

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

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Получение композиционных материалов "титан - карбид кремния" методом селективного лазерного сплавления

УДК 621.762.5:669.295

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4БМ83	Габитов Эльнур Каисарович		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ОМ ИШНПТ	Клименов В.А.	д.т.н		

Консультант

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Младший научный сотрудник	Креницын М.Г.	нет		

КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Спицына Л.Ю.	к.э.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

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

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
22.04.01 Материаловедение и технологии материалов	Клименов В.А.	д.т.н		

Планируемые результаты обучения по ООП 22.04.01

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)
P1	Осуществлять сбор и критический анализ информации, включая научные публикации, патенты, маркетинговые исследования в области материаловедения и технологии материалов
P2	Управлять научно-исследовательским и производственным проектом, включая критический анализ проблемных ситуаций, оценки потенциала коллектива и самооценки
P3	Способен представлять и защищать результаты своей работы и деятельности коллектива, включая планы научно-исследовательских работ, производственных проектов, научные публикации и доклады с использованием современных коммуникативных технологий, в том числе на иностранном языке.
P4	Руководить коллективом в сфере своей профессиональной деятельности, толерантно воспринимая социальные, этнические, конфессиональные и культурные различия
P5	Ориентироваться в современных технологиях новых материалов с учетом экономичности, требований готовой продукции и интеллектуального потенциала предприятия, производства или научной группы
P6	Внедрять в производство технологии получения керамических, металлических наноматериалов и изделий, включая эксплуатацию соответствующего оборудования.
P7	Эксплуатировать оборудование и обрабатывать экспериментальные результаты с целью изучения структуры и свойств материалов, диагностики их эксплуатационных характеристик
P8	Разрабатывать новые и модернизировать существующие технологии получения керамических, металлических материалов и изделий, в том числе наноматериалов

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
 _____ Клименов В.А.
 «__» _____ 2020 г.

**ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

Магистерской диссертации

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

Студенту:

Группа	ФИО
4БМ83	Габитов Эльнур Каисарович

Тема работы:

Получение композиционных материалов "титан - карбид кремния" методом селективного лазерного сплавления	
Утверждена приказом директора ИШНПТ	Приказ № _____ от _____

Срок сдачи студентом выполненной работы:	19.06.2020
------------------------------------------	------------

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

<p>Исходные данные к работе</p> <p><i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</i></p>	<p>Установка селективного лазерного сплавления со следующими характеристиками: минимальная высота печати одного слоя 50 мкм, минимальный разрешающая способность 200 мкм, максимальная мощность лазера 500 Вт, максимальная скорость сканирования 2 м/с, область построения 100x100x100 мм (ДхШхВ). Порошки для аддитивных технологий Ti, SiC сферической формы частиц имеющие средние размер 40-60 мкм. В результате работы должны быть получены готовые заготовки из композиционного порошка Ti-SiC методом селективного лазерного сплавления.</p>
-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

<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>	<p>1) Обзор литературы, научно-технологические основы синтеза металлокерамических композиционных материалов и их применения в аддитивном производстве, преимущества аддитивных технологий в качестве альтернативы традиционным технологиям, Разработка системы качества технологии селективного лазерного сплавления отечественных порошковых композиций, Построение модели управления качеством SLS, титановые сплавы.</p> <p>2) Объект и методы исследования, используемые материалы, сплав титана марки ВТ 1-0, карбид кремния (SiC), экспериментальное оборудование.</p> <p>3) Результаты исследования, получение образцов, анализ результатов, выводы.</p>
<p>Перечень графического материала <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i></p>	<p>Рентгенограммы фазовой структуры образцов</p>
<p>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы <i>(с указанием разделов)</i></p>	
<p>Раздел</p>	<p>Консультант</p>
<p><i>Финансовый менеджмент...</i></p>	<p>Спицына Л.Ю; доцент, ТПУ</p>
<p><i>Социальная ответственность</i></p>	<p>Романцов И.И; доцент, ТПУ</p>
<p><i>Приложение А (английский язык)</i></p>	<p>Зяблова Н.Н; доцент, ТПУ</p>
<p>Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках: Обзор литературы, объект и методы исследования, результаты исследования, финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение социальная ответственность.</p>	

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

Задание выдал руководитель / консультант (при наличии):

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ОМ ИШНПТ	Клименов В.А.	д.т.н.		
Младший научный сотрудник	Креницын М.Г.	аспирант		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4БМ83	Габитов Эльнур Каисарович		

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
 Уровень образования Магистратура
 Отделение школы (НОЦ) Отделение материаловедения
 Период выполнения (осенний / весенний семестр 2019 /2020 учебного года)

Форма представления работы:

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)
27.03.2020	<i>Литературный обзор</i>	15
24.04.2020	<i>Проведение исследований</i>	25
4.05.2020	<i>Выводы</i>	15
11.05.2020	<i>Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение</i>	10
18.05.2020	<i>Социальная ответственность</i>	10
25.05.2020	<i>Раздел ВКР на иностранном языке</i>	10
5.06.2020	<i>Обсуждение результатов, заключение</i>	15

СОСТАВИЛ:

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОМ ИШНПТ	Овечкин Б.Б.	к.т.н.		

