

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

Школа Инженерная школа новых производственных технологий
 Направление подготовки Материаловедение и технологии материалов
 Отделение школы (НОЦ) Отделение материаловедения

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Тема работы
Исследование микроструктуры и механических свойств металлокерамических композитов на основе сплава Ti-6Al-4V, созданных с применением аддитивных технологий

УДК 666.798:669.295.5

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4Б81	Сапогова Мария Михайловна		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Панина А.А.	к.ф-м.н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

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

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Черемискина М.С.	-		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
22.03.01 Материаловедение и технологии материалов	Ваулина О.Ю.	к.т.н.		

Томск – 2022 г.

Планируемые результаты обучения ООП

Код компетенции	Наименование компетенции
Универсальные компетенции	
УК(У)-1	Способен осуществлять поиск, критический анализ и синтез информации, применять системный подход для решения поставленных задач
УК(У)-2	Способен определять круг задач в рамках поставленной цели и выбирать оптимальные способы их решения, исходя из действующих правовых норм, имеющихся ресурсов и ограничений
УК(У)-3	Способен осуществлять социальное взаимодействие и реализовывать свою роль в команде
УК(У)-4	Способен осуществлять деловую коммуникацию в устной и письменной формах на государственном и иностранном (-ых) языке (-ах)
УК(У)-5	Способен воспринимать межкультурное разнообразие общества в социально-историческом, этическом и философском контекстах
УК(У)-6	Способен управлять своим временем, выстраивать и реализовывать траекторию саморазвития на основе принципов образования в течение всей жизни
УК(У)-7	Способен поддерживать должный уровень физической подготовленности для обеспечения полноценной социальной и профессиональной деятельности
УК(У)-8	Способен создавать и поддерживать безопасные условия жизнедеятельности, в том числе при возникновении чрезвычайных ситуаций
УК(У)-9	Способен проявлять предприимчивость в профессиональной деятельности, в т.ч. в рамках разработки коммерчески перспективного продукта на основе научно-технической идеи
Общепрофессиональные компетенции	
ОПК(У)-1	Способен решать стандартные задачи профессиональной деятельности на основе информационной и библиографической культуры с применением информационно-коммуникационных технологий и с учетом основных требований информационной безопасности
ОПК(У)-2	Способен использовать в профессиональной деятельности знания о подходах и методах получения результатов в теоретических и экспериментальных исследованиях
ОПК(У)-3	Готов применять фундаментальные математические, естественнонаучные и общеинженерные знания в профессиональной деятельности
ОПК(У)-4	Способен сочетать теорию и практику для решения инженерных задач

ОПК(У)-5	Способен применять в практической деятельности принципы рационального использования природных ресурсов и защиты окружающей среды
Профессиональные компетенции	
ПК(У)-1	Способен использовать современные информационно-коммуникационные технологии, глобальные информационные ресурсы в научно-исследовательской и расчетно-аналитической деятельности в области материаловедения и технологии материалов
ПК(У)-2	Способен осуществлять сбор данных, изучать, анализировать и обобщать научно-техническую информацию по тематике исследования, разработке и использованию технической документации, основным нормативным документам по вопросам интеллектуальной собственности, подготовке документов к патентованию, оформлению ноу-хау
ПК(У)-3	Готов использовать методы моделирования при прогнозировании и оптимизации технологических процессов и свойств материалов, стандартизации и сертификации материалов и процессов
ПК(У)-4	Способен использовать в исследованиях и расчетах знания о методах исследования, анализа, диагностики и моделирования свойств веществ (материалов), физических и химических процессах, протекающих в материалах при их получении, обработке и модификации
ПК(У)-5	Готов выполнять комплексные исследования и испытания при изучении материалов и изделий, включая стандартные и сертификационные, процессов их производства, обработки и модификации
ПК(У)-6	Способен использовать на практике современные представления о влиянии микро - и нано- структуры на свойства материалов, их взаимодействии с окружающей средой, полями, частицами и излучениями
ПК(У)-7	Способен выбирать и применять соответствующие методы моделирования физических, химических и технологических процессов
ПК(У)-8	Готов исполнять основные требования делопроизводства применительно к записям и протоколам; оформлять проектную и рабочую техническую документацию в соответствии с нормативными документами
ПК(У)-9	Готов участвовать в разработке технологических процессов производства и обработки покрытий, материалов и изделий из них, систем управления технологическими процессами
ДПК(У)-1	Способен применять знания об основных типах современных неорганических и органических материалов, принципах выбора материалов для заданных условий эксплуатации с учетом требований технологичности, экономичности, надежности и долговечности, экологических последствий их применения при проектировании высокотехнологичных процессов

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

Школа Инженерная школа новых производственных технологий
 Направление подготовки (специальность) Материаловедение и технологии материалов
 Отделение школы (НОЦ) Отделение материаловедения

УТВЕРЖДАЮ:
 Руководитель ООП
 _____ О.Ю.Ваулина

(Подпись) (Дата)

ЗАДАНИЕ

на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Бакалаврской работы

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

Студенту:

Группа	ФИО
4Б81	Сапогова Мария Михайловна

Тема работы:

Исследование микроструктуры и механических свойств металлокерамических композитов на основе сплава Ti-6Al-4V, созданных с применением аддитивных технологий

Утверждена приказом директора ИШНПТ

Приказ № 33-31/с от 02.02.2022

Срок сдачи студентом выполненной работы:	
--	--

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе

(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.).

Объектом исследования являются металлокерамические образцы на основе сплава Ti-6Al-4V, полученные методом электронно-лучевого плавления проволоки.

<p>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</p> <p><i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> – Обзор литературных источников; – Исследование микроструктуры и механических свойств металлокерамических композитов на основе сплава Ti-6Al-4V, полученных методом электронно-лучевого плавления проволоки; – Анализ полученных результатов; – Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение; – Социальная ответственность; – Заключение и выводы
<p>Перечень графического материала <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i></p>	<p>Презентация ВКР в Power Point</p>

Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы
(с указанием разделов)

Раздел	Консультант
1. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Кашук Ирина Вадимовна, доцент ШБИП и отделения социально-гуманитарных наук
2. Социальная ответственность	Черемискина Марина Сергеевна, старший преподаватель ШБИП и отделения общетехнических дисциплин
3. Литературный обзор; 4. Материалы и методы 5. Экспериментальная часть	Панин Алексей Викторович, профессор, д.ф.-м.н., заведующий лабораторией поверхностных явлений (ИФПМ СО РАН)

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

нет

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

Задание выдал руководитель / консультант (при наличии):

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Панина А.А.	к.ф.-м.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4Б81	Сапогова Мария Михайловна		

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

Студенту:

Группа	ФИО
4Б81	Сапогова Мария Михайловна

Школа	Инженерная школа новых производственных технологий	Отделение школы (НОЦ)	Материаловедения
Уровень образования	Бакалавриат	Направление/специальность	22.03.01 Материаловедение и технологии материалов

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

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

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. <i>Анализ конкурентных технических решений (НИ)</i>	Расчет конкурентоспособности SWOT-анализ
2. <i>Формирование плана и графика разработки и внедрения (НИ)</i>	Структура работ. Определение трудоемкости. Разработка графика проведения исследования
3. <i>Составление бюджета инженерного проекта (НИ)</i>	Расчет бюджетной стоимости НИ
4. <i>Оценка ресурсной, финансовой, бюджетной эффективности (ИР)</i>	Интегральный финансовый показатель. Интегральный показатель ресурсоэффективности. Интегральный показатель эффективности

Перечень графического материала

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

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

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН ШБИП	Кашук Ирина Вадимовна	к.т.н., доцент		28.02.2022

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4Б81	Сапогова Мария Михайловна		28.02.2022

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»**

Студенту:

Группа 4Б81		ФИО Сапогова Мария Михайловна	
Школа	Инженерная школа новых производственных технологий	Отделение (НОЦ)	Материаловедение в машиностроении
Уровень образования	Бакалавриат	Направление/специальность	22.03.01 Материаловедение и технологии материалов

Тема ВКР:

Исследование микроструктуры и механических свойств металлокерамических композитов на основе сплава Ti-6Al-4V, созданных с применением аддитивных технологий

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

Введение

- Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика) и области его применения.
- Описание рабочей зоны (рабочего места) при разработке проектного решения

Объект исследования: металлокерамические композиты на основе сплава Ti-6Al-4V, полученные методом электронно-лучевого плавления проволоки.
Область применения: аэрокосмический комплекс
Рабочая зона: лаборатория
Размеры помещения: 40 м²
Количество и наименование оборудования рабочей зоны: оптический микроскоп Carl Zeiss Axiovert 40 MAT (1шт.), микротвердомера «ПМТ-3М» (1шт.), компьютер (1шт)
Рабочие процессы, связанные с объектом исследования, осуществляющиеся в рабочей зоне: шлифование образцов, травление образцов, измерение микротвердости, съёмка в оптическую аппаратуру

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности при разработке проектного решения:

- специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства;
- организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.

- Трудовой кодекс Российской Федерации от 30 декабря 2001 г. N 197-ФЗ.
- ГОСТ 12.2.032-78. ССБТ. Рабочее место сидя и стоя. Общие эргономические требования.
- ГОСТ 12.1.005-88. Общие гигиенические требования к воздуху в рабочей зоне.
- ГОСТ 22614-77. Система "человек- машина". Включение и выключение клавиш и кнопок. Общие эргономические требования.
- 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.

2. Производственная безопасность при разработке проектного решения:

- Анализ выявленных вредных и опасных производственных факторов

Вредные производственные факторы:
1. Превышение уровня шума.
2. Отклонение показателей микроклимата.
3. Недостаточная освещенность рабочей зоны.
4. Чрезмерное загрязнение воздушной среды в зоне дыхания

	<p>Опасные производственные факторы:</p> <p>1. Повышенное значение напряжения в электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело человека.</p> <p>Требуемые средства коллективной и индивидуальной защиты от выявленных факторов:</p> <p>1. Использование средств защиты дыхательных путей, респираторы по классификации не ниже FFP2</p> <p>2. Контроль микроклимата помещения</p> <p>3. Использование дополнительного источника освещения</p> <p>4. Использование диэлектрических перчаток, специальных изолированных подставок и резиновых ковриков при работе с электрооборудованием</p>
3. Экологическая безопасность при разработке проектного решения:	<p>Воздействие на литосферу: загрязнение почвы отходами исследования (металлическая стружка, пластиковые емкости, испорченные металлические образцы)</p> <p>Воздействие на гидросферу: загрязнение сточных вод отходами исследования (металлическая стружка, детергенты, пластик и полимеры)</p> <p>Воздействие на атмосферу: выбросы газа и металлической пыли</p> <p>Воздействие на селитебную зону: нет</p>
4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях при разработке проектного решения:	<p>Возможные ЧС: пожар в здании, сильные ветры и ураганы, а так же другие ЧС природного характера.</p> <p>Наиболее типичная ЧС: пожар на территории лаборатории</p>
Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Черемискина Марина Сергеевна	-		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4Б81	Сапогова Мария Михайловна		

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

Школа Инженерная школа новых производственных технологий
 Направление подготовки Материаловедение и технологии материалов
 Уровень образования Бакалавриат
 Отделение школы (НОЦ) Отделение материаловедения
 Период выполнения (осенний / весенний семестр 2021 /2022 учебного года)

Форма представления работы:

Бакалаврская работа

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

КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН выполнения выпускной квалификационной работы

Срок сдачи студентом выполненной работы: _____

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
20.01.2022	Аналитический обзор литературы	15
25.04.2022	Исследования микроструктуры металлокерамических композитов на основе сплава Ti-6Al-4V, полученных методом электронно-лучевого плавления проволоки	15
29.04.2022	Исследования механических свойств металлокерамических композитов на основе сплава Ti-6Al-4V, полученных методом электронно-лучевого плавления проволоки	15
04.05.2022	Анализ результатов	15
20.05.2022	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	15
20.05.2022	Социальная ответственность	15
25.05.2022	Заключение	10

СОСТАВИЛ:

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Панина А.А.	к.ф.-м.н.		

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель ООП

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Ваулина О.Ю.	к.т.н.		

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 102 с., 59 рисунков, 26 таблиц, 58 источников, 0 приложений.

Ключевые слова: аддитивный технологии, электронно-лучевое плавление, титановый сплав, механические свойства, микроструктура.

Объектом исследования являются металлокерамические композиты, созданные на основе титанового сплава Ti-6Al-4V (5,95 Al, 4,37 V, 0,02 Si, 89,66 вес. % Ti), полученные в результате электронно-лучевого плавления проволоки в процессе 3D-печати.

Целью настоящей работы является исследование микроструктуры, фазового состава и механических свойств металлокерамических композитов, полученных путем электронно-лучевого плавления проволоки из титанового сплава Ti-6Al-4V, подверженной предварительному электроискровому легированию карбидом и диборидом титана.

В процессе исследования проводились: анализ микроструктуры металлокерамических образцов из титанового сплава Ti-6Al-4V, полученных в результате электронно-лучевого плавления проволоки, оценка их фазового состава и механических характеристик.

В данной работе описано влияние введения карбидов и диборидов титана электроискровым способом на каждый из созданных образцов. Наибольшее положительное влияние оказано на образцы Ti-6Al-4V/TiC и Ti-6Al-4V/TiC₍₇₅₎+TiB₂₍₂₅₎ имеющие достаточно измельченное зерно в сравнении с исходным сплавом Ti-6Al-4V и одновременно высокую микротвердость.

Степень внедрения: в настоящее время ведется подготовка к получению патента РФ.

