов, оплата услуг связи.

Накладные расходы в целом:

$$Z_{\text{накл}} = \left( \text{сумма статей} \frac{1}{6} \right) \cdot k_{\text{нр}} = (60933,6 + 94507 + 210157,3 + 31469,595 + 72488,064) \cdot 0,2 = 93911,11 \text{руб.}$$

где  $k_{\text{нр}}$  – коэффициент, учитывающий накладные расходы 0,2.

На основании полученных данных по отдельным статьям затрат составляется калькуляция плановой себестоимости НИ (Влияние объемной доли частиц TiC на микроструктуру и механические свойства композита TiC/Ti-6Al-4V, полученного методом электронно-лучевого плавления проволоки) по форме, приведенной в таблице 22.

Таблица 22 – Группировка затрат по статьям

Статьи							
Сырье, материалы	Амортизация	Основная заработная плата	Дополнительная заработная плата	Отчисления во внебюджетные фонды	Итого без накладные расходы	Накладные расходы	Итого бюджетная стоимость
60933,6	94507	210157,3	31469,6	72488,1	469555,6	93911,1	563466,7

#### 4.4 Определение ресурсоэффективности исследования

Интегральный показатель финансовой эффективности научного исследования получают в ходе оценки бюджета затрат трех (или более) вариантов исполнения научного исследования. Для этого наибольший интегральный показатель реализации технической задачи принимается за

базу расчета (как знаменатель), с которым соотносятся финансовые значения по всем вариантам исполнения.

В качестве вариантов исполнения были выбраны ближайшие аналоги:

1. Метод Selective laser melting. Технология является методом аддитивного производства и использует мощные лазеры для создания трехмерных физических объектов. Позволяет создавать 3D-напечатанные изделия различной формы, в качестве теплового излучения используется лазер. Формирование изделий происходит в атмосфере аргона, что может быть как преимуществом, так и недостатком данного метода.

2. Традиционный метод (Литье). Типовой процесс получения изделий, заключающийся в заполнении специальной ёмкости (формы), формирующей поверхность или часть поверхности изготавливаемого изделия, жидким материалом (металлы) с дальнейшим термо-временным переходом жидкого материала в твердое агрегатное состояние и получения, в результате, твердой заготовки, близкой по конфигурации, размерам и свойствам к изделию.

#### **4.4.1 Интегральный финансовый показатель**

Интегральный финансовый показатель разработки определяется как:

$$I_{\Phi}^p = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{max}}$$

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

$$I_{\Phi}^p = \frac{563466,7}{637000} = 0,88$$

$$I_{\Phi}^{a1} = \frac{585000}{637000} = 0,92$$

$$I_{\Phi}^{a2} = \frac{637000}{637000} = 1$$

Полученная величина интегрального финансового показателя разработки отражает соответствующее численное удешевление стоимости разработки в разгах (0,89).

#### 4.4.2 Интегральный показатель ресурсоэффективности

Интегральный показатель ресурсоэффективности вариантов исполнения определяется следующим образом:

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

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

Расставляем бальные оценки и весовые коэффициенты в соответствии с приоритетом характеристик проекта, рассчитываем конечный интегральный показатель и сводим полученные результаты в таблицу 23.

Таблица 23 – Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

Критерий	Весовой коэффициент параметра	Разработка ЕВФ <sup>3</sup>	SLM	Литье
1. Безопасность при использовании	0,25	5	5	4
2. Удобство в эксплуатации	0,15	4	3	3
3. Энергосбережение	0,20	3	3	2
4. Надежность	0,25	4	4	4
5. Материалоемкость	0,15	4	2	2
<b>Итого:</b>	<b>1</b>	<b>4,05</b>	<b>3,6</b>	<b>3,15</b>

$$I_m^p = 5 \cdot 0,25 + 4 \cdot 0,15 + 3 \cdot 0,2 + 4 \cdot 0,25 + 4 \cdot 0,15 = 4,05$$

$$I_m^{a1} = 5 \cdot 0,25 + 3 \cdot 0,15 + 3 \cdot 0,2 + 4 \cdot 0,25 + 2 \cdot 0,15 = 3,6$$

$$I_m^{a2} = 4 \cdot 0,25 + 3 \cdot 0,15 + 2 \cdot 0,2 + 4 \cdot 0,25 + 2 \cdot 0,15 = 3,15$$

#### 4.4.3 Интегральный показатель эффективности

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

$$I_{\text{финр}}^p = \frac{I_m^p}{I_{\phi}^p}; \quad I_{\text{финр}}^{a1} = \frac{I_m^a}{I_{\phi}^a}; \quad I_{\text{финр}}^{a2} = \frac{I_m^a}{I_{\phi}^a}$$

$$I_{\text{финр}}^p = \frac{4,05}{0,88} = 4,6; \quad I_{\text{финр}}^{a1} = \frac{3,6}{0,92} = 3,9; \quad I_{\text{финр}}^{a2} = \frac{3,15}{1} = 3,15$$

Сравнение интегрального показателя эффективности текущего проекта и аналога позволит определить сравнительную эффективность проекта.

Сравнительная эффективность проекта  $\mathcal{E}_{\text{ср}}$ :

$$\mathcal{E}_{\text{ср}} = \frac{I_{\text{финр}}^p}{I_{\text{финр}}^{a1}} = \frac{4,6}{3,9} = 1,18; \quad \mathcal{E}_{\text{ср}} = \frac{I_{\text{финр}}^p}{I_{\text{финр}}^{a2}} = \frac{4,6}{3,15} = 1,46$$

где  $I_{\text{финр}}^p$  – интегральный показатель разработки;  $I_{\text{финр}}^a$  – интегральный показатель аналога.

Таблица 24 – Сравнительная эффективность разработки

№	Показатели	EBF <sup>3</sup>	SLM	Литье
1	Интегральный финансовый показатель разработки	0,88	0,92	1
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности	4,05	3,6	3,15
3	Интегральный показатель эффективности	4,6	3,9	3,15
4	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	1	1,18	1,46

## **Выводы**

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

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

2. Разработан план-график выполнения этапов работ для руководителя и инженера, позволяющий оценить и спланировать рабочее время исполнителей. Общее количество календарных дней для выполнения исследования – 135, общее количество дней, в течение которых работал инженер – 135, и руководитель – 32;

3. Составлен бюджет проектирования, позволяющий оценить затраты на реализацию проекта, которые составляют 563466,7 руб.;

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

- Значение интегрального финансового показателя ИР составляет 0,88, что является показателем того, что ИР является финансово выгодной, по сравнению с аналогами;
- Значение интегрального показателя ресурсоэффективности ИР составляет 4,05, по сравнению с 3,6 и 3,15;
- Значение интегрального показателя эффективности ИР составляет 4,6, по сравнению с 3,9 и 3,15, и является наиболее высоким, что означает, что техническое решение, рассматриваемое в ИР, является наиболее эффективным вариантом исполнения.

## Глава 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. Условия труда считаются безопасными, если воздействие вредных или опасных производственных факторов не превышает установленные нормативы.

В рамках данной работы проводились исследования образцов металло-матричного композита TiC/Ti-6Al-4V, полученного методом Electron beam freeform fabrication – EBF<sup>3</sup>. Исследования проводились в ИФПМ СО РАН, лаборатории физики поверхностных явлений. При выполнении работ была использована электронно-вычислительная аппаратура.