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Младший научный сотрудник	Креницын М.Г	нет		

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель ООП

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ОМ ИШНПТ	Клименов В.А.	д.т.н.		

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

Студенту:

Группа	ФИО
4БМ83	Габитову Эльнуру Каисаровичу

Школа	ИШНПТ	Отделение школы (НОЦ)	ОМ
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	22.04.01 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>	<i>Научно-техническое исследование проводится в лаборатории физической мезомеханики и неразрушающих методов контроля ИФПМ СО РАН. Бюджет исследования – не более 2 100 000.руб., в т.ч. затраты на оплату труда – не более 123677 руб.</i>
2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	<i>В соответствии с ГОСТ 14.322-83 «Нормирование расхода материалов» и ГОСТ 31532-2012 «Энергосбережение. Энергетическая эффективность»; Минимальный размер оплаты труда в 2020 г. - 12 130 рублей. Значение интегрального показателя ресурсоэффективности – не менее 4 баллов из 5</i>
3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	<i>Отчисления во внебюджетные фонды – 27,1 %</i>

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. <i>Оценка коммерческого и инновационного потенциала НТИ</i>	- <i>Технико-экономическое обоснование научно-исследовательской работы;</i> - <i>Потенциальные потребители результатов исследования;</i> - <i>SWOT-анализ проекта</i>
2. <i>Планирование процесса управления НТИ: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок</i>	- <i>Планирование научно-исследовательского исследования (цели и результат исследования, перечень работ, определение трудоемкости работ, построение графика работ)</i> - <i>Бюджет проекта</i>
3. <i>Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности</i>	- <i>Оценка эффективности НТИ</i>

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

1. <i>«Портрет» потребителя результатов НТИ</i>
2. <i>Сегментирование рынка</i>
3. <i>Оценка конкурентоспособности технических решений</i>
4. <i>Диаграмма FAST</i>
5. <i>Матрица SWOT</i>
6. <i>График проведения и бюджет НТИ</i>
7. <i>Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НТИ</i>

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	2.03.2020
-------------------------------------------------------------	-----------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Спицына Любовь Юрьевна	к.э.н.		02.03.20

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4БМ83	Габитов Эльнур Каисарович		02.03.20

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»**

Студенту:

Группа 4БМ83	ФИО Габитов Эльнур Каисарович
------------------------	-----------------------------------------

Школа	ИШНПТ	Отделение (НОЦ)	ОМ
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	22.04.01 Материаловедение и технологии материалов

Тема ВКР:

Получение композиционных материалов «титан-карбид кремния» методом селективного лазерного сплавления	
Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:	
1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	<p>Объект исследования – образцы малолегированных трубных сталей.</p> <p>Рабочая зона – испытательная лаборатория с вытяжкой, сухое помещение с хорошими условиями освещения. Площадь отапливаемого помещения 42 м², наличие ПК и необходимого оборудования (разрывные машины, микроскоп, 3D установка BigRep STUDIO G2)</p> <p>Область применения – предприятия машиностроительной отрасли, научные институты.</p>
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	<p><i>Правовое обеспечение и организационные мероприятия согласно ГОСТ 12.4.299-2015 и ТК РФ от 30.12.2001 N 197-ФЗ: режим рабочего времени, отдыха, технического перерыва.</i></p> <p><i>Законодательные и нормативные документы по теме:</i></p> <ol style="list-style-type: none"> 1. СанПиН 2.2.4.3359-16. 2. ГОСТ 12.1.003-2014 3. СанПиН 2.2.4/2.1.8.055-96 4. СанПиН 2.2.4.548-96 5. СП 52.13330.2016 6. ГОСТ 12.1.005-88
2. Производственная безопасность: 2.1. Анализ выявленных вредных и опасных факторов 2.2. Обоснование мероприятий по снижению воздействия	<p><i>Исследование и основная работа ведется в помещении с нормальным уровнем освещения (люминесцентные лампы с суммарным уровнем освещенности не ниже 300 люкс в соответствии со СНиП 23-05-95). Возможен повышенный уровень шума при работе со шлифовальным станком. Меры по борьбе с шумами: правильная организация труда и отдыха; снижение и ослабление шума; применение звукопоглощающих преград; применение глушителей шума; применение средств индивидуальной защиты от шума. В связи с чем, эти работы проходят в специальных шумоизолированных помещениях, отделенных кирпичной перегородкой. Уровень воздействия шума и вибрации снижается за счет автоматизации процесса шлифовальной обработки металла</i></p> <p><i>При подготовке образцов для исследования микроструктуры в процессе шлифования и полирования могут выделяться металлические частицы. Вред несут различные химикаты, используемые при подготовке образцов при изучении их микроструктуры (различные травители). Для защиты от воздействия вредных веществ</i></p>