Область применения: аэрокосмическая – изготовление элементов летательных аппаратов, газовых турбин и двигателей; медицинская отрасль – изготовление имплантов и протезов.

Экономическая эффективность/значимость работы: сокращение времени производства и себестоимости изготовления деталей из металлокерамических композитов на основе титанового сплава Ti-6Al-4V.

В будущем планируются исследование возможности получения изделий сложной геометрической формы путем электронно-лучевого плавления проволоочного материала, подвергнутого предварительному электроискровому легированию.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	14
Глава 1 Литературный обзор.....	16
1.1 Классификация аддитивных технологий.....	16
1.1.1 Селективное лазерное спекание	17
1.1.2 Селективная лазерная плавка	18
1.1.3 Электронно-лучевая плавка	18
1.1.4 Произвольная электронно-лучевая плавка.....	19
1.2 Получение образцов из сплава Ti-6Al-4V и металлокерамических композиатов на его основе методами аддитивных технологий.....	20
1.2.1 Получение образцов из сплава Ti-6Al-4V методом селективного лазерного плавления	21
1.2.2 Получение образцов из сплава Ti-6Al-4V методом электронно-лучевой плавки.....	23
1.2.3 Получение образцов из сплава Ti-6Al-4V методом произвольной электронно-лучевой плавки	25
1.2.4 Создание металлокерамических композиатов на основе диборида титана и сплава Ti-6Al-4V методом селективного лазерного спекания	29
1.2.5 Создание металлокерамических композиатов на основе диборида титана и сплава Ti-6Al-4V методом лазерной наплавки	32
1.2.6 Создание металлокерамических композиатов на основе карбида титана и сплава Ti-6Al-4V методом EBF ³	33
1.2.7 Создание металлокерамических композиатов на основе карбида титана и сплава Ti-6Al-4V методом лазерной наплавки.....	35
1.3 Электроискровое легирование.....	36
Глава 2 Материалы и методика эксперимента.....	39
Глава 3 Результаты эксперимента и их обсуждение	41
3.1 Микроструктура и фазовый состав 3D-напечатанного образца титанового сплава Ti-6Al-4V	41
3.2 Микроструктура и фазовый состав 3D-напечатанного образца титанового сплава Ti-6Al-4V/C, легированного электроискровым способом в воздушной среде.....	43

3.3 Микроструктура и фазовый состав 3D-напечатанного образца титанового сплава Ti-6Al-4V/C, легированного электроискровым способом в среде аргона.....	45
3.4 Микроструктура и фазовый состав 3D-напечатанного образца титанового сплава Ti-6Al-4V/TiC	48
3.5 Микроструктура и фазовый состав 3D-напечатанного образца титанового сплава Ti-6Al-4V/TiB ₂	51
3.6 Микроструктура и фазовый состав 3D-напечатанного металлокерамического композита Ti-6Al-4V/TiC ₍₅₀₎ +TiB ₂₍₅₀₎	54
3.7 Микроструктура и фазовый состав 3D-напечатанного металлокерамического композита Ti-6Al-4V/TiC ₍₇₅₎ +TiB ₂₍₂₅₎	57
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	62
Глава 4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	64
Введение.....	64
4.1 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения.....	64
4.1.1 Анализ конкурентных технических решений.....	64
4.1.2 SWOT-анализ	66
4.2 Планирование научно-исследовательских работ.....	69
4.2.1 Структура работ в рамках научного исследования	69
4.2.2 Определение трудоемкости выполнения работ и разработка графика проведения	70
4.3 Бюджет научно-технического исследования	72
4.3.1 Расчет материальных затрат научно-технического исследования	73
4.3.2 Расчет амортизации специального оборудования.....	73
4.3.3 Основная заработная плата исполнителей темы	74
4.3.4 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления).....	76
4.3.5 Накладные расходы	76
4.4 Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования	78
Выводы по разделу.....	81
Глава 5 Социальная ответственность.....	82
5.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	82

5.1.1 Специальные правовые нормы трудового законодательства для рабочей зоны исследователя	82
5.1.2 Эргономические требования к правильному расположению и компоновке рабочей зоны исследователя	83
5.2 Производственная безопасность.....	85
5.2.1 Анализ опасных и вредных производственных факторов	86
5.2.1.1 Превышение уровня шума	86
5.2.1.2 Отклонение показателей микроклимата	87
5.2.1.3 Недостаточная освещенность рабочей зоны	87
5.2.1.4 Чрезмерное загрязнение воздушной среды в зоне дыхания	87
5.2.1.5 Повышенное значение напряжения в электрической цепи	88
5.2.2 Обоснование мероприятий по снижению уровней воздействия опасных и вредных факторов на исследователя	88
5.2.2.1 Превышение уровня шума	88
5.2.2.2 Отклонение показателей микроклимата.....	88
5.2.2.4 Мероприятия по снижению уровня загрязнения воздушной среды в зоне дыхания.....	90
5.2.2.5 Повышенное значение напряжения в электрической цепи	90
5.3 Экологическая безопасность.....	91
5.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях.....	92
5.4.1 Анализ вероятных ЧС, которые могут возникнуть в лаборатории при проведении исследований	92
Выводы по разделу.....	94
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	96

ВВЕДЕНИЕ

Расширение области применения композиционных материалов на основе титана характеризуется тенденцией к повышению их твердости, прочности и жаростойкости. Для чего в последние годы разрабатывают металлокерамические композиты на базе титановых сплавов. Одним из наиболее перспективных вариантов упрочнения титановых сплавов является диборид титана, так как характеризуется высокой твердостью, износостойкостью, жаростойкостью и жаропрочностью. К таким же перспективным упрочняющим материалам относится и карбид титана, характеризующийся исключительно высокой твердостью, высокой стабильностью к агрессивным средам и абразивному воздействию.

Металлокерамические композиты, состоящие из металлической матрицы и частиц диборида или карбида титана, широко используются в различных отраслях промышленности, таких как ракетостроение, авиационное строение, аэрокосмический комплекс. Разработка композиционных материалов, где в качестве металлической матрицы используется сплав Ti-6Al-4V, представляет громадный интерес для данных отраслей промышленности не только с целью повышения прочностных свойств, но и с целью облегчения веса конструкции.

К традиционным методам производства металлокерамических композитов относится литье и порошковая металлургия. В настоящее время наблюдается большой интерес к изготовлению металлокерамических композитов методами аддитивных технологий. Особое внимание в данной работе уделено аддитивной технологии, основанной на электронно-лучевом плавлении проволочного материала (EBF³). Основным достоинством данной технологии является высокая скорость выращивания детали, а также практически безотходное производство. Основным недостатком метода EBF³ является невысокая прочность изделий из титанового сплава Ti-6Al-4V вследствие большого размера первичных β-зерен. Введение высокопрочных керамических частиц успешно устраняет данный недостаток. Целью настоящей работы является исследование микроструктуры,

фазового состава и механических свойств металлокерамических композитов, полученных путем электронно-лучевого плавления проволоки из титанового сплава Ti-6Al-4V, подверженной предварительному электроискровому легированию карбидом и диборидом титана.

Глава 1 Литературный обзор

1.1 Классификация аддитивных технологий

Аддитивное производство (от англ. Additive manufacturing) представляет собой класс перспективных технологий производства деталей сложной формы по трехмерной компьютерной модели путем последовательного нанесения материала (как правило, послойного) – в противоположность так называемому вычитающему производству.

В современном мире на производствах используются разные виды аддитивных технологий (таблица 1) [1]. В целом их можно разделить на два основных класса в зависимости от того, в каком виде находился исходный материал, в виде порошка или проволоки (листов).

Таблица 1 – Классификация процессов аддитивного производства по состоянию используемого материала

Состояние материала	Процесс	Материалы
Порошкообразное	Селективное лазерное спекание	Полимеры, металлы, керамика
	Прямое лазерное спекание металлов	
	Селективная лазерная плавка	
	Электронно-лучевая плавка	
Твердое	Послойное изготовление объектов из листового материала	Полимеры, металлы, керамика и композиционные материалы
	Произвольная электронно-лучевая плавка	

1.1.1 Селективное лазерное спекание

Процесс селективного лазерного спекания основан на лазерных излучениях высокой мощности. При помощи специального ролика тонкий слой материала переносится из камеры на рабочую поверхность тонким слоем (рисунок 1). Далее при помощи лазерного луча и подвижного зеркала происходит процесс разметки сечения будущей детали. Затем происходит спекание гранул порошка между собой под воздействием лазерного луча. В месте спекания образуется твердый слой материала, являющийся первым слоем выращиваемой детали. Следующий слой материала наносится с помощью подвижной платформы рабочей камеры: она опускается вниз и вместе с ней поднимается вверх подвижное дно камеры для подачи порошка. Последнее действие повторяется до тех пор, пока деталь полностью не будет выращена [2].

Порошок затвердевает по контуру модели, соответственно, поддерживающие материалы не требуются.

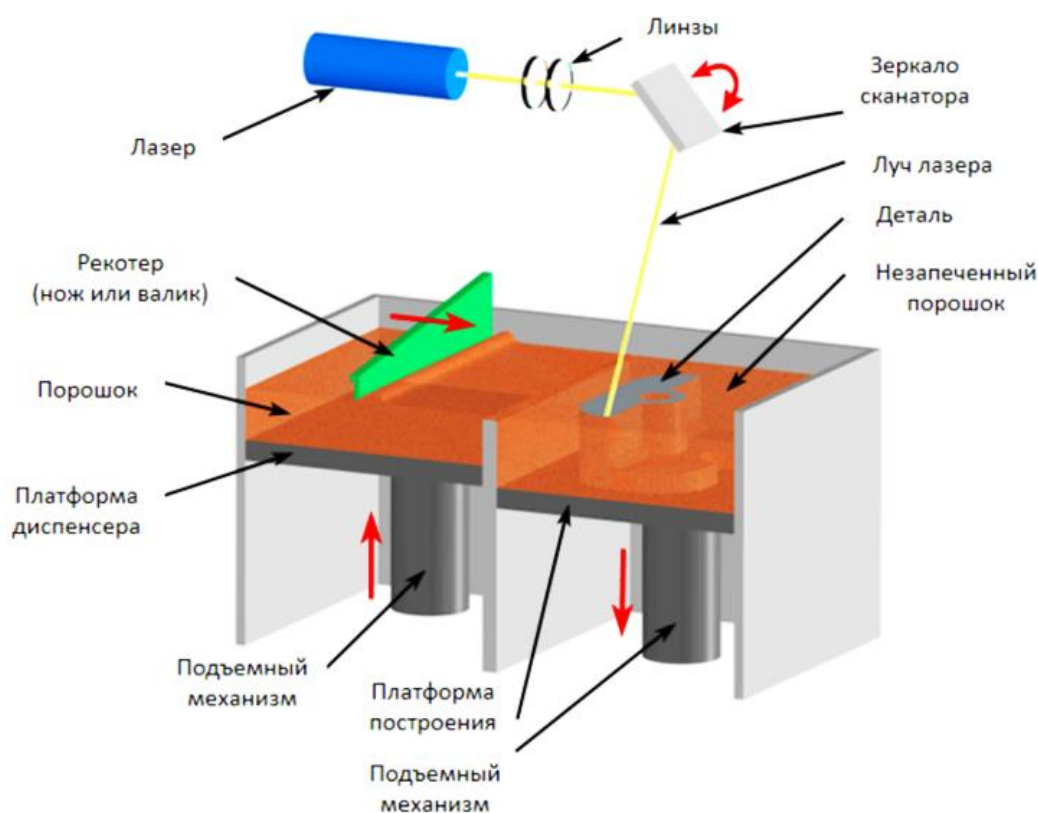


Рисунок 1 – Схема работы 3D-принтера по технологии селективного лазерного спекания

1.1.2 Селективная лазерная плавка

Процесс селективной лазерной плавки заключается в том, что происходит послойное селективное сканирование поверхности платформы лазерным лучом, которая засыпана слоем порошка. Вследствие этого частицы сплавляются с материалом, который располагается внизу и между собой.

Отличие от метода селективного лазерного спекания заключается в том, что создается однородное вещество в результате не просто спекания, а расплавления в местах соприкосновения гранул [3].

У процесса очень строгие требования к техническому процессу, обусловленные размером частиц и химическим составом порошков, поэтому требуется контроль используемых порошков [4].

1.1.3 Электронно-лучевая плавка

На данный момент одним из самых современных методов является метод электронно-лучевой плавки. Данный метод появился в аэрокосмической отрасли, но затем был внедрен в гражданскую сферу.

Процесс электронно-лучевой плавки протекает путем загрузки нужного количества порошка в вакуумную камеру, затем поток электронов слой за слоем обходит контуры детали, расплавляя порошок, тем самым образуя твердую структуру. Разгрузка внутреннего напряжения проводится путем слияния высокой температуры и вакуума [5].

В данном методе используются электронные излучатели. Электрическая насыщенность электролучевых 3D-принтеров во много раз превосходит энергетику лазерных принтеров, работающих по технологии селективной лазерной плавки. Но также при использовании электронного излучения, размер пятна электрического пучка в зоне расплава больше, чем при использовании лазера. Исходя из этого, технология электронно-лучевой плавки уступает технологии селективной лазерной плавки в точности аддитивного построения изделия [6].

1.1.4 Произвольная электронно-лучевая плавка

Электронно-лучевая плавка осуществляется с применением практически любых металлических сплавов. Для плавки материала в технологии EBF³ используются высокоомощные электронные излучатели в вакуумной камере. Проволока постепенно подается в точку фокусировки электронного пучка, пока электронный пучок совершает передвижение по рабочей поверхности (рисунок 2). Материал застывает, сформировав прочные слои заданного изделия. Процесс повторяется, пока изделие не приобретет конечный вид [7].