Процесс работы характеризуется такими вредными факторами, как недостаток естественного освещения, недостаточная освещенность рабочего места, возможность короткого замыкания и поражение исследователя электрическим током.

Необходимо, также учесть возможность возникновения чрезвычайной ситуации. Офисное помещение, в котором проходил процесс работы, располагается на территории Академгородка (г. Томск), для данного региона наиболее характерной чрезвычайной ситуацией является экстремально низкие температуры воздуха.

В данной главе рассмотрены и найдены решения для обеспечения удовлетворительных условий труда исследователя. Проведена характеристика производственных процессов, анализ вредных и опасных факторов при данном виде производственной деятельности и решению вопросов безопасности, на основе требований действующих нормативно-технических документов.

## **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 отводятся 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:

- 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.

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

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 Производительная безопасность

### 5.2.1 Анализ вредных и опасных факторов объекта исследования

Самостоятельно объект исследования, а именно композит TiC/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 25 – Возможные опасные и вредные факторы

Факторы (ГОСТ 12.0.003-2015)	Этапы работ			Нормативные документы
	разработка	получение	испытания	
Отклонение показателей микроклимата	+	+	+	Требования к микроклимату устанавливаются СанПиН 2.2.4.548–96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений
Превышение уровня шума		+	+	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
Недостаточная освещенность рабочей зоны	+	+	+	Требования к освещению устанавливаются СП 52.13330.2016 Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95.
Электробезопасность	+	+	+	ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов.
Контакт с реактивом для травления образцов			+	ГН 2.2.5.3532–18. Предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ в воздухе рабочей зоны.

### ***5.2.2 Анализ вредных и опасных факторов на рабочем месте***

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<sub>2</sub>O , 2 % HNO<sub>3</sub>, 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 Недостаток освещения рабочей зоны*

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 освещенности 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.

Качество освещения влияет на работоспособность сотрудника, на его психологическое состояние в процессе выполнения работ. Наиболее благоприятное влияние на состояние сотрудника оказывает преимущественно естественное освещение. Основными регламентируемыми факторами норм освещения является характер зрительной работы, фон, контраст объекта с фоном, система и вид освещения.

#### 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 под разряд 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  $KЗ = 1,5$ .

#### Расчет естественного освещения

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:

$$e_N = e_H m_N$$

где  $N$  – номер группы обеспеченности естественным светом;  $e_H$  – значение КЕО;  $m_N$  – коэффициент светового климата. Соответственно, при  $e_H = 1$ ,  $m_N = 0,75$ .

$$e_N = 1 \cdot 0,75 = 0,75$$

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.

#### 5.2.2.2 Превышение уровня шума

Шум – беспорядочные колебания различной физической природы, отличающиеся сложностью временной и спектральной структуры. Длительное воздействие шума может привести к ухудшению слуха, а в

отдельных случаях – к глухоте. Установлено, что загрязнение шумовыми колебаниями среды, на рабочем месте, негативно влияет на работающих. Вследствие чего у них снижается внимание, увеличивается расход энергии при одинаковой физической нагрузке, замедляется скорость психических реакций и т.п. В конечном итоге снижается производительность труда и качество выполняемой работы. 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 офисном помещении являются принтер, персональные компьютеры, периодическая работа вытяжной системы. Для расчета уровня шума, возникающего от нескольких источников, используется принцип энергетического суммирования излучений отдельных источников:

$$L = 10 \lg \sum_{i=1}^n n \cdot 10^{0,1 \cdot L_i}$$

где  $L_i$  – уровень звукового давления  $i$ -го источника шума;  $n$  – количество источников шума.

$$L = 10 \lg(4 \cdot 10^{0,1 \cdot 45} + 4 \cdot 10^{0,1 \cdot 50} + 4 \cdot 10^{0,1 \cdot 15} + 4 \cdot 10^{0,1 \cdot 10}) = 57,22 \text{ дБА}$$

По расчету получено значение звука в помещении  $\sim 57$  дБА, которое не превышает предельно установленную величину в 60 дБА, что говорит о соблюдении уровня шума в рабочей зоне.

*Таблица 26 – Уровни шума источников в помещении*

Источник шума	Уровни звука в [дБ]
Жесткий диск	45
Вентилятор	50
Монитор	15
Клавиатура	10

### 5.2.2.3 Микроклимат

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

Оптимальными параметрами для микроклимата в теплое время года считаются: температура воздуха 22-25°C, относительная влажность 40-60 %, скорость движения воздуха не более 0,25 м/с; в холодное время года эти показатели составляют соответственно 20-22°C, 30-45% и 0,1-0,15 м/с. Оптимальные величины показателей микроклимата приведены в таблице 3 .

*Таблица 27 – Оптимальные величины показателей микроклимата на рабочих местах производственных помещений*

Период года	Категория работ по уровню энергозатрат	Температура воздуха, °С	Относительная влажность, %	Скорость движения воздуха, м/с
Холодный	Ia	20-22	30-45	0,1-0,15
Теплый	Ia	22-25	40-60	0,25

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

Допускается наличие, в закрытых помещениях, микроклиматических показателей которые способны вызывать изменения теплового баланса организма. При условии, что не нарушается состояние здоровья, но возможно возникновение ощущения дискомфорта и снижение работоспособности. Допустимые параметры устанавливаются в производственных помещениях, где по каким-либо причинам, обеспечение оптимальных климатических параметров невозможно. Допустимые нормы для работ легкой категории приведены в таблице 28.

Таблица 28 – Допустимые величины показателей микроклимата на рабочих местах производственных помещений

Период года	Категория работ по уровню энергозатрат	Температура воздуха, °С	Относительная влажность, %	Скорость движения воздуха, м/с
Холодный	Ia	17-23	15-75	0,1-1,3
Теплый	Ia	18-27	15-75	0,1-0,4

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

#### 5.2.2.4 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 отдаленные 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.

#### 5.2.2.5 Электробезопасность

Электробезопасность – система организационных и технических мероприятий и средств, обеспечивающих защиту людей от вредного и опасного воздействия электрического тока, электрической дуги, электромагнитного поля и статического электричества.

В настоящее время большая доля внимания уделена электробезопасности, так как использование в повседневной жизни различного вида электроустановок неуклонно растет. 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.

Безопасной для человека является величина переменного тока – 10мА, постоянного – 50мА, безопасное напряжение 12В.

Электротравма опасна прежде всего воздействием тока на сердечнососудистую систему. Напряжение от 36 вольт и выше вполне способно вызвать остановку сердца или дыхания, однако убивает не напряжение, а сила тока. Рабочее помещение по опасности относится к 1 группе, т.е. без повышенной опасности (сухое, хорошо отапливаемое, помещение с токонепроводящими полами, с температурой 18-20°С, с влажностью 40-50%).

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

### **5.3 Экологическая безопасность**

Охрана окружающей среды представляет собой комплекс мер, направленный на ограничение негативного воздействия человеческой деятельности на природу.

Одним из таких факторов является неподобающая утилизация люминесцентных ламп, используемых в системе освещения рабочего помещения. Люминесцентные лампы содержат от 3 до 5 мг ртути и относятся к 1 классу токсичных отходов. Следовательно, такого типа лампы требуют особые условия хранения, эксплуатации и утилизации.