	<p>необходимо соблюдать гигиенические нормы по концентрации вредных веществ в воздухе рабочей зоны (ГОСТ 12.1.005-88)</p> <p>В соответствии с СанПиН 2.2.4.548–96 в помещении должен быть организован воздухообмен. Это осуществляется с помощью вентиляции. Для улучшения воздухообмена в помещении необходимо выполнить следующие технические и санитарно-гигиенические требования: общий объем притока воздуха в помещении должен соответствовать объему вытяжки; правильное размещение приточной и вытяжной вентиляции.</p> <p>По характеру физической нагрузки работа инженера-исследователя относится к разряду легких, но она сопряжена с большой умственной и нервно-психологической нагрузкой. Одним из факторов комфортности рабочей среды является организация рабочего места. Рабочее место должно соответствовать требованиям ГОСТ 12.2.032-78</p> <p>Для защиты от поражения электрическим током установлено защитное заземление (предельно допустимые уровни (ПДУ) напряжений и токов ГОСТ 12.1.038 – 82) и увлажнение окружающего воздуха.</p>
3. Экологическая безопасность	<p>Процесс получения композиционных материалов сопровождается выделением паров при сплавлении порошка. В целях охраны окружающей среды от загрязнений должны использоваться системы и устройства очистки промышленных выбросов. Должен быть установлен контроль за соблюдением выбросов в атмосферу в соответствии с ГОСТ 17.2.3.02-78. Утилизация ТБО, оргтехники, люминесцентных ламп выполняется в соответствии с: ГОСТ Р 57701-2017, ГОСТ Р 55102-2012, ГОСТ Р 52105-2003.</p>
4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях	<p>Наиболее актуальная ЧС – возникновение пожара; Рассмотреть профилактические мероприятия, требования к безопасности и меры по ликвидации последствий ЧС: - использование огнетушителей, силовых щитов для возможности мгновенного обесточивания</p>

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	02.03.2020
------------------------------------------------------	------------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент	Романцов Игорь Иванович	к.т.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4БМ83	Габитов Эльнур Каисарович		

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа состоит из 143 страниц, 23 рисунков, 38 таблиц, 43 источников, 1 приложения.

Ключевые слова: селективное лазерное сплавление, карбид кремния, титан, экспериментальное оборудование, исследовательское оборудование, результаты исследования.

Объектом исследования является порошковая смесь Ti-SiC с различным соотношением компонентов.

Целью работы является исследование влияния технологических параметров селективного лазерного сплавления на твердость, микро и макроструктуру образцов, полученных из порошковых смесей титана и карбида титана с различным соотношением компонентов.

Область применения: новый материал направлен на отечественный рынок, возможно его применение в машиностроительном комплексе относящемся к холдингу «Швабе». Материал обладает повышенной твердостью, что обуславливает его области применения.

Научная новизна исследования. Впервые исследованы объемные композиционные изделия, полученные из порошковой смеси Ti-SiC с различным соотношением компонентов, по технологии селективного лазерного сплавления. Получены многослойные образцы из смесей титана и карбида кремния с различным соотношением компонентов, проведены испытания твердости по Роквеллу (HRC), исследована микроструктура образцов.

ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ, СОКРАЩЕНИЯ, НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ

СЛС–селективное лазерное сплавление

SLM– Selective Laser Melting

EBM– Electron Beam Melting

АТ–аддитивные технологии

ММК–металлический матричный композит

ГМК–гибридный матричный композит

ОЦК–объемно-центрированная кубическая сингония

ГПУ– гексагональная плотноупакованная сингония

СО РАН– Сибирское отделение Российской академии наук

САПР– система автоматизированного проектирования

ПК–персональный компьютер

ИСР– иерархическая структура работ

ВКР–выпускная квалификационная работа

НТИ–научное техническое исследование

СНиП – строительные нормы и правила

ПДК– предельно допустимая концентрация

Оглавление

Введение.....	14
1 Научно-технологические основы синтеза металлокерамических композиционных материалов и их применения в аддитивном производстве	17
1.1 Преимущества аддитивных технологий в качестве альтернативы традиционным технологиям	21
1.2 Разработка системы качества технологии селективного лазерного сплавления отечественных порошковых композиций	23
1.3 Построение модели управления качеством селективного лазерного сплавления	26
1.4 Перспективы применения аддитивных технологий изготовления деталей и узлов из керамических композиционных материалов.....	29
1.5 Производство металлических матричных композитов: состояние дел..	31
1.6 Радиационно-стойкие технологии соединения для карбида кремния, керамики и композитов	33
1.7 Соединение на металлической основе.....	36
1.8 Соединение МАХ-фазы.....	37
1.9 Соединение SiC на основе полимеров	37
1.10 Титановые сплавы.....	38
2. Объект и методы исследования	41
2.1 Постановка цели и задач исследования.....	41
2.2 Используемые материалы	42
2.2.1 Сплав титана марки ВТ 1-0.....	42
2.2.2 Карбид кремния (SiC).....	46
2.2.3 Исходный материал	48
2.3 Экспериментальное оборудование.....	50
2.4 Исследовательское оборудование	56
3 Результаты исследования	62
3.1 Получение образцов.....	62
3.2 Общее сравнение структуры полученных образцов	73

4	Финансовый менеджмент ресурсоэффективность и ресурсосбережение....	77
4.1.1	Потенциальные потребители результатов исследования	77
4.1.2	Анализ конкурентных технических решений.....	79
4.1.3	FAST-анализ	80
4.1.4	Диаграмма Исикавы.....	84
4.1.5	SWOT-анализ.....	85
4.1.6	Оценка готовности проекта к коммерциализации.....	89
4.2	Инициация проекта	91
4.2.1	Цели и результат проекта.....	91
4.2.2	Организационная структура проекта	92
4.2.3	Ограничения и допущения проекта	93
4.3	Планирование и управление техническим проектом.....	94
4.3.1	Иерархическая структура работ проекта.....	94
4.4	План проекта.....	94
4.5	Бюджет научного исследования.....	96
4.5.1	Сырье, материалы, комплектующие изделия, покупные материалы и полуфабрикаты.....	97
4.5.2	Специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ	97
4.5.3	Основная заработная плата	98
4.5.4	Дополнительная заработная плата научно-производственного персонала	99
4.5.5	Отчисления на социальные нужды	99
4.5.6	Накладные расходы	100
4.5.7	Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования	101
4.6	Оценка эффективности НИИ.....	103
5	Социальная ответственность	104
5.1	Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	104
5.2	Производственная безопасность	104

5.3 Анализ вредных и опасных факторов, которые могут возникнуть в лаборатории при проведении исследований.....	106
5.3.1 Микроклимат.....	106
5.3.2 Превышение уровня шума.....	107
5.3.3 Вибрации.....	108
5.3.4 Недостаточная освещенность рабочей зоны.....	109
5.3.5 Использование вредных веществ.....	111
5.3.6 Психофизиологические факторы.....	113
5.3.7 Электробезопасность.....	114
5.3.8 Экологическая безопасность.....	116
5.3.9 Безопасность в чрезвычайных ситуациях.....	117
Выводы.....	120
Список литературы.....	121
Приложение А.....	126

Введение

На сегодняшний день перспективным является использование аддитивных технологий для производства высокотехнологичной продукции, из сложно обрабатываемых материалов и с применением новых конструктивных решений [1].

Одним из направлений аддитивных технологий является технология селективного лазерного сплавления (СЛС).

Селективное лазерное сплавление (Selective laser melting, SLM, СЛС) – один из новых методов аддитивного производства, использующий лазеры высокой мощности (как правило, иттербиевые волоконные лазеры) для создания трехмерных физических объектов за счет сплавления металлических порошков. Технология СЛС позволяет производить детали сложной формы, в короткие сроки, практически без использования технологической оснастки, за счет чего резко сокращается цикл производства изделий. В технологии СЛС используется лазер высокой мощности для расплавления тонкого слоя порошка в соответствии с 3D моделью [2].

В последнее время наблюдается значительный рост применения аддитивных технологий при производстве сложнопрофильных деталей из сложнообрабатываемых материалов.

Актуальной является задача по исследованию влияния основных технологических параметров, таких как мощность лазерного излучения и скорость сканирования на микроструктуру материала, его механические свойства и шероховатость. В дальнейшем эти исследования позволят получать детали с различными механическими свойствами, за счет разного структурного состояния [3].

На качество материала, получаемого методом СЛС, влияет большое количество факторов. Путем правильного понимания и управления этими факторами можно получать материалы по качеству, не уступающие материалам полученным традиционными способами производства [4]. Метод СЛС представляет собой сложный процесс, при котором большое число

параметров влияет на качество конечного продукта. Сложность процесса СЛС заключается во многих тепловых, физических и механических взаимодействиях и влиянии на них большого количества параметров.

Процесс селективного лазерного сплавления позволяет изготавливать детали с толщиной слоя от 20 до 100 мкм [5].