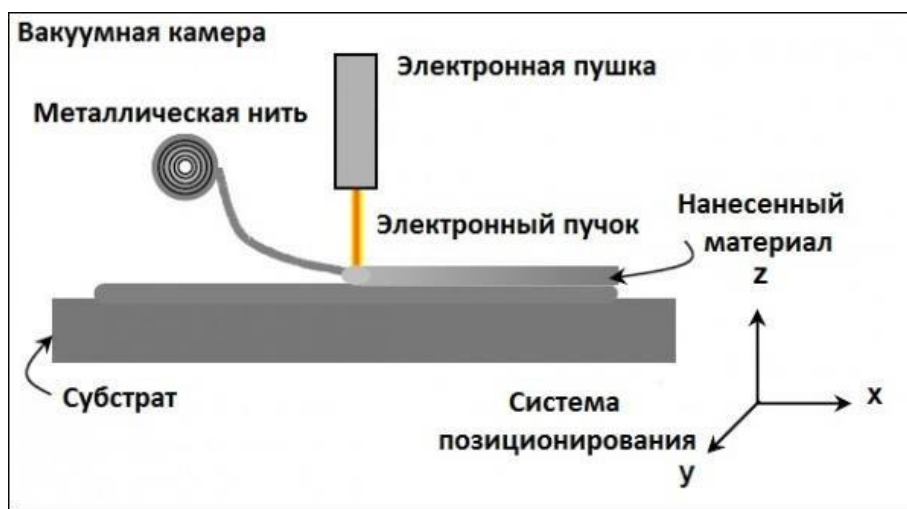


Рисунок 2 - Схема работы EBF³ – принтера

Главное достоинство EBF³ – в возможности создания самых разных по размерам деталей – от нескольких миллиметров до нескольких метров. Единственное ограничение связано с физическими размерами рабочей камеры-вакуума, а также объемом доступного материала.

Сравнительная характеристика аддитивных технологий, рассмотренных выше, наглядно продемонстрирована в таблице 2. Технология произвольной электронно-лучевой плавки является самой точной, самой быстрой в печати аддитивной технологией, изделия получаются прочными и плотными, так же именно эта технология представляет большой интерес, так как детали, созданные ей, могут использоваться в аэрокосмическом комплексе. Благодаря легкому весу расходного материала детали могут создаваться прямо на борту космической установки.

Таблица 2 – Сравнение свойств образцов из титанового сплава Ti-6Al-4V, полученных разными методами аддитивного производства

Методы	Точность	Плотность	Прочность	Пластичность	Скорость печати
Селективное лазерное спекание	Шероховатая поверхность \pm 300 мкм	Маленькая	Не высокая	Очень маленькая	Не быстрая
Селективное лазерное плавление	20-100 мкм Высокая точность изделий	Большая	Не высокая	Маленькая	Не быстрая
Электронно-лучевая плавка	Точность построения модели \pm 200 мкм	Относительно большая	Относительно высокая	Относительно большая	Относительно быстрая
Произвольная электронно-лучевая плавка	\pm 50 мкм	Большая	Относительно высокая	Относительно большая	Быстрая

1.2 Получение образцов из сплава Ti-6Al-4V и металлокерамических композитов на его основе методами аддитивных технологий

В связи с возросшей популярностью аддитивных технологий имеется большое количества научных работ, посвященных созданию образцов из титанового сплава Ti-6Al-4V и металлокерамических композитов на его основе разными методами [8-44].

Рассмотрим, какие изменения происходят в образце титанового сплава Ti-6Al-4V, а также в образцах металлокерамических композитов на его основе, при получении его разными аддитивными технологиями.

1.2.1 Получение образцов из сплава Ti-6Al-4V методом селективного лазерного плавления

В работах [8,9] было доказано, что пористые имплантаты сплава Ti-6Al-4V, полученного методом селективного лазерного плавления, пригодны для применения в клетках *in vitro*. В настоящее время существует несколько отработанных методик получения титановых имплантатов при помощи данной технологии с контролируемой пористостью. Исследовались различные формы структур: сетчатые скаффолды (клеточные матрицы), пористые модели костей и др., подробный обзор приведен в статьях [10-14]. Некоторые ученые добавляли специальные агенты в исходный металлический порошок с целью получения сотоподобных пор, имеющих определенную последовательность [15]. Изготовление металлических имплантатов является непростой задачей, поскольку разработка структур со сложной морфологией поверхности представляет собой более высокий уровень сложности [16]. Однако, контролируя параметры процесса с большой точностью, можно достаточно легко получить пористые структуры с помощью технологии селективного лазерного плавления [17,18]. Помимо экономической эффективности, данный метод позволяет также сэкономить значительное количество времени на производство, а также создает возможность создания конфигураций различной сложности [19-21].

Авторы статьи [22] исследовали влияние регулировки межстрочного интервала развертки (расстояние между слоями, с которыми взаимодействуют излучение лазера на пористость сплава Ti-6Al-4V. Фотография образцов, полученных данным методом, представлена на рисунке 3.

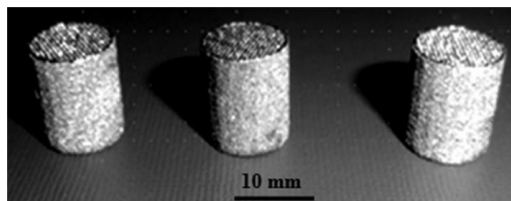


Рисунок 3 – Пористые образцы Ti-6Al-4V, полученные методом селективного лазерного плавления

На рисунке 4 показано нормальное и прямоугольное распределение пор с различной толщиной стенок пор, приблизительно равной 200, 300, 400, 500, 600 и 700 мкм для каждого образца, соответственно.

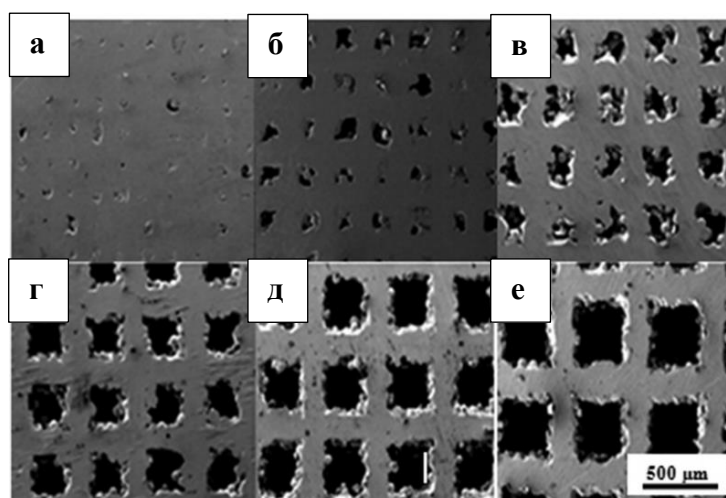


Рисунок 4 – СЭМ изображения пористых структур Ti-6Al-4V, изготовленных методом SLM, с разными расстояниями между слоями: (а) 200, (б) 300, (в) 400, (г) 500, (д) 600 и (е) 700 мкм

Было доказано, что пористость материалов можно варьировать путем изменения толщины стенок пор. Типичная микроструктура сплава Ti-6Al-4V, изготовленного методом SLM, и исходного порошка Ti-6Al-4V представлена на рисунке 5, соответственно. Оба образца содержат смесь α - и β -фаз, но сплав, полученный по технологии SLM, содержит включения более выраженной игольчатой β -фазы, что подтверждается рентгенофазовым анализом (рисунок 6).

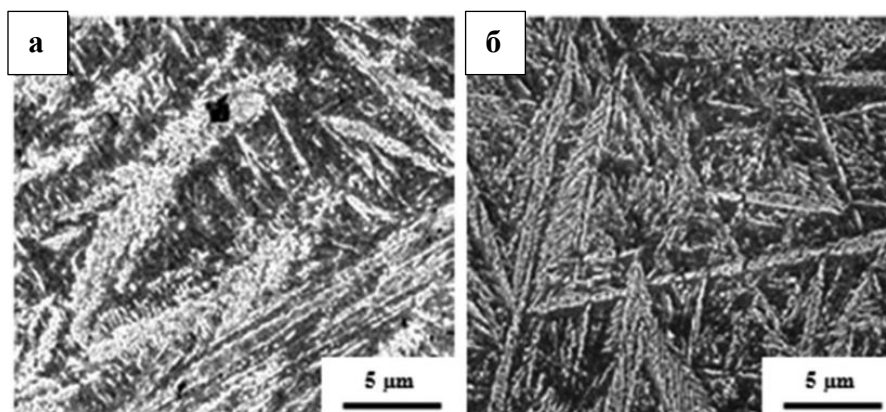


Рисунок 5 – Изображение микроструктуры образца (а) полученного SLM способом, (б) исходного порошка

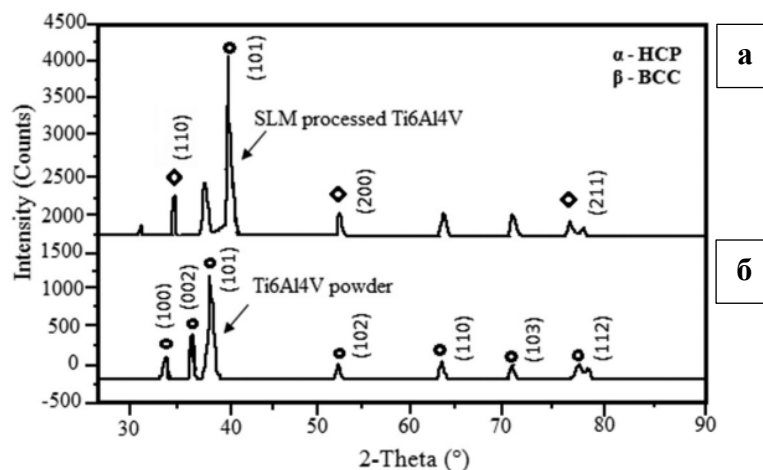


Рисунок 6 – Результаты РФА: (а) – образец SLM, (б) – исходный порошок Ti-6Al-4V

1.2.2 Получение образцов из сплава Ti-6Al-4V методом электронно-лучевой плавки

На сегодняшний день проведено множество исследований по изучению свойств деталей из Ti-6Al-4V, изготовленных методом EBM [2-28]. Авторы статей [29,30] провели полное исследование микроструктуры и механических свойств образцов Ti-6Al-4V. Было установлено, что механические свойства при растяжении материалов, полученных способом EBM, превосходят свойства образцов, изготовленных традиционным способом [31]. Микроструктура образцов, полученных с помощью технологии EBM, показаны на рисунке 7.

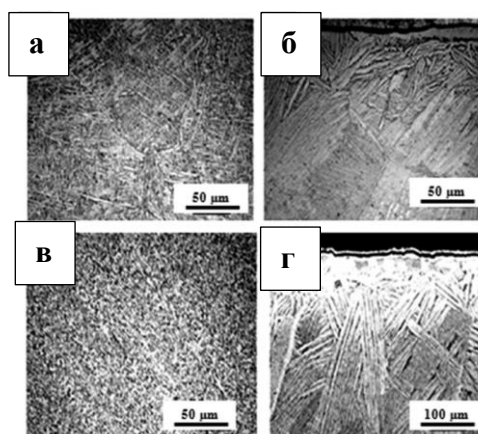


Рисунок 7 – Оптическое изображение микроструктуры: (а) EBM Ti-6Al-4V, (б) литого Ti-6Al-4V, (в) кованного Ti-6Al-4V, (г) коммерческий литой Ti-6Al-4V

Способность создавать превосходную морфологию поверхности материала для биомедицинского применения по сравнению с традиционным методом - одна из уникальных характеристик EBM. На рисунке 8 представлено изображение поверхности образца Ti-6Al-4V, полученного методом EBM. Благодаря волнообразной поверхности такие материалы предпочтительнее использовать в стоматологии (рисунок 9).

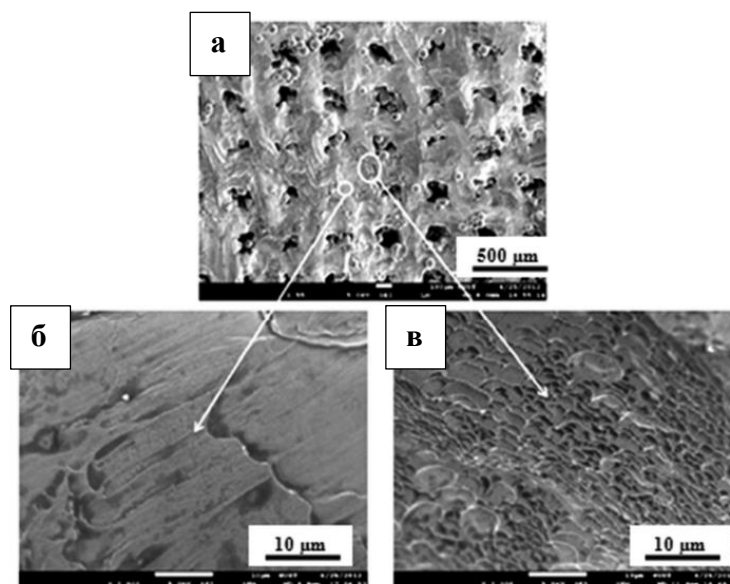


Рисунок 8 – Микроструктура пористого образца Ti-6Al-4V EBM

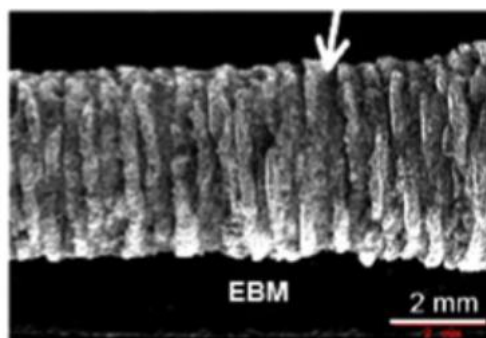


Рисунок 9 – Наружная поверхность EBM образца Ti-6Al-4V

Авторы статьи [32] исследовали микроструктуру образцов Ti-6Al-4V, изготовленных методом EBM при различных условиях термической обработки. Полученные в результате исследования изображения микроструктуры представлены на рисунке 10.