Проблема переработки промышленного и бытового мусора значительно упрощается процессом его сортировки. В группе, в которой выполнялась данная работа, организован сбор промышленных отходов, сортировка и отправка их на утилизацию.

Макулатура (черновики, отработанная бумага и т.п.) будет собираться в размерах более одного килограмма. Утилизация производится по адресу 634024, г. Томск, ул. Трудовая, 11 компанией ООО «Пирс». Предварительно макулатура должна быть отчищена от посторонних предметов, таких как, например, скрепки.

Компания ООО «Экоорг» осуществляет утилизацию отработанных картриджей от принтеров практически всех компаний. Предварительная обработка картриджей бывших в употреблении не требуется.

ООО Научно-производственное предприятие «ЭКТОМ» осуществляет бесплатный сбор, обезвреживание и транспортировку опасных отходов отработанных люминесцентных ламп.

Отходы, содержащие гальванические элементы (например, батарейки) собирает на переработку компания «Батарейки, сдавайтесь!», у которой расположены точки сбора по всему городу.

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

Чрезвычайная ситуация (ЧС) – состояние, при котором в результате возникновения источника чрезвычайной ситуации на объекте, определенной

территории или акватории нарушаются нормальные условия жизни и деятельности людей, возникает угроза их жизни и здоровью, наносится ущерб имуществу населения, народному хозяйству и окружающей природной среде.

Чрезвычайные ситуации бывают техногенные и природные. Техногенные чрезвычайные ситуации вызваны производственной деятельностью человека, в то время как природные ЧС возникают по причине природных явлений и процессов. Так, к техногенным чрезвычайным ситуациям относятся пожары и взрывы на производстве, аварии с выбросом химически опасных или радиоактивных веществ и т.д. Природные ЧС могут возникнуть ввиду наводнения, заморозка, урагана и т.д.

#### ***5.4.1 Защита в чрезвычайных ситуациях***

##### *5.4.1.1 Техногенные ЧС*

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

Технический регламент о требованиях пожарной безопасности регламентирует классификацию зданий по степени огнестойкости, конструктивной и функциональной пожарной опасности. По пожарной опасности помещение и здание возможно отнести к классу Д, т.е. к помещениям, в которых находятся (обращаются) негорючие вещества и материалы в холодном состоянии.

Возникновение пожара при работе с электронной аппаратурой может быть по причинам как электрического, так и неэлектрического характера. Причины возникновения пожара электрического характера: короткое замыкание, перегрузки по току, статическое электричество и т. д. Для устранения причин возникновения и локализации пожаров в помещении лаборатории должны проводиться следующие мероприятия:

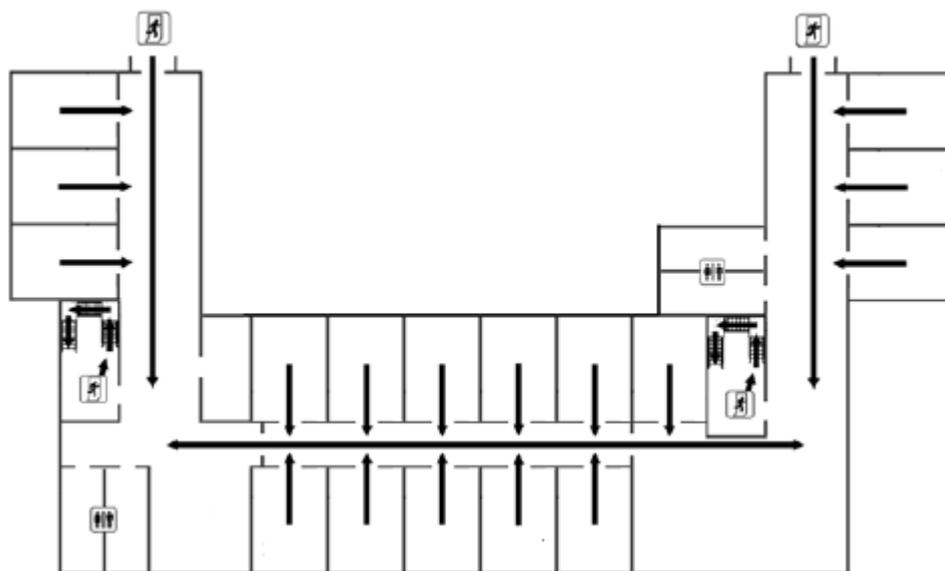
- использование только исправного оборудования;
- проведение периодических инструктажей по пожарной безопасности;
- отключение электрооборудования, освещения и электропитания при предполагаемом отсутствии обслуживающего персонала или по окончании работ;
- содержание путей и проходов для эвакуации людей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

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

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

При возникновении возгорания необходимо немедленно прекратить работу, отключить электрооборудование, позвонить в подразделение пожарной охраны по телефону 01 или 010, сообщить о случившемся руководителю подразделения и приступить к тушению огня первичными средствами пожаротушения.

Необходимость разработки плана эвакуации людей в случае пожара, инструкций к нему, а так же проектирование системы оповещения людей о пожаре в здании, назначение лиц имеющих право на её включение регламентированы п.п.16,17,102 ППБ 01-03. План эвакуации из рассматриваемого офисного помещения, изображен на рисунке 1.



*Рисунок 18 – План эвакуации людей при пожаре*

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

#### *5.4.1.2 Природные ЧС*

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

Возможными ЧС на объекте в данном случае, могут быть сильные морозы и диверсия. Для Сибири в зимнее время года характерны морозы и

метели. В результате порывов ветра могут быть обрывы линий электропитания, из-за чего возможны перебои в электроснабжении; перегрузки, которые могут стать причиной пожара. Для предотвращения подобных ситуаций необходима организация системы аварийного электропитания, по возможности проведение линии электроснабжения под землей. Низкие температуры могут привести к авариям систем теплоснабжения. В случае замерзания системы отопления должны быть предусмотрены запасные обогреватели. Их количества и мощности должно хватать для того, чтобы работа на производстве не прекратилась.

Также рекомендуется организация дополнительного служебного транспорта для лучшего сообщения, перемещения сотрудников и мобильности их в достижении аварийных участков.

В последнее время, в связи с внешней политикой страны, возможны проявления диверсии. Угрозы могут быть как ложными, так и действительными, поэтому необходимы меры предосторожности по этому поводу. В качестве мер безопасности могут быть предприняты следующие действия – установка системы видеонаблюдения и круглосуточной охраны, сохранение конфиденциальной информации об охранной системе, а также введение пропускной системы. Необходимо также проводить информирование должностных лиц и тренировки по отработке действий на случай экстренной эвакуации.

## **Выводы**

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, недостаточная освещенность, контакт человека с реактивом для травления образцов, отклонение показателей микроклимата, а также воздействие электрического тока. В результате анализа были предложены решения, обеспечивающие снижение влияния выявленных опасных и вредных факторов на рабочий персонал. 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, а именно пожара, диверсии и влияния климатических условий, а также предложены меры для их предотвращения.