Процесс СЛС начинается с разбиения цифровой трехмерной САД модели на слои. Затем при помощи специального модуля, входящего в программное обеспечение MagicsRP, назначаются параметры построения детали (мощность лазерного излучения, скорость сканирования и т.д.). После этого все данные передаются в установку для начала процесса построения. Из бака, в котором содержится металлический порошок при помощи шнека исходный материал порционно подается в дозатор (рекоутер). Дозатор перемещаясь в горизонтальном направлении доставляет металлически порошок на платформу построения и при помощи силиконового ножа разравнивает его. Излишки металлического порошка попадают в передний и задний баки [6].

После того как слой порошка выравнен в работу вступает лазер и при помощи системы зеркал выборочно сплавляет металлический порошок. При воздействии лазерного излучения порошок нагревается, а при приложении необходимой энергии, плавится образуя жидкую ванну. Затем жидкая ванна быстро затвердевает тем самым образуя фрагмент детали. После того как селективное лазерное сканирование текущего слоя закончено, платформа построения при помощи поршня опускается по оси Z на величину слоя, и насыпается новый слой порошка.

Процесс является циклическим и повторяется до тех пор, пока изделие не будет полностью закончено, рисунок 1.

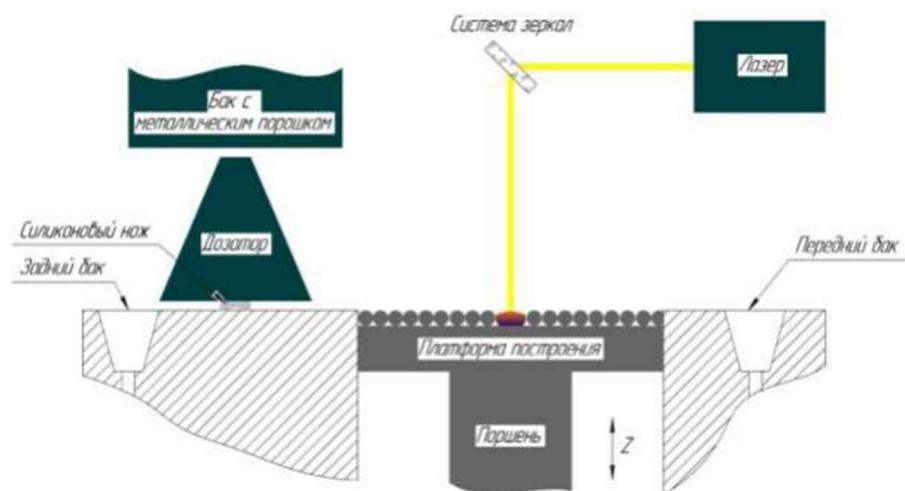


Рисунок 1 – Принципиальная схема технологии селективного лазерного сплавления

Процесс построения деталей происходит внутри герметичной камеры, в среде защитного газа (аргон).

Существует возможность предварительного нагрева платформы построения до температуры 180°C. В этом случае наблюдается более равномерное распределение температуры внутри камеры построения. Главными преимуществами объектов, созданных на 3D-принтерах SLS, являются их высокая детализация и повышенная прочность. Они практически не требуют постобработки. Дополнительным преимуществом технологии является возможность трехмерной печати без поддержки и дополнительных деталей [7].

У 3D-принтеров на базе SLS существуют огромные перспективы применения. Например, отсутствие материала поддержки обеспечивает безотходный процесс производства изделий. Высокая скорость работы принтеров обеспечивается тем, что при печати не нужно полностью расплавлять частицы расходного материала, что существенно увеличивает скорость работы. Наличие большой камеры построения позволяет выпускать партии изделий за одну сессию.

Таким образом, основными достоинствами 3D-принтеров на базе SLS являются:

- высочайшая производительность и качество печати;
- крупная область построения;
- изготовление готовых изделий;
- создание моделей без дополнительной поддержки.

В отличие от других технологий 3D-печати, технология SLS не расплавляет расходный материал полностью и не склеивает его, что увеличивает производительность. Оборудование для этого вида печати имеет крупную область построения, что очень удобно для мелкосерийного производства. Послойное порошковое спекание позволяет изготавливать цельные изделия без видимой послойности на них.

3D-принтеры SLS используют в таких сферах, как прототипирование, функциональное тестирование, мелкосерийное производство, а также их применяют в автомобилестроении и дизайне [8].

1 Научно-технологические основы синтеза металлокерамических композиционных материалов и их применения в аддитивном производстве

Опираясь на мировой опыт в развитии современных подходов физического материаловедения и новых технических решений необходимо признать, что изготовление узлов и отдельных деталей из новых конструкционных и функциональных материалов без развития аддитивных технологий (АТ) осуществить невозможно.