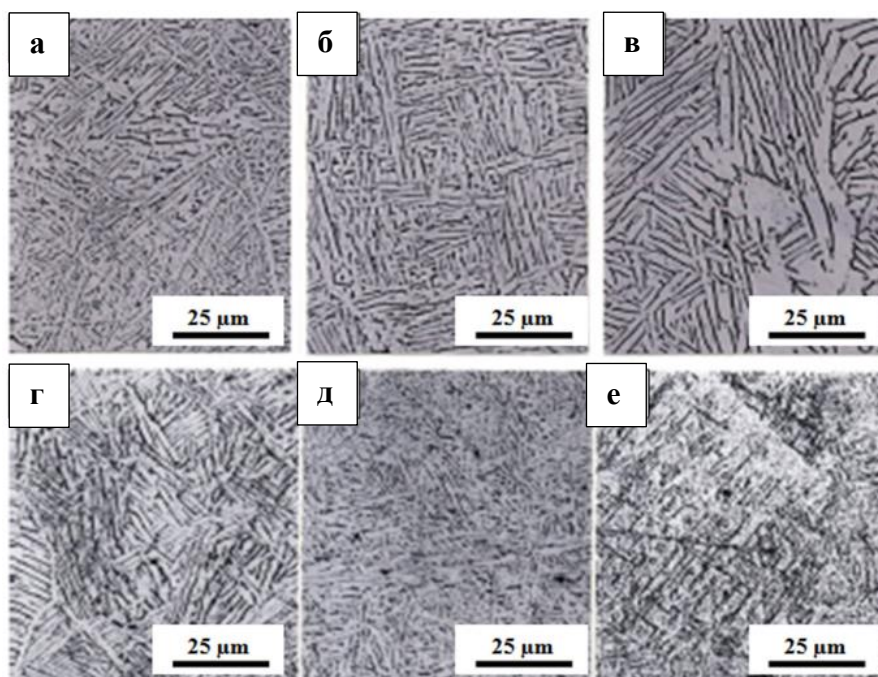


Рисунок 10 – Изображения микроструктуры Ti-6Al-4V EBM после термической обработки в различных условиях (а-в) – увеличение размера зерна, (г-е) – уменьшение размера зерна альфа-фазы в результате эффекта быстрого охлаждения

Обнаружено, что каждое последующее взаимодействие потока электронов с порошком увеличивает средний размер зерна альфа-фазы. Увеличение среднего размера зерна, как полагают, вызвано эквивалентным уменьшением твердости, а уменьшение размера зерна альфа-фазы является следствием быстрого охлаждения (рисунок 10).

1.2.3 Получение образцов из сплава Ti-6Al-4V методом произвольной электронно-лучевой плавки

В работе [33] проводилось исследование микроструктуры и механических свойств сплава Ti-6Al-4V, полученного методом произвольно электронно-лучевой плавки. Показано, что в микроструктуре изготовленного материала преобладают столбчатые и равноосные зерна. Фазовый состав идентифицирован методами рентгеновской дифракции и просвечивающей электронной микроскопии. Результаты показывают, что полученные образцы Ti-6Al-4V

имеют пластинчатую структуру, структуру корзиночного плетения и видманштеттову структуру. Наблюдается градиентная микроструктура, которая, в основном, возникает в результате сложных термических циклов.

В качестве подложки использовались горячекатаные листы Ti-6Al-4V, соответствующие спецификации GB/T 13810-2017. Подложка прямоугольной формы размером 100мм×100мм×4мм была обработана и отполирована наждачной бумагой с зернистостью 400, после чего очищена в ацетоне. В качестве сырья в данном исследовании авторы использовали коммерческую проволоку из сплава Ti-6Al-4V марки ASTM B863 сорта 5 диаметром 1,2 мм. Состав подложки и проволоки указан в работе [34]. Схематическое изображение конструкции системы EBF³ приведено на рисунке 11.

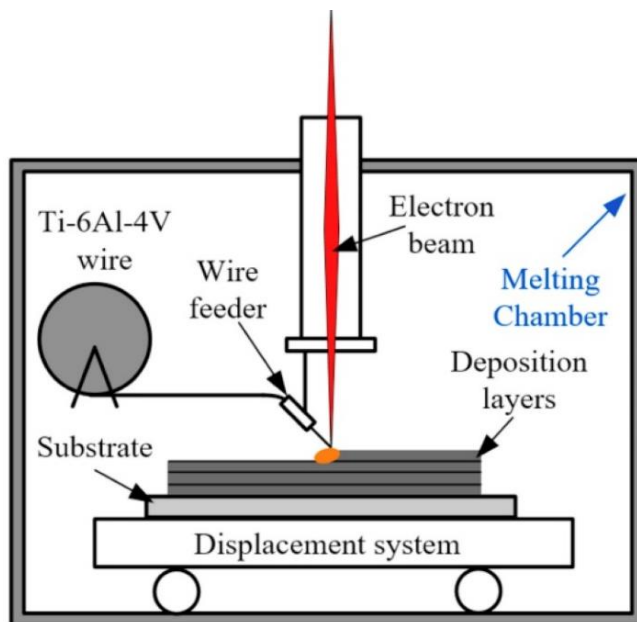


Рисунок 11 – Схематическое изображение конструкции системы EBF³

Параметры пучка, определенные на основании предыдущих исследований, представлены в таблице 3. Микроструктурный анализ был проведен посредством оптического микроскопа Zeiss и сканирующего электронного микроскопа Quant 250FEG, оборудованного энергодисперсионным спектрометром.

Таблица 3 – параметры электронного пучка

Ускоряющее напряжение	Ток пучка	Ток накала	Ток фокусировки	Вакуум в камере	Рабочее расстояние
60 кВ	10 мА	432 мА	670 мА	7×10^{-2} Па	150 мм

Различия в фазовом составе идентифицировали с помощью рентгеноструктурного анализа с источником CuK_α . Диапазон углов дифракции 2θ составлял $30\text{--}80^\circ$, скорость сканирования составляла $10^\circ / \text{мин}$ с шагом $0,02^\circ$. Кристаллическую структуру характеризовали непосредственно с помощью просвечивающей электронной микроскопии (ТЕМ, Теснаі20, при 200 кВ). Распределение микротвердости образца измеряли с помощью твердомера Buehler Vickers с приложенной нагрузкой 300 г и временем выдержки 10 с, устанавливая расстояние 0,25 мм между соседними углублениями. Полученный образец Ti-6Al-4V показан на рисунке 12.

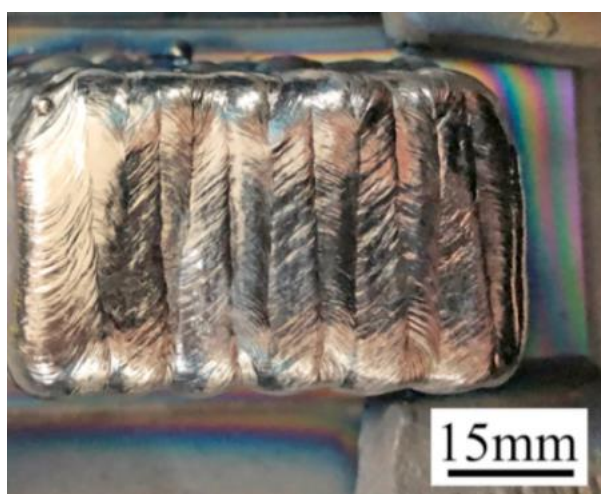


Рисунок 12 – Образец Ti-6Al-4V, полученный по технологии EBF³

На рисунке 13 представлена оптическая макрофотография поперечного сечения полученного образца Ti-6Al-4V, на котором видны высокоплотные структуры без пористости и пустот. В материале может наблюдаться перепад толщины слоев из-за различных условий отвода тепла.

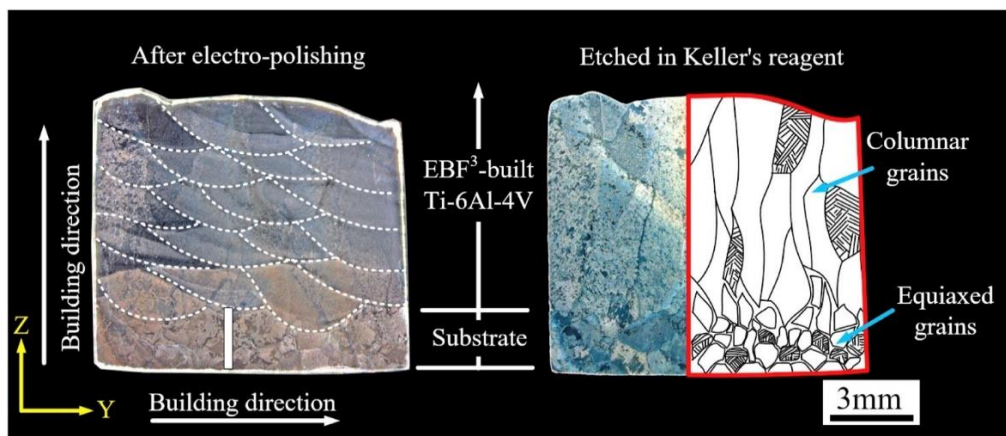


Рисунок 13 – Оптическая макрофотография поперечного сечения готового образца Ti-6Al-4V при различных методах травления: левый рисунок соответствует образцу после электрополировки, а правый рисунок - протравленному в реактиве Келлера

Изображение микроструктуры образца Ti-6Al-4V вдоль зоны плавления представлено на рисунке 14. Как видно из рисунка 14, микроструктура в основном состоит из очень тонкой ламеллярной структуры (1-ый и 3-ий слой), имеются области со структурой корзиночного плетения (1-ый и 5-ый слой), а также видна Видманштеттова структура (5-ый слой). Отчётливо видны границы зерна β -фазы.

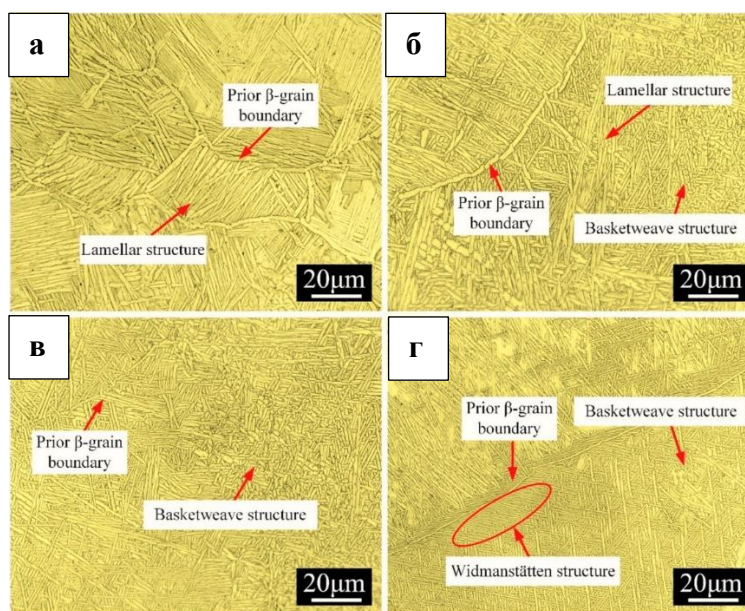


Рисунок 14 – Оптические микрофотографии образца Ti-6Al-4V: (а) подложка, закрытая областью зоны плавления, (б) 1-й слой, (в) 3-й слой и (г) 5-й слой

1.2.4 Создание металлокерамических композитов на основе диборида титана и сплава Ti-6Al-4V методом селективного лазерного спекания

В работе [35] методом селективного лазерного спекания был получен сплав Ti-6Al-4V с различным содержанием TiB₂. Влияние добавки TiB₂ на микроструктуру, твердость и износостойкость изучали с помощью оптической микроскопии, сканирующей электронной микроскопии, рентгеновской дифракции, дифракции обратно рассеянных электронов. С увеличением добавления TiB₂ микроструктура изменилась с мартенситной (α') на бимодальную структуру. Следовательно, показатели твердости и износостойкости значительно улучшились.

Были изготовлены образцы сплава Ti-6Al-4V с последовательным добавлением TiB₂ (0,2%, 0,5%, 1%, 1,5%, 2%, масс.). Для приготовления композиционной порошковой смеси использовали систему шаровой мельницы. На рисунке 15 и 16 представлены СЭМ изображения исходных порошков образца Ti-6Al-4V и TiB₂, соответственно.