## Список использованной литературы

1. J.H. Zhu, P.K. Liaw, J.M. Corum, H.E. McCoy, High-temperature mechanical behavior of Ti-6Al-4V alloy and TiC p /Ti-6Al-4V composite, *Metall. Mater. Trans. A* 30 (6) (1999) 1569–1578.
2. Князева А.Г., Коростелева Е.Н., Криницын М.Г., Крюкова О.Н., Прибытков Г.А., Чумаков Ю.А. *Металломатричные композиты с тугоплавкой дисперсной фазой: синтез, структура, применение.* – Томск: Изд-во «Иван Федоров», 2019. – 262 с.
3. Y.-J. Kim, H. Chung, S.-J.L. Kang, Processing and mechanical properties of Ti–6Al–4V/TiC in situ composite fabricated by gas–solid reaction, *Mater. Sci. Eng. A* 333 (1–2) (2002) 343–350.
4. D. Ding, Z. Pan, D. Cuiuri, H. Li, Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests, *Int. J. Adv. Manuf. Tech.* 81 (2015) 465–481.
5. Зленко М.А., Попович А.А., Мутылина И.Н. *Аддитивные технологии в машиностроении.* Изд-во СПбГУ, 2013, 221 с.
6. Hideki Kyogoku. The current status and outlook for metal Additive Manufacturing in Japan / Hideki Kyogoku // *Metal Additive Manufacturing, Autumn/Fall 2015.* – Vol. 1, № 3. – P. 31–39.
7. 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.
8. Wang F. et al. Microstructure and mechanical properties of wire and arc additive manufactured Ti-6Al-4V // *Metallurgical and Materials Transactions A.* – 2013. – Vol. 44. №. 2. – P. 968-977.
9. Илларионов А.Г. *Технологические и эксплуатационные свойства титановых сплавов: учебное пособие / Попов А.А.* – Екатеринбург : Урал. ун-та, 2014. – 137 с.

10. Зайнтдинов А.М., Александров Ю.Б. Перспективы использования 3D-печати в авиастроении. Международный научно-исследовательский журнал. №5 2015. 64-65 с.
11. Зленко М.А., Аддитивные технологии в машиностроении /Нагайцев.М.В, Довбыш В.М. // пособие для инженеров. – М.ГНЙ РФ ФГУА «НАМИ» 2015. 220 с.
12. F. Wang, J. Mei, X.H. Wu, Direct laser fabrication of Ti6Al4V/TiB, J. Mater. Process. Technol. 195 (2008) 321–326.
13. S. Pouzet, P. Peyre, C. Gorny, O. Castelnau, T. Baudin, F. Brisset, C. Colin, P. Gadaud, Additive layer manufacturing of titanium matrix composites using the direct metal deposition laser process, Mater. Sci. Eng. A 677 (2016) 171–181.
14. A. Katz-Demyanetz, V.V. Popov Jr., A. Kovalevsky, D. Safranchik, A. Koptyug. Powder-bed additive manufacturing for aerospace application: Techniques, metallic and metal/ceramic composite materials and trends, Manufacturing Rev. 6, 5 (2019).
15. H. Attar, Sh. Ehtemam-Haghighi, D. Kent, X. Wu, M.S. Dargusch, Comparative study of commercially pure titanium produced by laser engineered net shaping, selective laser melting and casting processes, Mater. Sci. Eng. A 705 (2017) 385–393.
16. Laser metal deposition (LMD) [Электронный ресурс]:URL: [https://3dtoday.ru/wiki/DMLS\\_print/](https://3dtoday.ru/wiki/DMLS_print/)
17. Electron beam freeform fabrication (EBF3) [Электронный ресурс]:URL: [https://3dtoday.ru/wiki/EBF3\\_print/](https://3dtoday.ru/wiki/EBF3_print/)
18. 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.
19. Taminger, K.M.B. and Hafley, R.A., “Characterization of 2219 Aluminum Produced by Electron Beam Freeform Fabrication,” Proceedings of 13th SFF Symposium, 482-489, (2002).

20. Brice, C.A., et al., "Rapid Prototyping and Freeform Fabrication via Electron Beam Welding Deposition," Proceeding of Welding Conference, (2002).
21. Dave, V.R., Matz. J.E., and Eagar, T.W., Electron Beam Solid Freeform Fabrication of Metal Parts," Proceedings of 6th SFF Symposium, 64-71, (1995).
22. А. И. Гусев, Фазовые равновесия, фазы и соединения в системе Ti-C, Усп. хим., 71 (6) (2002), 507–532.
23. Y.X. Jin, S.Y. Zeng, E.L. Zhang, Z.J. Zhu, Forming mechanism of morphologies of eutectic TiC in TiC/Ti alloys, Rare Metal Mater. Eng. 32 (6) (2003) 451–455.
24. S. Sundaresan, G.D.J. Ram, G.M. Reddy, Microstructural refinement of weld fusion zones in  $\alpha$ - $\beta$  titanium alloys using pulsed current welding, Mater. Sci. Eng. A 262 (1–2) (1999) 88–100.
25. Z.J. Wei, L. Cao, H.W. Wang, C.M. Zou, Microstructure and mechanical properties of TiC/Ti-6Al-4V composites processed by in situ casting route, Mater. Sci. Technol. 27 (8) (2011) 1321–1327.
26. S.Y. Liu, Y.C. Shin, The influences of melting degree of TiC reinforcements on microstructure and mechanical properties of laser direct deposited Ti6Al4VTiC composites, Mater. Des. 136 (2017) 185–195.
27. O.F. Ochonogor, C. Meacock, M. Abdulwahab, S. Pityana, A.P.I. Popoola, Effects of Ti and TiC ceramic powder on laser-cladded Ti-6Al-4V in situ intermetallic composite, Appl. Surf. Sci. 263 (2012) 591-596.
28. R.M. Mahamood, E.T. Akinlabi, M. Shukla, S. Pityana, Scanning velocity influence on microstructure, microhardness and wear resistance performance of laser deposited Ti6Al4V/TiC composite, Mater. Des. 50 (2013) 656-666.
29. Z.J. Wei, L. Cao, H.W. Wang and C.M. Zou, Modification and control of TiC morphology by various ways in arc melted TiC/Ti-6Al-4V composites, Mater. Sci. Technol. 27 (8) (2011) 556–561.

30. J.J. Candel, V. Amigó, J.A. Ramos, D. Busquets, , “Sliding wear resistance of TiCp reinforced titanium composite coating produced by laser cladding,” *Surf. Coatings Technol.* 204 (20) (2010) 3161-3166.
31. L. Li, J. Wang, P. Lin, H. Liu, Microstructure and mechanical properties of functionally graded TiCp/Ti6Al4V composite fabricated by laser melting deposition, *Ceram. Int.* 43 (2017) 16638-16651.
32. J. Wang, L. Li, P. Lin, J. Wang, Effect of TiC particle size on the microstructure and tensile properties of TiCp/Ti6Al4V composites fabricated by laser melting deposition. *Opt. Laser Technol.* 105 (2018) 195–206.
33. F. Wang, J. Mei, H. Jiang, X. Wu, Laser fabrication of Ti6Al4V/TiC composites using simultaneous powder and wire feed, *Mater. Sci. Eng. A* 445–446 (2007) 461–466.
34. J. Cheol Oh, E. Yun, M.G. Golkovski, S. Lee, Improvement of hardness and wear resistance in SiC/Ti–6Al–4V surface composites fabricated by high-energy electron beam irradiation, *Mater. Sci. Eng. A* 351 (2003) 98-108.
35. A. Katz-Demyanetz, V.V. Popov Jr., A. Kovalevsky, D. Safranchik, A. Koptyug. Powder-bed additive manufacturing for aerospace application: Techniques, metallic and metal/ceramic composite materials and trends, *Manufacturing Rev.* 6, 5 (2019).
36. H. Peng, C. Liu, H. Guo, Y. Yuan, S. Gong, H. Xu, Fabrication of WCp/NiBSi metal matrix composite by electron beam melting. *Mater. Sci. Eng. A* 666 (2016) 320–323.
37. X. Tao, Z. Yao, Sh. Zhang, J. Liao, J. Liang, Investigation on microstructure, mechanical and tribological properties of in-situ (TiB + TiC)/Ti composite during the electron beam surface melting, *Surf. Coat. Tech.* 337 (2018) 418–425.
38. L. VÁLY, D. GRECH, E. NEUBAUER, M. KITZMANTEL, Ľ. BAČA and N. STELZER, Preparation of Titanium Metal Matrix Composites Using Additive Manufacturing, *Key Engineering Materials.* 742 (2017) 129-136.