Полноценное внедрение аддитивных технологий в производственный процесс обеспечит революционный прорыв в промышленности. Другие производственные процессы требуют тщательного и подробного анализа геометрии изделий, чтобы определить последовательность операций и применяемых инструментов для их изготовления. Аддитивные технологии, прежде всего, позволяют с минимальными затратами реализовать любые

конструкторские и инженерные идеи в наукоёмких отраслях производства, таких, как авиастроение, двигателе- и моторостроение, ракетостроение, современные электронные приборы и др. [9].

Расширение номенклатуры стандартизированных материалов для аддитивных технологий будет способствовать их внедрению в массовое производство, что позволит в кратчайшие сроки вывести страну на новый технологический и экономический уровень.

В промышленности РФ идёт активное осмысление границ целесообразной применимости аддитивных технологий. Для освоения и внедрения АТ в производство необходимо проведение исследований и разработок российского оборудования и порошков. Российской промышленности необходимы справочники на получаемые по данной технологии свойства материалов. Между тем в многочисленных исследованиях отечественных и зарубежных авторов приводятся данные о свойствах материалов, полученных по аддитивным технологиям на металлической основе и керамической основе.

Разнообразие металлических порошковых материалов, используемых для АТ продолжает расширяться. В настоящее время существует около 29 металлов в виде порошков, в том числе нержавеющие стали, алюминиевые сплавы, инструментальные стали, сплавы на основе Co, Ni, Mo, Al, Cu, в достаточной степени изученных при получении изделий из них с применением аддитивных технологий.

Между тем, актуальным является создание порошковых материалов способных каким-то образом внести новый вклад в формирование свойств изделий. Совершенно очевидно, что это должен быть новый уровень эксплуатационных параметров материалов (прочность, твердость, износостойкость, работоспособность при повышенных температурах, высокая трещиностокость, устойчивость к многоцикловому нагружению и др.) [10].

Согласно классическим представлениям физики конденсированного состояния, структура определяет свойства материалов, т.е. новые свойства возможно получить каким-либо образом изменив структуру материала. В данном случае именно композиционные (гетерофазные) материалы позволяют получать параметры свойств, не достижимых на традиционных материалах. Для АТ это новое направление, которое позволит сформировать опережающий задел по комплексу свойств изделий и, соответственно, стратегических направлений развития промышленного комплекса.

В рамках настоящего исследования была поставлена цель - изучить возможность применения новых металлокерамических композиционных материалов в перспективной технологии прямого лазерного выращивания (ПЛВ) и наплавки, базирующейся на принципах гетерофазной лазерной порошковой металлургии. Технология ПЛВ дает возможность создания сложных деталей за один технологический процесс без применения дополнительного оборудования.

Технология ПЛВ основана на подведении материала непосредственно в точку воздействия лазерного излучения, где в данный момент происходит построение объекта. В этом заключается её отличие от метода селективного лазерного спекания (сплавления), где порошковый материал формирует слой, а затем происходит его облучение лазерным излучением в заданных зонах.

Оборудование для ПЛВ является универсальным и основано на принципе модульного построения. Оно позволяет изготавливать крупногабаритные детали, в том числе градиентной структуры, из нескольких материалов любой конфигурации и сложности без применения дополнительных устройств и оснастки [11].

Благодаря аддитивным технологиям можно значительно уменьшить время до начала проведения испытаний и для подтверждения некоторых рабочих характеристик перспективного изделия. Так же появляется возможность оперативно вносить и опробовать на испытаниях внесенные изменения. Аддитивная технология позволяет создавать внутренние полости

и каналы практически неограниченной сложности, что открывает новые конструкторские и технологические возможности. Основные направления аддитивных технологий, а также их преимущества и проблемы по отношению к традиционным технологиям, рисунок 2.



Рисунок 2 – Основные направления аддитивных технологий, преимущества и проблемы по отношению к традиционным технологиям

Наиболее близкими по возможностям формования изделия являются технологии шликерного литья (при малом давлении) и технология порошкового литья под давлением на специальных термопластавтоматах, так называемая РІМ технология, (порошковое литье при высоком давлении)

Недостатками этих технологий являются невозможность получения сложных форм внутренних полостей, ограничения по толщинам и формам поверхностей из-за неравномерности литья изделия в прессформу. Так же необходимость дорогостоящей и технически сложной литьевой формы. Большое количество связующего, необходимого для осуществления процесса литья так же приводит к значительному изменению форм и усадке заготовки на последующих технологических стадиях. По результатам обзора

зарубежной литературы, аддитивные технологии уже нашли свое применение в форсуночных элементах камеры сгорания и элементах соплового аппарата авиационного двигателя. Полученные результаты позволяют сделать вывод о перспективах применения разработанной технологии в авиадвигателестроении и необходимости ее дальнейшего развития и совершенствования [12].

1.1 Преимущества аддитивных технологий в качестве альтернативы традиционным технологиям

Все большее внимание привлекает возможность применения новых интеркерамоматричных и металлокерамоматричных композиционных материалов, создаваемых по технологиям порошковой металлургии, в авиационной технике.