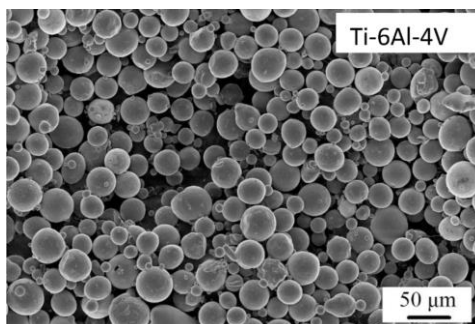


Рисунок 15 – исходный порошок образца Ti-6Al-4V

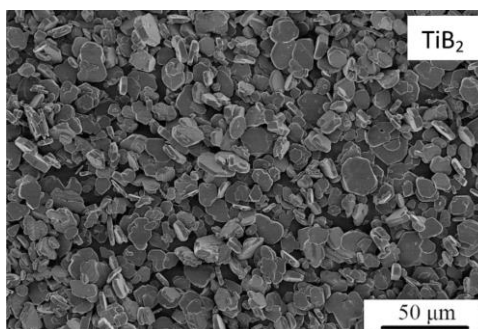


Рисунок 16 – исходный порошок образца TiB₂

Результаты оптических микрофотографий представлены на рисунке 17.

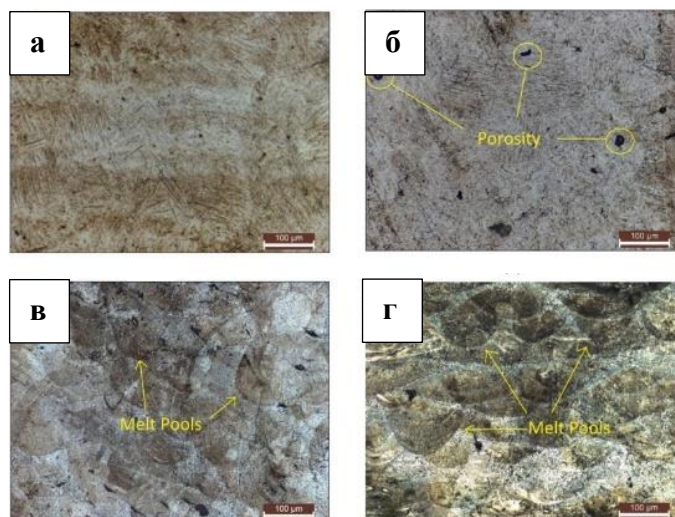


Рисунок 17 – Оптические микрофотографии

(а) сплав Ti-6Al-4V; (б) сплав Ti-6Al-4V-0,2TiB₂; (в) сплав Ti-6Al-4V-0,5TiB₂; (г) сплав Ti-6Al-4V-2TiB₂

Изображение структуры сплава Ti-6Al-4V-0,5TiB₂, полученное при помощи СЭМ, представлено на рисунке 18.

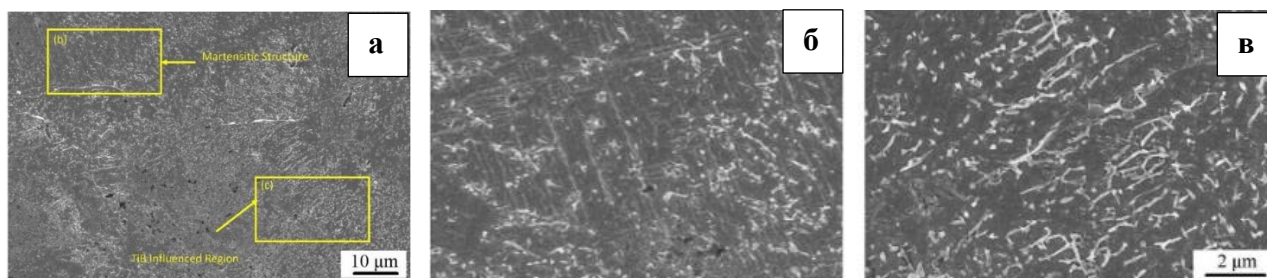


Рисунок 18 – (а) СЭМ изображение сплава Ti-6Al-4V-0,5TiB₂;

(б) изображение частично мартенситной зоны;

(в) изображение переходной зоны под влиянием TiB

В исследовании [38] также методом селективного лазерного спекания получили металломатричный композит TiB₂/Ti-6Al-4V с 10% массовым содержанием мелкодисперсного TiB₂. Микроструктура изучалась при помощи оптической и сканирующей электронной микроскопии. Твердость определялась методом по Виккерсу. Установлено, что добавление TiB₂ к сплаву Ti-6Al-4V приводит к увеличению твердости на 30%. На рисунке 19 представлены

особенности микроструктуры композиционного материала $TiB_2/Ti-6Al-4V$, полученного методом SLM.

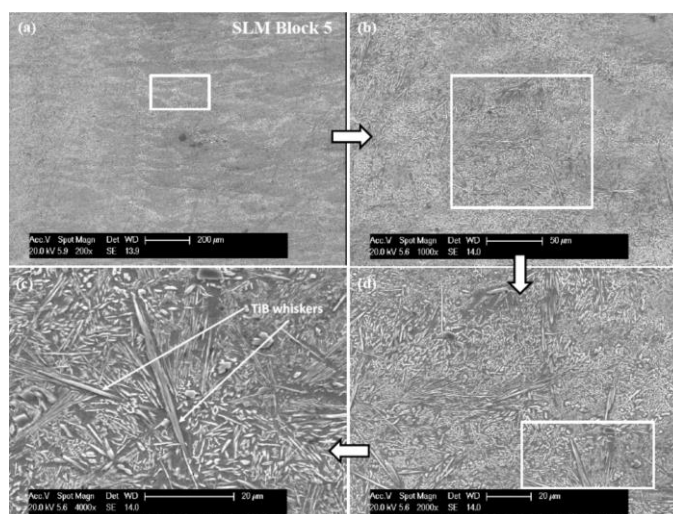


Рисунок 19 – Микроструктура $TiB_2/Ti-6Al-4V$

В работе [36] были изготовлены металломатричные композиционные материалы на основе $TiB/Ti-6Al-4V$ методом селективного лазерного спекания, обладающие повышенной твердостью и износостойкостью. Установлено, что композиты $TiB/Ti-6Al-4V$, полученные методом селективного лазерного спекания, демонстрируют превосходную нанотвердость (6 ГПа). Также наблюдается повышение износостойкости примерно в два раза. На рисунке 20 изображена морфология исходных компонентов и гистограммы распределения частиц порошков по размеру.

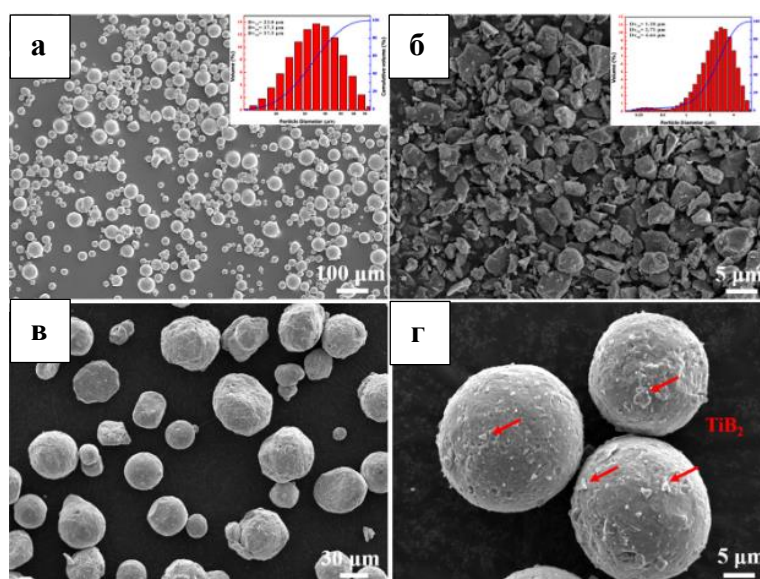


Рисунок 20 – (а, б) морфология и распределение частиц по размеру порошков Ti-6Al-4V и TiB₂, соответственно; (в, г) морфология частиц порошка TiB₂

На рисунке 21 представлены СЭМ изображения микроструктуры полученных образцов с различным массовым содержанием TiB₂.

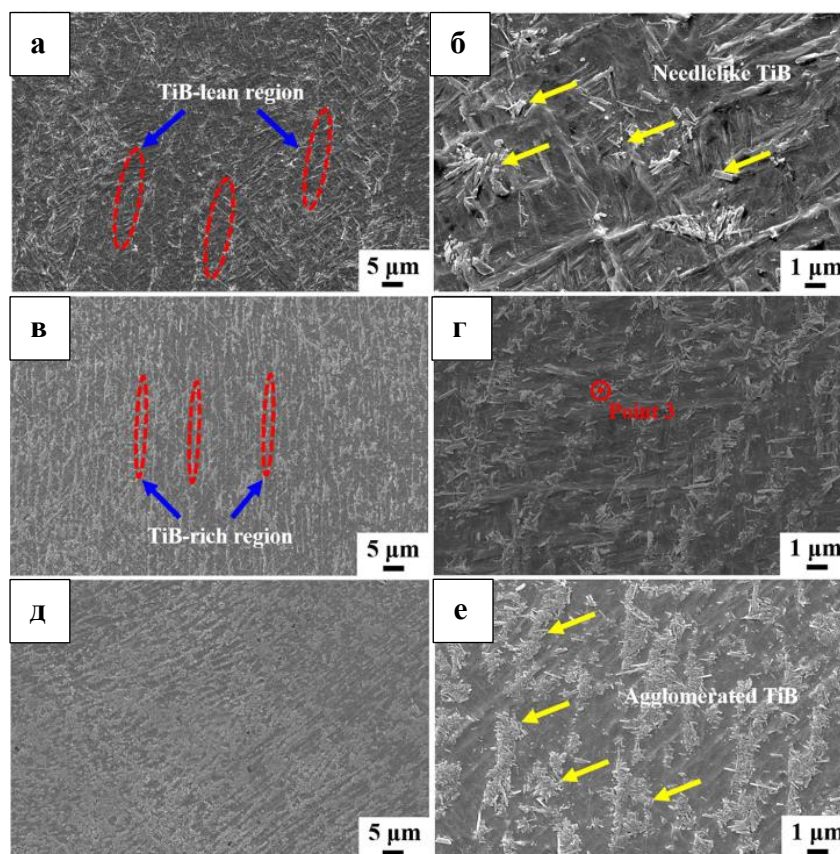


Рисунок 21 – СЭМ изображения образцов с различным содержанием TiB₂ (а, б) 1 масс% TiB₂; (в, г) 2 масс% TiB₂; (д, е) 3 масс% TiB₂

1.2.5 Создание металлокерамических композитов на основе диборида титана и сплава Ti-6Al-4V методом лазерной наплавки

В работе [37] синтезировали металломатричный композит TiB/Ti-6Al-4V методом лазерной наплавки. Смесь порошков TiB₂/Ti использовалась в качестве прекурсора. Среднее значение твердости составило 7,5 ГПа, модуль Юнга по результатам испытаний на растяжение составил E=519±30 ГПа, соответственно. Оптические изображения микроструктуры композитов TiB/Ti-6Al-4V с различным объемным содержанием TiB₂ представлены на рисунке 22.

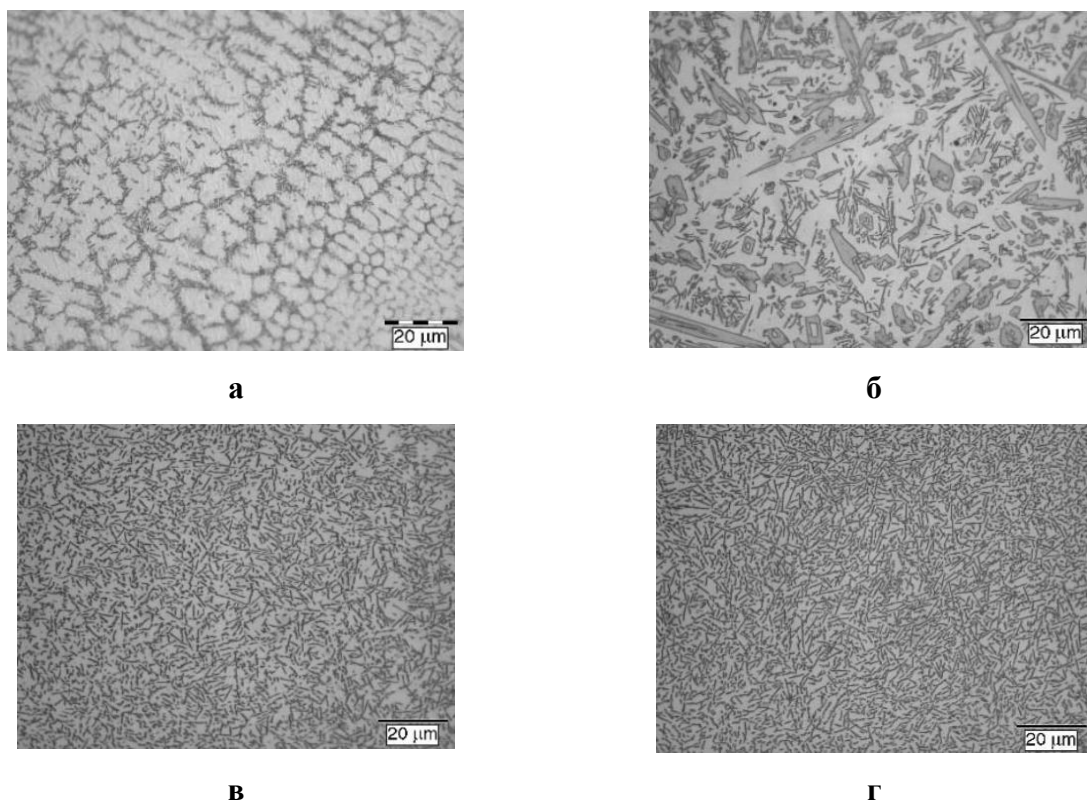


Рисунок 22 – оптические изображения микроструктуры образцов TiB/Ti-6Al-4V с различным объемным содержанием TiB₂:
(а) - 20%; (б) - 40%; (в) - 27%; (г) - 33%

В работе [38] также методом селективной лазерной наплавки был получен металломатричный композит TiB/Ti-6Al-4V. По сравнению с чистым сплавом Ti-6Al-4V, полученным тем же методом, микротвердость предел прочности и предел текучести значительно улучшились. Установлено, что предел прочности при растяжении и предел текучести увеличиваются на 25,7 % (1396,4 МПа) и 30,8 % (1322,2 МПа), соответственно.