# Приложение А

## Раздел № 1

### Литературный обзор

### Literature review on additive technologies

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
ОБМ81	Буйлук Артем Олегович		

Консультант школы отделения (НОЦ) – Экспериментальной физики:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ОЭФ ИЯТШ	Лидер Андрей Маркович	д.т.н., профессор		

Консультант – лингвист ОИЯ ШБИП:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОИЯ ШБИП	Аксенова Наталия Валерьевна	к.ф.н., доцент		

## **1. Literature review**

### ***1.1 Classification of additive technologies***

The high cost of manufacturing titanium alloy products, mainly related to their mechanical post-processing. It led to the research and development of various technologies for the manufacture of parts that would allow you to get products as close as possible in shape and properties to the final part [5]. Methods of additive technologies allow creating three-dimensional products of complex shape based on a three-dimensional computer model by layering the material [6].

Interest in additive technologies as an alternative to traditional technological methods for the production of metal products has emerged in the aviation industry, space and power engineering [6-7]. Motivation for the introduction of additive technologies in industry has been the economic feasibility.

Additive technologies offer new opportunities in manufacturing products, and in some cases they are less expensive than traditional methods [8]. In contrast to traditional technologies, in which the processes of manufacturing parts are carried out by subtracting material from the workpiece, the use of additive technologies involves the construction of the part by adding layer after layer until the finished product is obtained. Material waste from traditional part processing technologies sometimes exceeds 70%, while when using additive technologies, this figure tends to zero.

When implementing AT in the aviation industry, this provided a change in the approach to design: improvement of mass-dimensional and other functional performance indicators of products [9].

"Direct growing" of products using additive technologies can be carried out in different ways and using different materials, but any of them is based on the principle of layer-by-layer creation (build-up) of a solid object [8-10]. Currently, AT are represented by several printing methods, which differ in consumables and principles of their application (Table 1).

According to the principle of product formation there are two directions of development of additive technologies:

The process of creating products occurs by combining the material located on the working surface of the platform of technological equipment (Bed Deposition) [11]. In this way, parts are formed in selective laser melting (SLM) and electron beam melting (EBM). After the manufacturing process is complete, there is a certain amount of material that can be used to form the next part.

The process of forming products by direct deposition of material. The finished product is formed in layers due to the material heated to the required temperature, which is delivered to the working platform from a special distribution device [11]. This principle of forming a part is laid down in the methods (EBF<sup>3</sup>, LMD).

In turn, the formation of products by direct deposition can also be classified into two methods. Options feed the consumable material in the form of powder (LMD) or wire (EBF<sup>3</sup>). During fabrication of parts from powder, a large percentage of powder particles are scattered around the chamber due to their small size, which leads to a large loss of material, since the reuse of scattered powder particles is not recommended. Therefore, the powder is replaced by a more economically profitable consumable material in the form of wire, which is no longer inferior to the powder, on the market of modern 3D-printing.

*Table 1 – Classification of additive technologies depending on the source material and its state [13]*

Condition	Materials	Process
Liquid	Polymers	Fused Deposition Modelling (FDM) Color Jet Printing (CJP)
Powder	Polymers, metals, ceramics	Selective laser sintering (SLS) Direct metal laser sintering (DMLS) Selective laser melting (SLM) Electron beam melting (EBM)

Wire	Polymers, metals and composites	Electron beam freeform fabrication (EBF3) Electron beam additive manufacture (EBAM)
------	---------------------------------	--

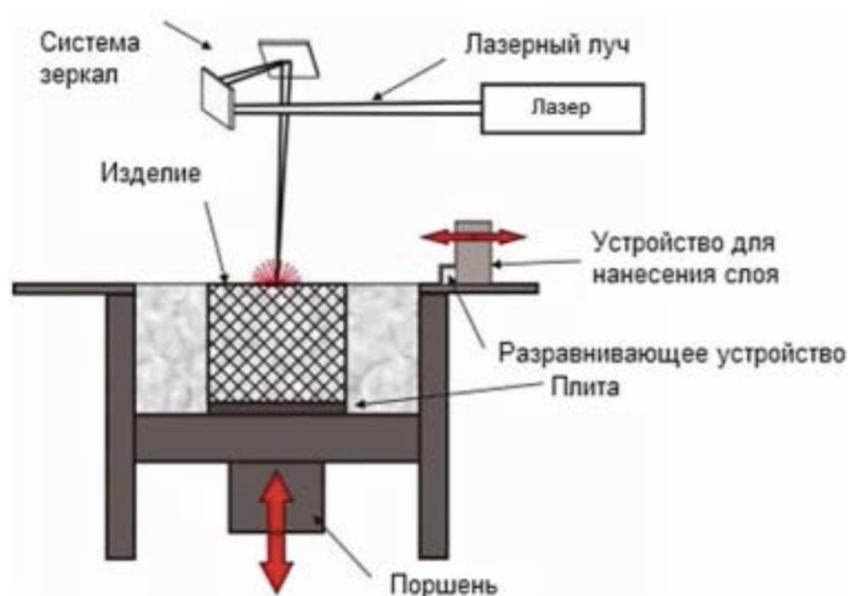
The most popular and actively developed are two main technologies for creating metal matrix composites – laser melting deposition-LMD and electron beam melting-EBM. These methods make it possible to simultaneously feed metal matrix powders and reinforcing powders into the melt bath, which makes it possible to create three-dimensional products of complex shape using a three-dimensional computer model by layer-by-layer application of the material [12]. Despite the fact that the most common method for producing composites based on Ti-6Al-4V is the LMD method [13], in recent years, additive technologies for metal-ceramic composites have been actively developed by electron-beam fusion [14]. Unlike the LMD method, the electron-beam melting process takes place in a vacuum, which makes it possible to obtain a better microstructure of titanium alloys and their composites, which are characterized by high chemical activity at elevated temperatures. The disadvantage of the LMD method is large residual stresses that occur in the parts during laser fusion due to the high cooling rate [15].