Такие материалы способны выдерживать экстремальные нагрузки и температуры, более коррозионностойки и эрозионностойки. Новые материалы способны сохранять стабильность и точность геометрических размеров изделий при самых жестких рабочих режимах, обеспечивая надежность и предсказуемость характеристик изделия. До недавнего времени получение изделий из керамоматричных композиционных материалов сложной геометрии и с замкнутыми внутренними полостями являлось сложной, подчас невыполнимой задачей. Благодаря разработанной технологии стало возможным получение изделий сложной формы из керамоматричных композиционных материалов с высокой степенью точности в виде заготовки с минимальными припусками на механическую обработку или готового изделия сразу после спекания.

АТ действительно инновационный; это открывает новые возможности и предоставляет множество возможностей для компаний, стремящихся повысить эффективность производства. АТ значительно упрощает традиционные методы и может стать нормой в течение следующего

десятилетия. Согласно нескольким научным исследованиям, АТ является мощным инструментом для снижения сложности в цепочке поставок с помощью различных подходов.

У АТ есть пять ключевых преимуществ по сравнению с традиционным производством: стоимость, скорость, качество, инновации преобразования и влияние. АТ не заменит существующие традиционные методы производства. Однако ожидается, что она произведет революцию во многих нишевых областях. Ожидается, что экспоненциальный рост будет на горизонте. Экономия на стоимости и скорости была предсказана в литературе. Экономия производства для АТ с металлом в течение следующих 5 лет. Преимущества АТ по сравнению с традиционным производством также приведены в таблице 1 [13].

Таблица 1–Классификация преимуществ

Области применения	преимущества
Быстрое прототипирование	Сокращение времени выхода на рынок за счет ускорения создания прототипов. Сокращение затрат на разработку продукта. Повышение эффективности и конкурентоспособности компаний в области инноваций.
Изготовление запасных частей	Сократить время ремонта Сократить стоимость рабочей силы Избегать дорогостоящих складских помещений
Мелкосерийное производство	Небольшие партии можно производить с минимальными затратами. Исключить инвестиции в оснастку.
Индивидуальные уникальные предметы	Включить массовую настройку при низкой стоимости быстрого производства точных и специализированных запасных частей на месте Исключите штраф за ридизайн
Очень сложные рабочие предметы	Производить очень сложные заготовки по низкой цене
Станкостроение	Снижение затрат на рабочую силу. Избегайте дорогостоящих складов. Позволяет проводить массовую настройку при низких затратах.
Быстрое Производство	Непосредственное изготовление готовых компонентов. Относительно недорогое производство небольшого количества деталей.

Продолжение таблицы 1

Производство компонентов	Возможность массовой настройки при низких затратах. Улучшение качества. Сокращение цепочки поставок. Сокращение затрат на разработку. Помощь в устранении лишних деталей.
На месте и по требованию изготовления заказных запасных частей	Исключите хранение и транспортировка стоит экономить деньги за счет предотвращения простоев Снижение затрат на ремонт значительно укоротить цепь поставок Потребность в больших запасов снижается Разрешить жизненный цикл продукта рычагов
Быстрый ремонт	Значительное сокращение времени ремонта. Возможность отремонтировать отремонтированные компоненты в соответствии с последним дизайном

1.2 Разработка системы качества технологии селективного лазерного сплавления отечественных порошковых композиций

Процесс селективного лазерного сплавления (СЛС) частиц металлического порошка происходит при высокой температуре плавления. Из-за высокой температуры и быстрого охлаждения в слоях возникают остаточные напряжения, это приводит к искажению формы и геометрии деталей и отрицательно сказывается на производительности. Деформации, вызванные остаточными напряжениями растяжения, не только уменьшают геометрическую точность детали, но также влияют на функциональные характеристики выращенных деталей.

В результате исследований установлено, что при остаточных напряжениях сжатия предел выносливости деталей повышается, а при остаточных напряжениях растяжения – снижается. Исправление искажения формы детали осуществляется за счет постобработки, которая увеличивает стоимость изготовления. На сегодняшний день выявлено, что на формируемое качество изделия оказывают влияние такие технологические параметры процесса СЛС, как мощность лазерного излучения, скорость сканирования слоя лазерным лучом.

Сложность процесса СЛС заключается во взаимодействиях тепловых, физических и механических процессов и влияния на них большого количества параметров технологической и производственной системы. Поэтому для управления параметрами качества изготавливаемого изделия недостаточно исследовать влияние только основных режимных параметров процесса селективного лазерного сплавления, необходимо анализировать совокупность факторов: свойства материала, технические характеристики машины, условия печати и параметры процесса. Под качеством аддитивного процесса авторами понимается совокупность формируемых параметров изделия: микроструктура материала, механические свойства и шероховатость.