1.2.6 Создание металлокерамических композитов на основе карбида титана и сплава Ti-6Al-4V методом EBF³

В работе [39] рассматривается технология электронно-лучевой плавки из титанового сплава Ti-6Al-4V и порошка TiC. Проведено исследование влияния параметров 3D-печати на микроструктуру и механические свойства композитов TiC_x/Ti-6Al-4V. Одновременная подача проволоки из Ti-6Al-4V и механокомпозита TiC_x/Ti-6Al-4V приводит к изменению микроструктуры

образцов, полученных при помощи 3D-печати. Такое изменение микроструктуры приводит к значительному увеличению микротвердости и механических характеристик при растяжении. Максимальный предел прочности при растяжении (950 МПа) и пластичность (6%) достигаются при введении механокомпозита $\text{TiC}_{15\text{масс.}\%}/\text{Ti-6Al-4V}$. На рисунке 23 представлены СЭМ - изображения исходных порошковых материалов.

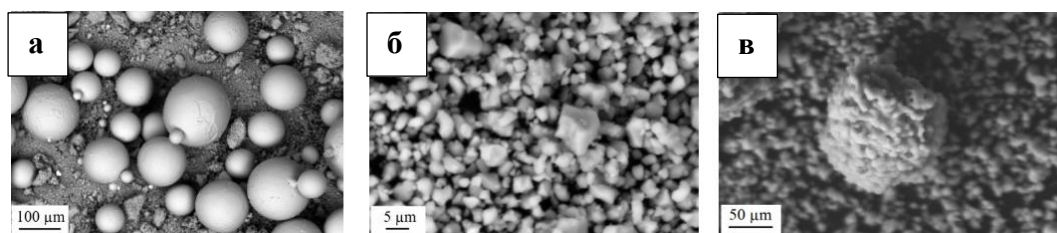


Рисунок 23 – СЭМ микрофотографии исходных порошков:

(а) сплав Ti-6Al-4V ; (б) карбид титана TiC ; (в) механокомпозит, сформированный в результате механической активации порошковых смесей состава $\text{Ti-6Al-4V} + \text{TiC}$.

Микроструктура образцов, полученных по технологии EBF^3 , представлены на рисунке 24.

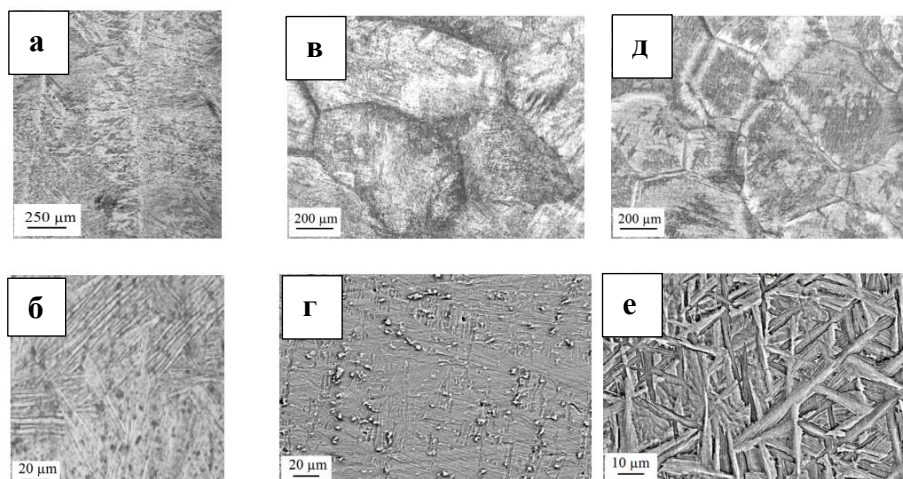


Рисунок 24 – микрофотографии образцов, полученных с помощью EBF^3 : (а, б) сплав Ti-6Al-4V ; (в, г) композит $\text{TiC}_{15\text{масс.}\%}/\text{Ti-6Al-4V}$; (д, е) композит $\text{TiC}_{35\text{масс.}\%}/\text{Ti-6Al-4V}$.

Установлено, что наибольшее значение предела прочности при растяжении (950 МПа) наблюдается в композите $\text{TiC}_{15\text{масс.}\%}/\text{Ti-6Al-4V}$.

С увеличением массовой доли карбида титана в композите не наблюдается дальнейшего роста предела прочности, при этом значительно уменьшается пластичность (с 6 до 2%). Микротвердость $TiC_{15\text{масс\%}}/Ti-6Al-4V$ составила 7300 МПа.

1.2.7 Создание металлокерамических композитов на основе карбида титана и сплава Ti-6Al-4V методом лазерной наплавки

В работе [40] проведены исследования по изучению микроструктуры и твердости функционально-градиентных материалов (Ti-6Al-4V/TiC), полученных методом лазерной наплавки. Функционально градиентный материал без трещин Ti-6Al-4V-TiC был изготовлен методом лазерной наплавки с использованием порошков TiC и Ti-6Al-4V, которые были предварительно смешаны в различных соотношениях: 10% TiC, 20% TiC и 30% TiC. Изучено изменение твердости по градиенту состава. Твердость по Виккерсу изменилась с 300 HV_{1,0} на нижней подложке Ti-6Al-4V до 600 HV_{1,0}. СЭМ изображения микроструктуры показаны на рисунке 25.

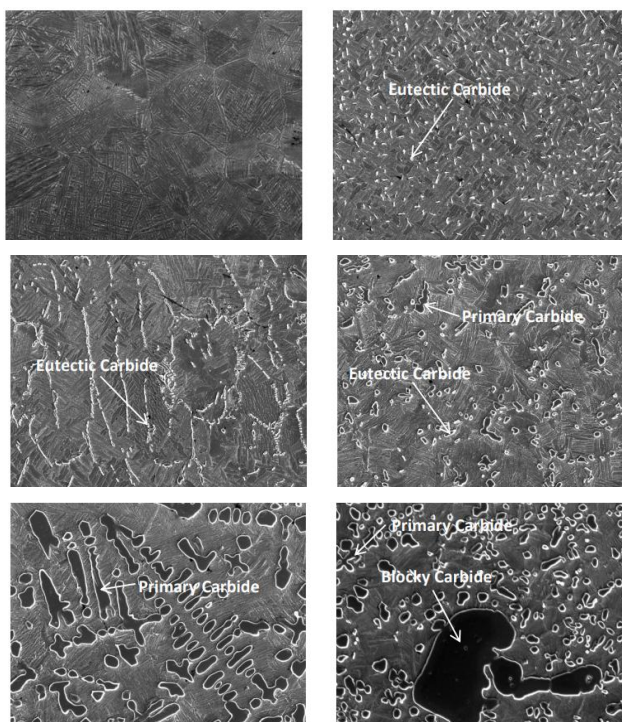


Рисунок 25 – микроструктура Ti-6Al-4V/TiC с увеличением содержания углерода с 0 до 30 %

1.3 Электроискровое легирование

В большинстве современных машин и рабочих установок износу подвергаются трущиеся поверхности сопрягаемых деталей, соответственно именно эти детали должны быть более стойкими к трению, коррозии и внешним воздействиям, чем вся деталь.

На данный момент существует достаточно много способов упрочнения деталей, тем самым повышая их коррозионную стойкость и уменьшая взаимотрение. Одним из перспективных способов легирования поверхностей, является электроискровое легирование [41].

Электроискровое легирование позволяет повысить износостойкость, твердость и прочность детали. Процесс электроискрового легирования основан на явлении электрической эрозии материалов при искровом разряде в газовой среде, но преимущественно на воздухе, и полярного переноса продуктов эрозии на катод (деталь), на поверхности которого формируется измененный слой структуры и состав. В результате электрического пробоя межэлектродного промежутка возникает искровой разряд, в котором поток электронов приводит к местному разогреву электрода (анода). На поверхности катода под действием высоких тепловых нагрузок осуществляются микро-металлургические, термомеханические, гидродинамические и диффузионные процессы. С помощью данных процессов осуществляется процесс перемешивания материала катода и анода, при их взаимодействии в газовой среде или же в воздушной атмосфере, что располагает к образованию высокой адгезии между основой и формирующимся слоем [42].

На рисунке 26 приведена схема установки для ручного электроискрового легирования; она включает в себя: генератор импульсов 1, электромагнитный вибратор 3, легирующий электрод 2 и легируемый электрод 4.

Для устойчивого осуществления процесса легирования необходимо периодическое контактирование с определенной частотой легирующего электрода 2 с легируемым электродом - деталью 4. Такое контактирование

обеспечивает электромагнитный вибратор 3 (имеются и другие конструкции вибраторов) [43].

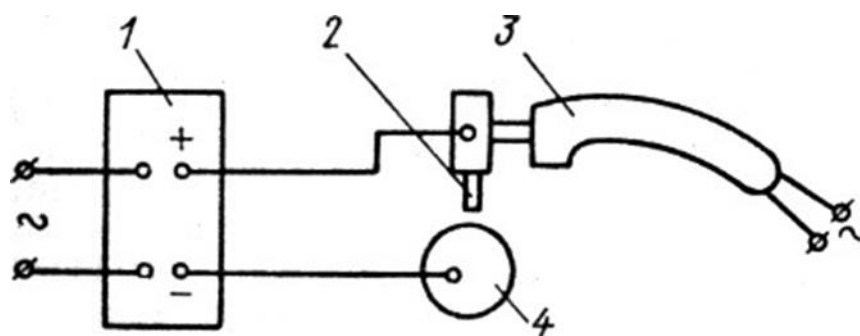


Рисунок 26 – Схема электроискрового легирования [47]

Условием получения гладкой упрочненной поверхности является перемещение анода относительно катода во время паузы между импульсами. В этом случае происходит необходимое перемешивание и взаимное проникновение расплавленного металла обоих электродов друг в друга и улучшение качества обработанной поверхности. Отметим, что так же необходимо следить за температурой нагрева анода и не допускать его перегрева [44].

Метод электроискрового легирования имеет ряд преимуществ:

- высокая адгезия покрытия с основой (отрыв покрытия от подложки практически невозможен, так как атомы покрытия диффундируют в подложку);
- возможность легирования поверхности локально;
- отсутствие необходимости в предварительной подготовке поверхности.

Наряду с преимуществами имеются и недостатки:

- высокая шероховатость поверхности;
- малая толщина полученного покрытия, что ограничивает область применения.

Вопрос получения износостойкого покрытия материалов при помощи электроискрового легирования является исключительно важным, так как позволяет открыть новые возможности для применения деталей, которые подвержены данному методу упрочнения поверхности. Деталь после обработки становится более износостойкой и менее подверженной к механическим и внешним воздействиям, что позволяет расширить сферу ее применения в машиностроении, авиации и аэрокосмическом комплексе.

Глава 2 Материалы и методика эксперимента

Для изготовления образцов была использована титановая проволока Ti-6Al-4V (5,95 Al, 4,37 V, 0,02 Si, 89,66 вес. % Ti). Легирование проволоки проводилось электронно-искровым способом в воздушной атмосфере, при напряжении 90 В и емкости конденсатора 125 мкФд.

Аноды на основе карбида титана, аноды на основе диборида титана, используемые в установке для электроискрового легирования, получены путем спекания соответствующих порошков при 1700°C в течение 5 минут под давлением 40 МПа.

Аноды на основе карбида титана и диборида титана, используемые в установке для электроискрового легирования, получены путем спекания соответствующих порошков при 1300°C в течение 10 минут под давлением 60 МПа.

3D печать образцов осуществлялась методом электронно-лучевого плавления титановой проволоки. Электронно-лучевое плавление проволоки проводили на установке 6E400 с помощью термо-катодной пушки при давлении $1,3 \times 10^{-3}$ Па и ускоряющем напряжении 30 кВ. Плавление проволоки, подвергнутой легированию в защитной среде, проводили при $I=20$ мА, а без защитной среды при $I=24$ мА. На подложке из титановой пластины толщиной 10 мм был выращен брусок шириной 25 мм, высотой 25 мм и длиной 30 мм.

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.

Металлографические исследования проводили с использованием оптического микроскопа Carl Zeiss Axiovert 40 MAT и сканирующего электронного микроскопа LEO EVO 50 (РЭМ).

Микроструктура исследуемых образцов была выявлена с использованием раствора Кролла (2 мл HCl, 2 мл HF, 96 мл H₂O). Оценка относительного

содержания фаз проводилась методом линейного анализа.

Измерение микротвердости металлокерамических образцов было проведено с помощью микротвердомера «ПМТ-3М» при выдержке под нагрузкой 50 г в течение 10 с.

Изучение фазового состава исследуемых образцов проводили использованием дифрактометра Shimadzu-7000, программных продуктов – Search Match, Powder Cell и базы данных PDF-4 2019.

Глава 4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

Введение

Цель данного раздела ВКР заключается в оценке перспективности разработки и планировании финансовой и коммерческой ценности конечного продукта, предлагаемого в рамках НИ. Коммерческая ценность определяется не только наличием более высоких технических характеристик над конкурентными разработками, но и тем, насколько быстро разработчик сможет ответить на следующие вопросы: будет ли продукт востребован на рынке, какова будет его цена, каков бюджет научного исследования, какое время будет необходимо для продвижения разработанного продукта на рынок.