The production cycle of the direct laser melting (LMD) method consists of applying a thin layer of powder to a work surface – usually a metal table that can move in a vertical direction (Fig.1). The printing process takes place in a working chamber filled with inert gases (argon). The lack of oxygen avoids oxidation of the consumable material, which makes it possible to print with materials such as titanium. Each layer of the model is fused, repeating the contours of the layers of the digital model. Melting is performed using a laser beam directed along the X and Y axes by two mirrors with a high deflection rate. The power of the laser emitter is high enough to melt the powder particles into a homogeneous material. The process of creating products occurs as a result of local layer-by-layer fusion of metal materials under the influence of laser radiation [16]. Almost any metals and

alloys in powder form are used as consumables. Step by step process technology looks like this:

- Special software splits a three-dimensional computer model into layers of a certain thickness;
- A layer of powder is applied to the work surface using a special movable block;
- Laser beam, according to the 3D model, the first layer is sintered;
- Then the working surface is lowered to the thickness of the layer, a new layer of powder is poured, the laser burns the second layer of the object on top of the first, e.d. to the high temperature in the working chamber, the layers are fused [12-15].

This process is repeated from layer to layer until the model is completely created.



*Figure 1 – Schematic image of an installation operating on the principle of LMD-technology*

Laser melting deposition has been used in the following areas:

- Aerospace – production of elements of gas turbines, engines and aircraft hulls;
- Medicine – manufacturing of prostheses and implants;
- Small-scale production-production of molds, blanks, inserts [11].

Of particular interest are additive technologies based on electron beam melting of wire (Electron Beam Free-Form Fabrication, EBF<sup>3</sup>) [17]. Electron beam melting of wire material is the process of obtaining parts and products with predetermined shape and properties by layer-by-layer local deposition of metal wire using an electron beam. The technology is based on the unique ability of the electron beam to concentrate energy. The high-power electron beam is focused in the working area into a small spot with a diameter of 2-3 mm. This bundle of energy is then directed to a wire located near the substrate. Under the action of an electron beam, the metal wire begins to melt in the area where the beam energy is absorbed. The electron beam creates a bath of molten metal on the surface of the formed product. The wire is fed into the bath at a certain speed. The speed of wire feed affects the properties of the product being formed. Figure 2 shows the schematic diagram of the installation and the process of electron beam layer-by-layer growth using the EBF<sup>3</sup> method.

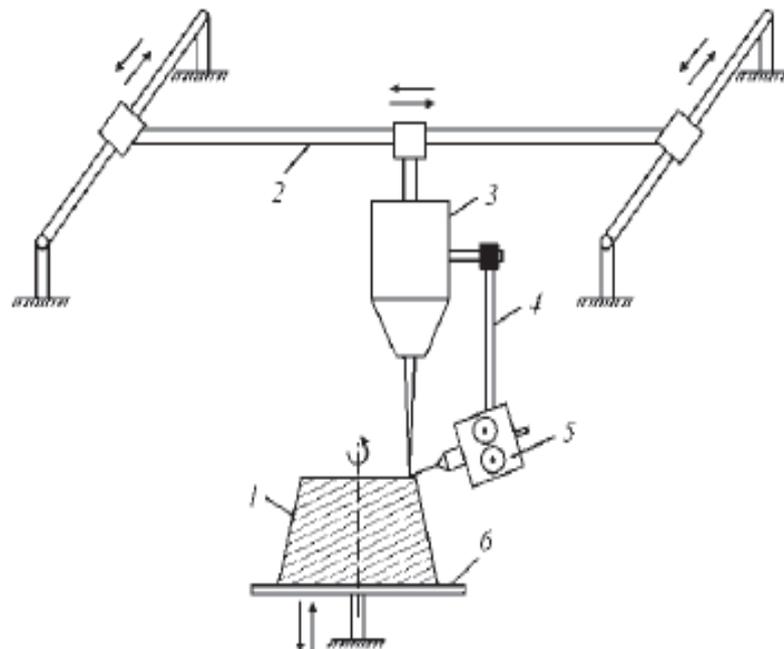


Figure 2 – Schematic representation of additive wire electron beam 3D technology (EBF<sup>3</sup>): 1 - manufactured product; 2 - manipulator; 3 - electron beam gun; 4 - rod holder of the feed mechanism; 5 - falling mechanism; 6 - turntable with a vertical movement mechanism [21]

The formed product moves inside the vacuum chamber relative to the stationary electron gun and wire feeder using a manipulator table that has four degrees of freedom (moving along the X and Y axes, rotation relative to the z axis, moving along the Z axis). The wire diameter can vary from tenths of a millimeter to 3 mm.

EBF<sup>3</sup> technology is aimed at the additive production of complex models with reduced material consumption compared to traditional methods and the practical absence of the need for mechanical processing. The process of forming products is carried out in a vacuum chamber, because any gas or air environment creates too high resistance for the electrons. At the same time, in such a vacuum environment, the properties of the material that are lost during melting are preserved [19-21].

## ***1.2 Manufacturing of TiC/Ti-6Al-4V composites using additive technologies***

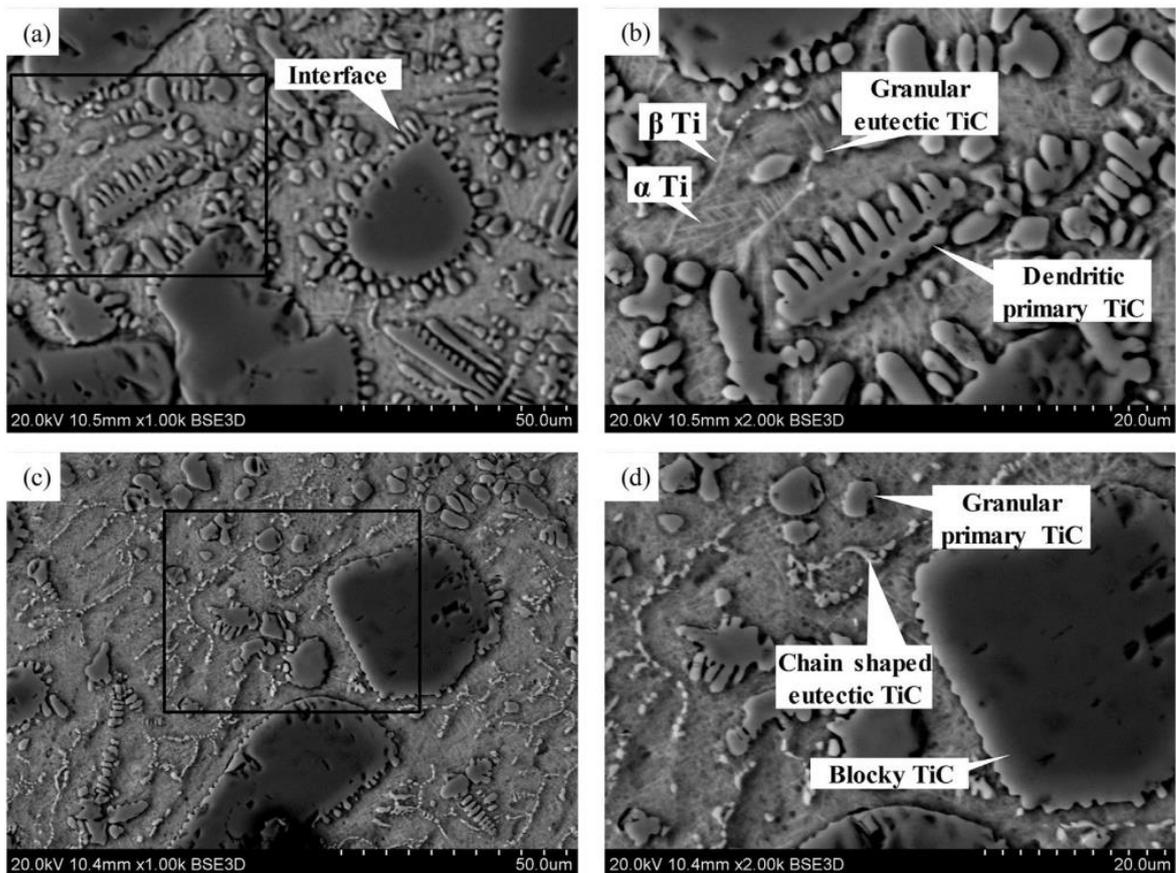
Metal-matrix composites (MMC) obtained by additive technologies attract a lot of attention in various fields, due to their high physical, mechanical and operational properties in the aviation and space industry. One of the main problems in obtaining metal-matrix composites is to ensure the physical and chemical compatibility of the matrix and the reinforcing phase. The uniform distribution of particles in the volume of the alloy and the finished product plays an important role in obtaining a high-quality product, which is difficult to achieve due to different particle sizes and different physical properties of the particles and matrix.

### ***1.2.1 Manufacturing of TiC/Ti-6Al-4V composites using laser melting deposition***

Currently, there is a fairly large number of works devoted to the preparation of TiC/Ti-6Al-4V composites by laser alloying of powders of titanium alloy Ti-6Al-4V and titanium carbide TiC. In this case, most of the articles are devoted to the study of the influence of technological parameters of 3D printing on the patterns of formation of the structure and phase composition of the TiC/Ti-6Al-

4V composite [25-27], and therefore on their hardness [28], strength [29] and tribological properties [30]. It is shown that there is an optimal content of TiC particles, which provides the maximum increase in the strength characteristics of the metal matrix composite.

In [31], a study of the microstructural and mechanical properties of the TiC/Ti-6Al-4V composite obtained by the LMD method was performed. It is shown that in the process of laser melting of Ti-6Al-4V powder and TiC carbide particles, there is not enough laser power to completely melt TiC particles. Thus, TiC can be partially melted by laser radiation, and some TiC particles can be partially dissolved in the molten Ti-6Al-4V, which leads to the enrichment of the molten metal with carbon. The structure of the TiC/Ti-6Al-4V composite consists of the eutectic TiC phase in the form of chains and granules, unmelted TiC particles, TiC dendritic phases, and the structure characteristic of Ti-6Al-4V consisting of plates  $\alpha$ -Ti and the  $\beta$ -Ti phase distributed along the grain boundaries (Fig.3).



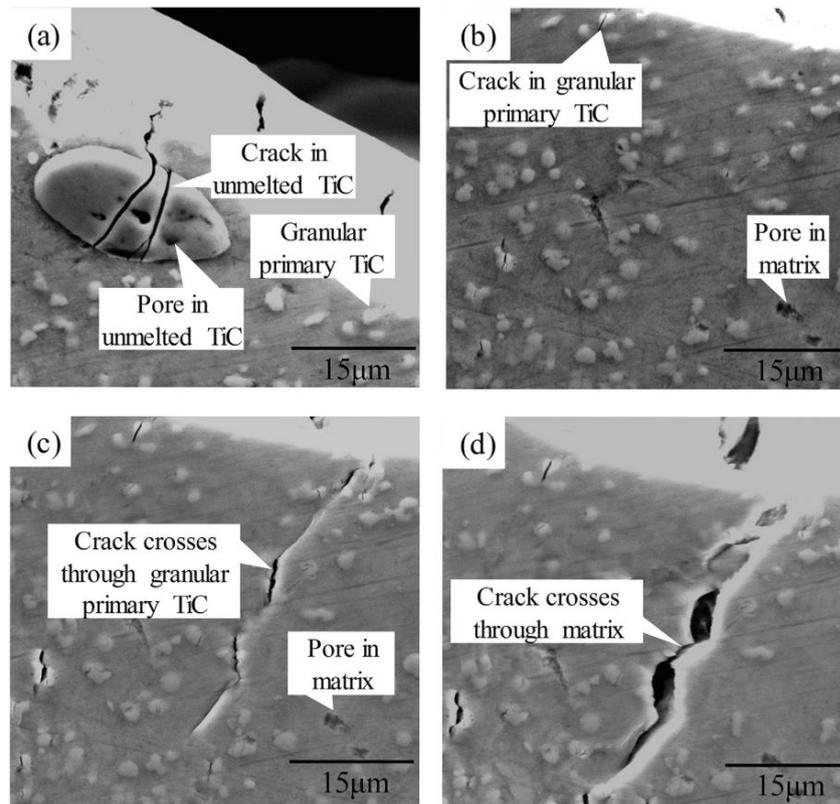
*Figure 3 – SEM image of the microstructure of the TiC/Ti-6Al-4V composite obtained by laser melting deposition*

According to [31], the tensile strength and plasticity of samples obtained by laser melting of Ti-6Al-4V titanium alloy powder are 1090 MPa and 6%, respectively. When laser melting of the powder composite TiC5vol%/Ti-6Al-4V, it is possible to increase its strength by almost 12,3%, which reaches 1250 MPa. However, its plasticity is significantly reduced (up to 1,5%). With a further increase in the volume fraction of TiC, the tensile strength and elongation of TiC/Ti-6Al-4V composites gradually decrease. The main reason is that unflavored TiC particles and dendritic TiC phases with a large average size contribute to premature destruction of composites (Fig. 4). It is also shown that the cross section of microhardness increases with an increase in the volume fraction of TiC particles (Table 2).

*Table 2 – Mechanical properties of TiC/Ti-6Al-4V composites with different TiC content [31]*

Sample	Tensile strength, MPa	Elongation, %	Microhardness, HV
Ti-6Al-4V	1100	5,5	375
TiC <sub>5%</sub> /Ti-6Al-4V	1250	1,5	430
TiC <sub>10%</sub> /Ti-6Al-4V	1100	0,5	445
TiC <sub>15%</sub> /Ti-6Al-4V	1000	0,3	450
TiC <sub>20%</sub> /Ti-6Al-4V	900	0,2	485
TiC <sub>30%</sub> /Ti-6Al-4V	850	0,1	500

An increase in the volume fraction of TiC in the composite contributes to the formation of pores in the TiC/Ti-6Al-4V composite, which also negatively affect the mechanical properties of samples. Pores can be formed both in the Ti-6Al-4V matrix and in unmelted TiC (Fig.4).



*Figure 4 – SEM images of the microstructure of titanium matrix composite TiC/Ti-6Al-4V, after tensile testing*

In [32], studies of the formation of the microstructure and mechanical properties of the TiC/Ti-6Al-4V composite obtained by the LMD method were performed. In paper used 4 compositions depending on the size of TiC: 1). < 10µm; 2). 10-45 µm; 3). 45-75 µm; 4). 75-100 µm. Metallographic analysis showed that in TiC/Ti-6Al-4V reinforcing composites made with fine powders (TiC: <10 microns), only granular and chain eutectic TiC phases are distinguished in the structure, since the fine TiC particles were completely melted and dissolved in a matrix made of Ti-6Al-4V titanium alloy (Fig.5, a-b). The number of eutectic TiC phases in composites made with fine powders was the largest in this study, and the eutectic TiC phases are evenly distributed in the titanium matrix, in turn, the titanium matrix consists of plates of a widmanstett structure. When the size of the hardening particles increases (25-100 µm), grains with a widmanstett structure with eutectic TiC phases in the form of chains and granules are formed. In addition to granular and chain eutectic TiC phases, composites made from TiC powders (25-100 µm) emit unalloyed TiC particles due to partial melt of TiC particles.