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.

Цель данной ВКР – исследование микроструктуры, фазового состава и механических свойств металлокерамических композитов, полученных путем электронно-лучевого плавления проволоки из титанового сплава Ti-6Al-4V, подверженной предварительному электроискровому легированию карбидом и диборидом титана.

4.1 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения

4.1.1 Анализ конкурентных технических решений

В процессе работы рассматривались три варианта реализации данного устройства:

Вариант 1 – метод, использовавшийся в данной работе Electron beam freeform fabrication;

Вариант 2 – изготовление деталей методом Selective laser melting;

Вариант 3 – изготовление деталей литьем.

В таблице 4 представлено сравнение разработок-конкурентов и разработки данного НИ с точки зрения технических и экономических критериев оценки эффективности.

Таблица 4 – Сравнение конкурентных технических решений (разработок)

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		Б _ф	Б _{к1}	Б _{к2}	К _ф	К _{к1}	К _{к2}
1	2	3	4	5	6	7	8
Технические критерии оценки ресурсоэффективности							
1. Точность	0,1	4	5	3	0,4	0,5	0,3
2. Низкая пористость	0,11	5	4	3	0,55	0,44	0,33
3. Высокая прочность	0,1	5	5	2	0,5	0,5	0,2
4. Высокая плотность	0,08	5	4	2	0,4	0,32	0,16
5. Технологичность	0,1	5	4	5	0,5	0,4	0,5
6. Эффективность работы	0,06	5	5	5	0,3	0,3	0,3
Экономические критерии оценки эффективности							
1. Реализация продукта	0,1	4	5	5	0,4	0,5	0,5
2. Уровень охвата рынка	0,05	4	5	3	0,2	0,25	0,15
3. Предполагаемая цена	0,06	4	4	5	0,24	0,24	0,3
4. Предполагаемый срок эксплуатации	0,08	5	3	2	0,4	0,24	0,16
5. Финансирование научной разработки конкурентных товаров и разработок	0,08	5	4	2	0,4	0,32	0,16
6. Срок выхода на рынок	0,03	5	5	3	0,15	0,15	0,09
7. Наличие сертификации разработки	0,05	5	5	4	0,25	0,25	0,2
Итого	1	61	58	44	4,69	4,41	3,35

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

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

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

Примеры расчётов конкурентоспособности для научной разработки и конкурентов:

$$K_{\phi} = 0,1 \cdot 4 + 0,11 \cdot 5 + 0,1 \cdot 2 + 0,08 \cdot 5 + 0,1 \cdot 5 + 0,06 \cdot 5 + 0,1 \cdot 4 + 0,05 \cdot 4 + 0,06 \cdot 4 + 0,08 \cdot 5 + 0,08 \cdot 5 + 0,03 \cdot 5 + 0,05 \cdot 5 = 4,69$$

$$K_{K1} = 0,1 \cdot 5 + 0,11 \cdot 4 + 0,1 \cdot 5 + 0,08 \cdot 4 + 0,1 \cdot 4 + 0,06 \cdot 5 + 0,1 \cdot 5 + 0,05 \cdot 5 + 0,06 \cdot 4 + 0,08 \cdot 3 + 0,08 \cdot 4 + 0,03 \cdot 5 + 0,05 \cdot 5 = 4,41$$

$$K_{K2} = 0,1 \cdot 3 + 0,11 \cdot 3 + 0,1 \cdot 2 + 0,08 \cdot 2 + 0,1 \cdot 5 + 0,06 \cdot 5 + 0,1 \cdot 5 + 0,05 \cdot 3 + 0,06 \cdot 5 + 0,08 \cdot 2 + 0,08 \cdot 2 + 0,03 \cdot 3 + 0,05 \cdot 4 = 3,35$$

Проведенный анализ конкурентных технических решений показал, что предлагаемое в данной ВКР решение является наиболее актуальным и перспективным, а так же имеет конкурентоспособность.

4.1.2 SWOT-анализ

Для исследования внешней и внутренней среды проекта, в этой работе проведен SWOT-анализ с детальной оценкой сильных и слабых сторон исследовательского проекта, а также его возможностей и угроз.

Первый этап, составляется матрица SWOT, в которую описаны слабые и сильные стороны проекта и выявленные возможности и угрозы для реализации проекта, которые проявились или могут появиться в его внешней среде, приведены в таблице 5.

Таблица 5 – Матрица SWOT-анализа

Сильные стороны	Слабые стороны
С1. Экологичность технологии.	Сл1. Невысокие объемы производства.
С2. Низкая стоимость производства в сравнении с другими технологиями.	Сл2. Нетранспортабельная установка из-за больших габаритных размеров.
С3. Высокая скорость создания изделий.	Сл3. Долгосрочность поставки материалов, используемых для проведения исследования.
С4. Высокоточное производство (погрешность $\pm 0,2$ мм на каждые 100 мм создаваемого изделия).	Сл4. Длительный процесс подготовки установки к работе, вследствие высоких температур в рабочей камере.
Возможности	Угрозы
В1. Возможность применения технологии в любом мелкосерийном производстве.	У1. Развитая конкуренция технологий производства

В2. Появление дополнительного спроса на новый продукт.	У2. Несвоевременное финансирование научного проекта при дальнейшем развитии.
В3. Внедрение технологии на крупные производства.	
В4. Возможность использовать в качестве расходного материала проволоку и порошки.	

На втором этапе на основании матрицы SWOT строятся интерактивные матрицы возможностей и угроз, позволяющие оценить эффективность проекта, а также надежность его реализации. Соотношения параметров представлены в таблицах 6–9.

Таблица 6 – Интерактивная матрица проекта «Возможности проекта и сильные стороны»

Сильные стороны проекта					
Возможности проекта		C1	C2	C3	C4
	B1	+	+	+	+
	B2	+	+	+	+
	B3	+	+	+	-
	B4	-	+	+	-

Таблица 7 – Интерактивная матрица проекта «Возможности проекта и слабые стороны»

Слабые стороны проекта					
Возможности проекта		Сл1	Сл2	Сл3	Сл4
	B1	-	+	-	-
	B2	-	-	-	-
	B3	-	-	-	-
	B4	-	-	-	-

Таблица 8 – Интерактивная матрица проекта «Угрозы проекта и сильные стороны»

Сильные стороны проекта					
Угрозы проекта		C1	C2	C3	C4
	У1	-	-	-	-
	У2	-	-	-	-

Таблица 9 – Интерактивная матрица проекта «Угрозы проекта и слабые стороны»

Слабые стороны проекта					
Угрозы проекта		Сл1	Сл2	Сл3	Сл4
	У1	-	-	-	-
	У2	-	-	+	+

Результаты анализа представлены в итоговой таблице 10.

Таблица 10 - Результаты анализа

	<p>Сильные стороны научно-исследовательского проекта</p> <p>С1. Экологичность технологии.</p> <p>С2. Низкая стоимость производства в сравнении с другими технологиями.</p> <p>С3. Высокая скорость создания изделий.</p> <p>С4. Высокоточное производство (погрешность $\pm 0,2$ мм на каждые 100 мм создаваемого изделия).</p>	<p>Слабые стороны научно-исследовательского проекта</p> <p>Сл1. Нетранспортабельная установка из-за больших габаритных размеров.</p> <p>Сл2. Невысокие объемы производства.</p> <p>Сл3. Долгосрочность поставки материалов, используемых для проведения исследования.</p> <p>Сл4. Длительный процесс подготовки установки к работе, вследствие высоких температур в рабочей камере.</p>
<p>Возможности</p> <p>В1. Возможность применения технологии в любом мелкосерийном производстве.</p> <p>В2. Появление дополнительного спроса на новый продукт.</p> <p>В3. Внедрение технологии на крупные производства.</p> <p>В4. Возможность использовать в качестве расходного материала проволоку и порошки.</p>	<p>Направления развития</p> <p>В3С2С3. Наличие необходимых материалов и оборудования, а также персонала в процессе исследований может способствовать повышению производительности в будущем.</p> <p>В1В2С1С4. Дополнительный спрос появится вследствие тенденции к экологичному производству.</p>	<p>Сдерживающие факторы</p> <p>С3Сл2. Высокая скорость создания изделий покроеет время ожидания необходимых материалов для исследования</p>
<p>Угрозы</p> <p>У1. Периодическая неисправность электронной пушки</p> <p>У2. Несвоевременное финансирование научного проекта при дальнейшем развитии.</p>	<p>Угрозы развития</p> <p>У1У2С3С4. Периодическая неисправность электронной пушки может способствовать к изготовлению бракованной продукции, исправить данный недостаток будет не возможно во время работы установки, так как процесс автоматизирован</p>	<p>Уязвимости:</p> <p>У2Сл2. Разработка новых технологий для увеличения объема производства</p>

Результаты проведенного SWOT-анализа учтены в процессе дальнейшей разработки структуры работ, которые необходимо выполнить в научно-исследовательском проекте.

4.2 Планирование научно-исследовательских работ

4.2.1 Структура работ в рамках научного исследования

Планирование работ предполагало определение структуры работ по проведению научного исследования, определение участников каждого вида работ, установление продолжительности работ, построение графика проведения исследований.

Перечень этапов, работ и распределение исполнителей по выполнению НТР представлены в таблице 11.

Таблица 11 – Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№ раб	Содержание работ	Должность исполнителя
Разработка технического задания	1	Составление и утверждение технического задания, утверждение плана-графика	Научный руководитель
	2	Календарное планирование выполнения	Инженер, научный руководитель
Выбор способа решения поставленной задачи	3	Обзор научной литературы	Инженер
	4	Выбор методов исследования	Инженер
Теоретические и экспериментальные исследования	5	Планирование эксперимента	Инженер, научный руководитель
	6	Проведение эксперимента	Инженер
Обобщение и оценка результатов	7	Обработка полученных данных	Инженер
	8	Анализ полученных результатов НИР	Научный руководитель
	9	Оценка правильности полученных результатов	Инженер, научный руководитель
	10	Оценка эффективности	инженер
	11	Составление пояснительной записки	инженер

4.2.2 Определение трудоемкости выполнения работ и разработка графика проведения

При проведении научных исследований основную часть стоимости разработки составляют трудовые затраты, поэтому определение трудоемкости проводимых работ является одним из важных этапов составления сметы.

Для определения ожидаемого (среднего) значения трудоемкости использована следующая формула:

$$t_{ож\ i} = \frac{3t_{min\ i} + 2t_{max\ i}}{5}, \quad (1)$$

где $t_{ож\ i}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения i -ой работы, человеко-дни;

$t_{min\ i}$ – минимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы, человеко-дни;

$t_{max\ i}$ – максимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы, человеко-дни.

Зная величину ожидаемой трудоемкости, можно определить продолжительность каждой i -ой работы в рабочих днях T_{pi} , при этом учитывается параллельность выполнения работ разными исполнителями. Данный расчёт позволяет определить величину заработной платы.

$$T_{pi} = \frac{t_{ож\ i}}{Ч_i}, \quad (2)$$

где T_{pi} – продолжительность одной работы, рабочие дни;

$t_{ож\ i}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения одной работы, человеко-дни;

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

Для перевода длительности каждого этапа из рабочих в календарные дни, необходимо воспользоваться формулой (3):

$$T_{ki.инж} = T_{pi} \cdot k_{кал}, \quad (3)$$

где T_{ki} – продолжительность выполнения i -й работы в календарных днях;

T_{pi} – продолжительность выполнения i -й работы в рабочих днях;

$k_{\text{кал}}$ – календарный коэффициент.

Календарный коэффициент определяется по формуле:

$$k_{\text{кал.инж}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}}} = \frac{365}{365 - 104 - 14} = 1,48 \quad (4)$$

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

Расчеты временных показателей проведения научного исследования представлены в таблице 12.

Таблица 12 – Временные показатели проведения научного исследования

Название работы	Трудоёмкость работ						Длительность работ в рабочих днях $T_{\text{рi}}$	Длительность работ в календарных днях $T_{\text{кi}}$
	t_{min} , чел-дни		t_{max} , чел-дни		$t_{\text{ожi}}$, чел-дни			
	Исп.1	Исп.2	Исп.1	Исп.2	Исп.1	Исп.2		
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1. Составление и утверждение технического задания, утверждение плана-графика	1	-	4	-	2,2	-	2,2	3
2. Календарное планирование выполнения	1	1	4	4	2,2	2,2	2,2	4
3. Обзор научной литературы	-	5	-	15	-	9	9	14
4. Выбор методов исследования	1	5	2	10	1	7	4	6
5. Планирование эксперимента	-	10	-	25	-	16	16	24
6. Проведение эксперимента	-	10	-	25	-	19	19	29
7. Обработка полученных данных	3	4	6	6	4,2	4,8	4,5	7
8. Анализ полученных результатов НИР	2	4	4	6	2,8	4,8	3,8	6
9. Оценка правильности полученных результатов	-	1	-	3	-	1,8	1,8	3
10. Оценка эффективности	-	5	-	10	-	7	7	11
11. Составление пояснительной записки	-	5	-	10	-	7	7	11
Итого:	8	55	20	114	12,4	78,6	76,5	118

Примечание: Исп. 1 – научный руководитель, Исп. 2 – инженер.

На основе таблицы составлен календарный план-график выполнения проекта с использованием диаграммы Ганта (таблица 13).