Eutectic TiC phases and unmelted TiC particles are separated both inside and along the grain boundaries (Fig. 5, c-h).

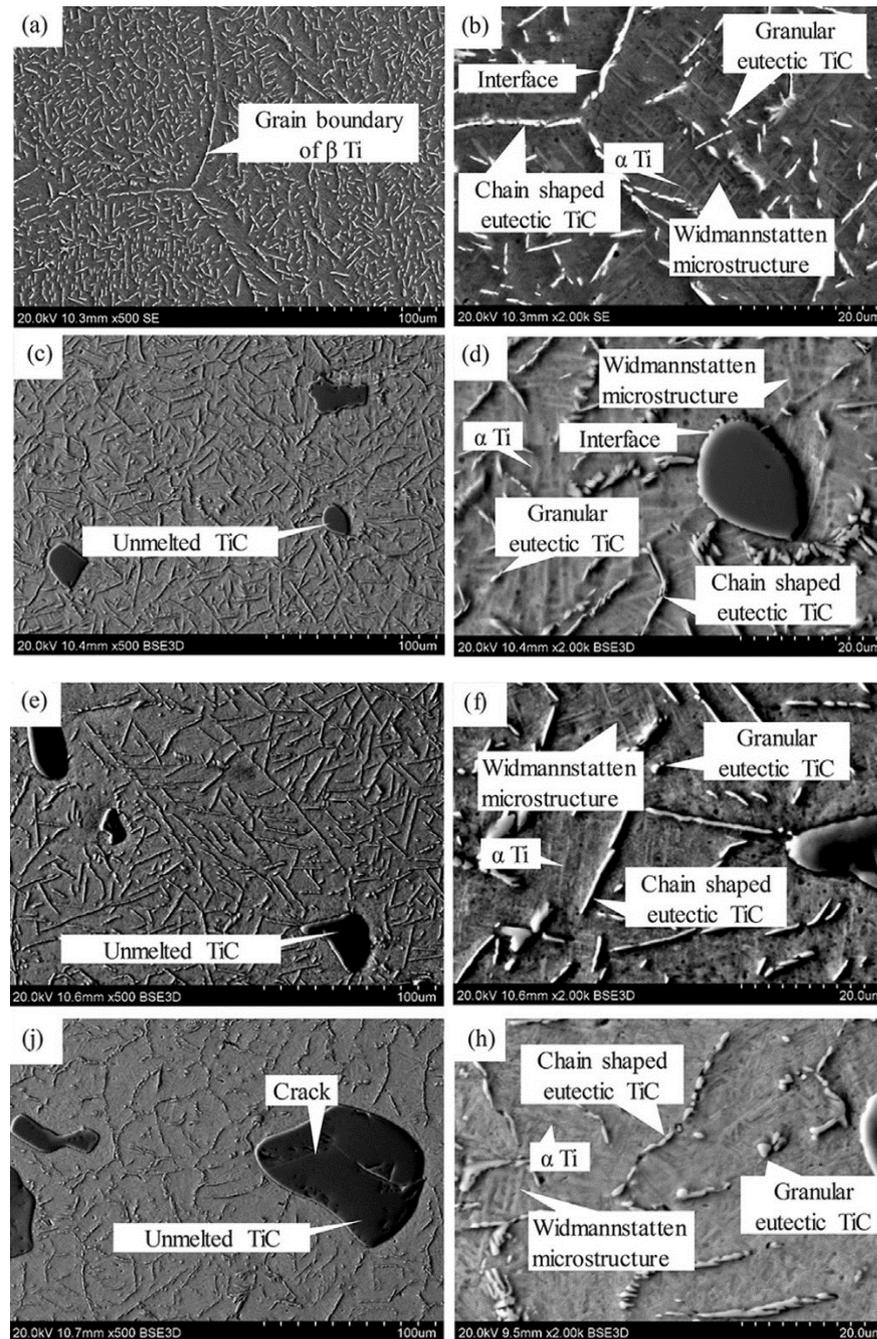


Figure 5 – SEM images of the microstructure of a titanium matrix composite TiC/Ti-6Al-4V, with different TiC sizes: (a-b) ultrafine powders  $< 10\mu\text{m}$ ; (c-d) small-size powders  $10\text{-}45\mu\text{m}$ ; (e-f) middle-size powders  $45\text{-}75\mu\text{m}$ ; (j-h) large-size powders  $75\text{-}100\mu\text{m}$

The strength value of samples obtained by laser melting of Ti-6Al-4V titanium alloy powder was 1000 MPa [32]. For composites obtained with fine particles, the value of tensile strength (1230 MPa) and elongation (2,12%) were the

highest in this study. A more uniform distribution of TiC eutectic phases and strong coupling of TiC eutectic phases with TMC results in improved strength properties of composites made with fine powders. The mechanism of destruction of these composites was dominated by cracking of eutectic phases followed by plastic destruction of the titanium matrix. Both the tensile strength (1170 MPa) and the elongation (0,59%) reached a minimum value when using large TiC powders (75-100  $\mu\text{m}$ ) for the manufacture of TiC/Ti-6Al-4V composites. Premature cracking of large unalloyed TiC particles at the initial stage of plastic deformation and decohesion of the interface between large TiC particles and the titanium matrix reduced the properties under uniaxial tension. The mechanism of destruction of composites made from TiC powders with dimensions (25-100  $\mu\text{m}$ ) was dominated by cracking of unflavored TiC particles followed by cracking of eutectic TiC phases and then plastic destruction of the titanium matrix.

*Table 3 – Mechanical properties of TiC/Ti-6Al-4V composites with different TiC sizes*

Samples	Tensile strength, MPa	Elongation, %
Ti-6Al-4V	1091	5,52
TiC/Ti-6Al-4V (< 10 $\mu\text{m}$ )	1231	2,12
TiC/Ti-6Al-4V (10-45 $\mu\text{m}$ )	1222	1,52
TiC/Ti-6Al-4V (45-75 $\mu\text{m}$ )	1225	1,31
TiC/Ti-6Al-4V (75-100 $\mu\text{m}$ )	1177	0,59

Unlike laser fusion of powdered raw materials called the feedstock, the number of papers devoted to the study of 3D-printed products by laser melting of wire material with the addition of reinforcing carbide particles is much smaller. Nevertheless, existing works [33] described the fundamental possibility of creating a dense, uniform TiC/Ti-6Al-4V composite by laser fusion of Ti-6Al-4V titanium wire and TiC powder. The optimal laser melting conditions are described and the

volume fraction of TiC powder, which can be used to obtain a well-bonded composite with high strength characteristics.

Electron beam additive technologies are the most often used for printing products from pure metal powders and powder mixtures containing metal and reinforcing particles. At present, the technology for the production of wear-resistant metal matrix composites (WC/NiBSi, B<sub>4</sub>C/Ti, TiC/Ti, etc.) [36-38] has been developed. Moreover, information on the preparation of TiC/Ti-6Al-4V composites by electron beam sintering EBM and EBF<sup>3</sup> is not available in the reference literature.