Таблица 13 – Диаграмма Ганта

№	Вид работ	Исп	T _{кi} , кал. дн.	Продолжительность работ												
				февр			март			апр			май			
				1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
1	Составление и утверждение технического задания, утверждение плана-графика	Исп1	3													
2	Календарное планирование выполнения ВКР	Исп1 Исп2	2 2													
3	Обзор научной литературы	Исп2	14													
4	Выбор методов исследования	Исп1 Исп2	6													
5	Планирование эксперимента	Исп2	24													
6	Проведение эксперимента	Исп2	29													
7	Обработка полученных данных	Исп1 Исп2	7													
8	Анализ полученных результатов НИР	Исп1 Исп2	6													
9	Оценка правильности полученных результатов	Исп2	3													
10	Оценка эффективности	Исп2	11													
11	Составление пояснительной записки	Исп2	11													

Примечание:

||| – Исп 1 (научный руководитель), ||||| – Исп 2 (инженер)

4.3 Бюджет научно-технического 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 Расчет материальных затрат научно-технического исследования

Материальные затраты отражают стоимость приобретенных материалов и сырья, которые входят в состав вырабатываемой продукции, образуя ее основу, или являются необходимыми компонентами при изготовлении продукции (таблица 14).

Таблица 14 – Сырье, материалы, комплектующие изделия и покупные полуфабрикаты

Наименование статей	Количество, шт.	Цена за единицу, руб.	Итого затраты, руб.
Проволока	3 кг	6550	19650
Порошок	5 кг.	6000	30000
Спирт	2 (100мл)	55	110
Абразивная бумага для шлифовки	20	50	10000
Защитные перчатки	5 шт.	10	50
Итого:			59810

Цены приняты на основании прайс-листа поставщика материалов: <https://aliradar.com>, <https://kodeks.ru/>, <https://tomsk.220-volt.ru/>, <https://apteka.ru/>.

4.3.2 Расчет амортизации специального оборудования

Расчет амортизации производится на находящееся в использовании оборудование. В итоговую стоимость проекта входят отчисления на амортизацию за время использования оборудования в статье накладных расходов (таблица 15).

Таблица 15 – Затраты на оборудование

№	Наименование оборудования	Кол-во, шт.	Срок полезного использования, лет	Цена единицы оборудования, тыс. руб.	Общая стоимость оборудования, тыс. руб.
1	Установка электронно-лучевая плавка Teta 6E400	1	10	60млн.	6 млн.
2	Оптический микроскоп ZEISS AXIOVERT25	1	10	500тыс.	500 тыс.
3	Дифрактометр Shimadzu XRD-7000	1	7	740 тыс.	740 тыс.
4	Микротвердомер ПМТ-3М	1	10	320 тыс.	320 тыс.
Итого:	7,56 млн. руб.				

Рассчитаем амортизацию для Teta 6E400, с учетом срока полезного использования 10 лет:

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

Общую сумму амортизационных отчислений найдем следующим образом:

Teta 6E400:

$$A = \frac{\text{НАИ}}{12} \cdot m = \frac{0,1 \cdot 6000000}{12} \cdot 1 = 50000 \text{ руб.}$$

Оптический микроскоп:

$$A = \frac{\text{НАИ}}{12} \cdot m = \frac{0,1 \cdot 500000}{12} \cdot 1 = 4167 \text{ руб.}$$

Дифрактометр:

$$A = \frac{\text{НАИ}}{12} \cdot m = \frac{0,142 \cdot 740000}{12} \cdot 1 = 8809 \text{ руб.}$$

Микротвердомер:

$$A = \frac{\text{НАИ}}{12} \cdot m = \frac{0,1 \cdot 320000}{12} \cdot 1 = 2666 \text{ руб}$$

Суммарные затраты амортизационных отчислений:

$$A = 50000 + 4167 + 8809 + 2666 = 65642 \text{ руб}$$

4.3.3 Основная заработная плата исполнителей темы

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 $Z_{осн}$ одного работника рассчитывается по следующей формуле:

$$Z_{осн} = Z_{дн} \cdot T_p, \quad (5)$$

где $Z_{он}$ - среднедневная заработная плата, руб. ; T_p - продолжительность работ, выполняемых работником, раб.дн. (таблица 12).

Для шестидневной рабочей недели (рабочая неделя руководителя) :

$$Z_{он} = \frac{Z_m \cdot M}{F_о} = \frac{51285 \cdot 10,3}{246} = 2147,3 \text{ руб.} \quad (6)$$

где Z_m – должностной оклад работника за месяц ; $F_о$ – действительный годовой фонд рабочего времени исполнителей, 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 пятидневной рабочей недели (рабочая неделя инженера) :

$$Z_{он} = \frac{Z_m \cdot M}{F_о} = \frac{33150 \cdot 11,2}{213} = 1743,1 \text{ руб.} \quad (7)$$

Должностной оклад работника за месяц :

- для руководителя:

$$Z_m = Z_{мс} \cdot (1 + k_{np} + k_о) k_p = 26300 \cdot (1 + 0,3 + 0,2) \cdot 1,3 = 51285 \text{ руб.} \quad (8)$$

- для инженера:

$$Z_m = Z_{мс} \cdot (1 + k_{np} + k_о) k_p = 17000 \cdot (1 + 0,3 + 0,2) \cdot 1,3 = 33150 \text{ руб.} \quad (9)$$

где $Z_{мс}$ – заработная плата, согласно тарифной ставке, руб.; k_{np} – премиальный коэффициент, равен 0,3; $k_о$ – коэффициент доплат и надбавок, равен 0,2; k_p – районный коэффициент, равен 1,3 (для г. Томска).

В таблицах представлен баланс рабочего времени исполнителей и расчет основной заработной платы исполнителей (таблица 16, таблица 17).

Таблица 16 – Баланс рабочего времени исполнителей

Показатели рабочего времени	Руководитель	Инженер
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней (выходные, праздничные дни)	52/14	104/14
Потери рабочего времени (отпуск, невыходы по болезни)	48/5	24/10
Действительный годовой фонд рабочего времени	246	213

Таблица 17 – Расчет основной заработной платы исполнителей

Исполнители НИ	$Z_{мс}, руб$	$k_{пр}$	k_{δ}	k_p	$Z_{м}, руб$	$Z_{\deltaн}, руб$	$T_p, раб.дн.$	$Z_{осн}, руб$
Руководитель	26300	0,3	0,2	1,3	51285	2147,3	12,4	26626,52
Инженер	17000	0,3	0,2	1,3	33150	1743,1	78,6	137007,66
Итого:								163634,18

Дополнительная заработная плата определяется по формуле:

– для руководителя:

$$Z_{доп} = k_{доп} \cdot Z_{осн} = 0,15 \cdot 26626,52 = 3993,978 \text{ руб.} \quad (10)$$

– для инженера:

$$Z_{доп} = k_{доп} \cdot Z_{осн} = 0,15 \cdot 137007,66 = 20551,149 \text{ руб.} \quad (11)$$

где $k_{доп}$ – коэффициент дополнительной заработной платы (на стадии проектирования принимаем равным 0,15).

4.3.4 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)

Отчисления во внебюджетные фонды определяется по формуле:

– для руководителя:

$$Z_{внеб} = k_{внеб} (Z_{осн} + Z_{доп}) = 0,3 \cdot (26626,52 + 3993,978) = 9186,15 \text{ руб.} \quad (12)$$

– для инженера:

$$Z_{внеб} = k_{внеб} (Z_{осн} + Z_{доп}) = 0,3 \cdot (137007,66 + 20551,149) = 47267,64 \text{ руб.} \quad (13)$$

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).

4.3.5 Накладные расходы

Накладные расходы включают в себя следующие расходы: печать ксерокопирование материалов исследования, оплата услуг связи и т.д.

Сумма пяти статей затрат, рассчитанных выше, приведена в таблице ниже и используются для расчета накладных расходов (таблица 18).

Таблица 18 – Группировка затрат по статьям

Статьи					
1	2	3	4	5	6
Амортизация	Сырье, материалы	Основная заработная плата	Дополнительная заработная плата	Отчисления на социальные нужды	Итого без накладных расходов
65642	59810	163634,18	24545,127	56453,79	370085,097

Величина накладных расходов определяется по формуле (14):

$$Z_{\text{накл}} = (\text{сумма статей}) \cdot k_{\text{нр}} = (65642 + 59810 + 163634,18 + 24545,127 + 56453,79) \cdot 0,2 = 74017,02 \text{ руб.} \quad (14)$$

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

На основании полученных данных по отдельным статьям затрат составляется калькуляция плановой себестоимости НИ «Исследование микроструктуры и механических свойств металлокерамических композитов на основе сплава Ti-6Al-4V, созданных с применением аддитивных технологий» по форме, приведенной в таблице 19.

Таблица 19 – Группировка затрат по статьям

№	Наименование статьи	Сумма, руб.			Примечание
		Текущий Проект	Исп.2	Исп.3	
1	Материальные затраты НИР	59810	61023	62504	Пункт 4.2.3.1
2	Затраты на специальное оборудование	65642	65642	65642	Пункт 4.2.3.2
3	Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	163634,18	163634,18	163634,18	Пункт 4.2.3.3
4	Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы	24545,127	24545,127	24545,127	Пункт 4.2.3.3
5	Отчисления во внебюджетные фонды	56453,79	56453,79	56453,79	Пункт 4.2.3.4
6	Накладные расходы	74017,02	74017,02	74017,02	Пункт 4.2.3.5
Бюджет затрат НИР		444102,117	445315,117	446796,117	Сумма ст. 1-6

4.4 Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования

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

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.

Интегральный финансовый показатель разработки рассчитывается как:

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп.}i} = \frac{\Phi_{ri}}{\Phi_{\text{max}}}, \quad (15)$$

где $I_{\text{финр}}^{\text{исп.}i}$ – интегральный финансовый показатель разработки;

Φ_{ri} – стоимость i -го варианта исполнения;

Φ_{\max} – максимальная стоимость исполнения.

$\Phi_{\text{текущ.проект}} = 444102,117$ руб, $\Phi_{\text{исп.1}} = 445315,117$ руб, $\Phi_{\text{исп.2}} = 446796,117$ руб.

$$\Gamma_{\text{тек.пр.}}^{\text{финр}} = \frac{444102,117}{446796,117} = 0,994$$

$$\Gamma_{\text{исп.2.}}^{\text{финр}} = \frac{445315,117}{446796,117} = 0,997$$

$$\Gamma_{\text{исп.3.}}^{\text{финр}} = \frac{446796,117}{446796,117} = 1$$

В результате расчета консолидированных финансовых показателей по трем вариантам разработки вариант 1 (текущий проект) с меньшим перевесом признан считается более приемлемым с точки зрения финансовой эффективности.

Интегральный показатель ресурсоэффективности вариантов выполнения НИР (I_{pi}) определен путем сравнительной оценки их характеристик, распределенных с учетом весового коэффициента каждого параметра (таблица 20).

Таблица 20 – Сравнительная оценка характеристик вариантов НИР

Объект исследования Критерии	Весовой коэффициент параметра	Текущий проект	Исп.2	Исп.3
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. Материалоёмкость	0,15	4	2	2
ИТОГО	1	4,05	3,6	3,15

Расчет интегрального показателя для разрабатываемого проекта:

$$I_{p1} = 5 \cdot 0,25 + 4 \cdot 0,15 + 3 \cdot 0,2 + 4 \cdot 0,25 + 4 \cdot 0,15 = 4,05$$

$$I_{p2} = 5 \cdot 0,25 + 3 \cdot 0,15 + 3 \cdot 0,2 + 4 \cdot 0,25 + 2 \cdot 0,15 = 3,6$$

$$I_{p3} = 4 \cdot 0,25 + 3 \cdot 0,15 + 2 \cdot 0,2 + 4 \cdot 0,25 + 2 \cdot 0,15 = 3,15$$

Интегральный показатель эффективности вариантов исполнения разработки вычисляется на основании показателя ресурсоэффективности и интегрального финансового показателя по формуле:

$$I_{исп.i} = \frac{I_{р-исп.i}}{I_{финр}} \quad (16)$$

$$I_{вар1} = \frac{4,05}{0,994} = 4,07, \quad I_{вар2} = \frac{3,6}{0,997} = 3,610, \quad I_{вар3} = \frac{3,15}{1} = 3,15$$

Далее интегральные показатели эффективности каждого варианта НИР сравнивались с интегральными показателями эффективности других вариантов с целью определения сравнительной эффективности проекта (таблица 21).

Таблица 21 – Сравнительная эффективность разработки

№ п/п	Показатели	Текущий проект	Исп.2	Исп.3
1	Интегральный финансовый показатель разработки	0,994	0,997	1
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	4,05	3,6	3,15
3	Интегральный показатель эффективности	4,07	3,610	3,15
4	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	1	1,127	1,29

Сравнительная эффективность разработки:

$$\mathcal{E}_{ср2} = \frac{4,07}{3,610} = 1,127$$

$$\mathcal{E}_{ср3} = \frac{4,07}{3,15} = 1,29$$

Сравнение среднего интегрального показателя сопоставляемых вариантов позволило сделать вывод о том, что наиболее финансово- и ресурсоэффективным является вариант 1 (текущий проект).

Наш проект является более эффективным по сравнению с конкурентами.

Выводы по разделу

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

1. Проведенный анализ конкурентных технических решений показал, что метод, который используется в настоящей выпускной квалификационной работе, 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 – 118, общее количество дней, в течение которых работал инженер – 118, и руководитель – 11;

3. Составлен бюджет проектирования, позволяющий оценить затраты на реализацию проекта, которые составляют 444102,1164 руб.;

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

- Значение интегрального финансового показателя ИР составляет 0,994, 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 4,07, по сравнению с 3,610 и 3,15, и является наиболее высоким, что означает, что техническое решение, рассматриваемое в ИР, является наиболее эффективным вариантом исполнения