Так, при анализе работы оборудования необходимо учитывать тип установки (технология, технические характеристики, комплектация), систему применяемого контроля, условия и частоту предупреждающего ремонта, параметры обслуживания и калибровки. Для обеспечения требуемого уровня качества в отношении оборудования должны быть выполнены следующие обязательства: – вести журнал для любого производственного оборудования производственной цепочки, где регистрируются и контролируются операции, причины и даты останова печати, отмечены процессы удаления порошка и материала поддержки, очистки камеры; – выполняйте периодическое техническое обслуживание и проверку лазерной, оптической систем, контроль температуры, подачу инертного газа, замену изнашиваемых деталей (фильтр, скребок).

Для калибровки установки следует изготавливать эталонную деталь или образец (каждый месяц), по которому оценивать такие характеристики, как вес, плотность, геометрическая точность, шероховатость, смещение луча, соответствие допусков. В таблице 3 представлены рекомендуемые мероприятия для оборудования, обеспечивающие качество

Таблица 2 – Обеспечивающее качество мероприятия, проводимые для оборудования

Действие	Документация	Комментарии	Частота
Вести журнал учета времени работы оборудования	Отражать время работы оборудования, ремонта, остановки и поломки (и причины), смены порошка	Вести журнал для каждого оборудования технологического процесса	По мере осуществления печати (работы)
Поддерживать постоянную чистоту, проверять стекло камеры после каждого процесса печати	Каждое действие отражается в журнале учета рабочего времени в столбце «Уборка»	Придерживаться инструкции, поставленной поставщиком оборудования	Ежедневно
Поддерживать оборудование в рабочем состоянии (периодически проводить сервисный осмотр)	Проверять лазер, оптическую систему, датчики температуры, подачу инертного газа, замену изношенных частей (фильтр, скребок)	Сервисный осмотр осуществляется специалистом, представителем поставщика оборудования Р	Раз в три месяца
Поддерживать производительность системы (осуществлять контрольную печать)	Проводить контрольную печать и отражать следующую информацию: вес (плотность) контрольной детали, точность, шероховатость, деформации и отклонения формы	Контрольные детали должны храниться все время использования оборудования	Раз в месяц

В технологии селективного лазерного сплавления важно проверять качество исходного порошкового материала, причем немаловажным является качество смешанного порошка, нового и уже используемого в емкостях. Входной контроль порошка можно осуществлять с помощью дифференциальной сканирующей калориметрии. В качестве исходных параметров порошка следует принимать: средний размер частиц, температура плавления, рекристаллизации, плотность, сыпучесть. В таблице

3 приведены обеспечивающие качество деталей мероприятия для материалов, применяемых в технологии селективного лазерного сплавления.

Таблица 3. – Рекомендуемые мероприятия для материалов, обеспечивающие качество

Действие	Документация	Комментари
Вести журнал учета поставки и расхода материала	Заполнять документацию о постановке на учет и выдачу в производство материала	Желательно также в документации отражать данные по сыпучести
Соблюдать и проверять срок и дату поставки материалю	Информация, которая должна быть отражена в документации на новый порошок: плотность, температура плавления, рекристаллизации, гранулометрический и химический состав, размер фракции	

Порошок, который уже используется в производстве, также должен подвергаться контролю, особенно в случае его смешения с порошком из новой партии. В документах следует отражать: количество смешанного порошка, его состав, сведения о партии, время и период просеивания. В таблице 3 указаны мероприятия для обеспечения качества процесса для уже используемого порошка [14].

1.3 Построение модели управления качеством селективного лазерного сплавления

Для формализации влияния факторов аддитивного производства на параметры качества была построена модель управления и прогнозирования параметров качества получаемого изделия. Наиболее существенное влияние на структуру и свойства синтезируемых деталей оказывает процесс селективного лазерного сплавления.

Параметры технологического процесса можно разделить на 2 вида: параметры, которыми управляет оператор установки, – входные параметры, и параметры, определяемые функциональным назначением детали, например, выбор титанового порошка для медицинского применения, - параметры граничных условий. Входными параметрами служат значения атмосферы – защитной среды (уровень содержания кислорода в камере построения), осаждения/сплавления порошка (толщина слоя), сканирования (мощность лазера, фокус, скорость). Параметрами граничных условий могут быть свойства материалов, требования получаемой геометрии, а также параметры установки, например, тип лазера. Входные параметры напрямую влияют на процесс сплавления частиц порошка, например при увеличении толщины слоя изменяются размеры бассейна расплава и плотность синтезируемого материала уменьшается, или при увеличении содержания кислорода в камере построения синтезируемый материал становится более хрупким, рисунок 3.



Рисунок 3 – Система управления качеством СЛС

Комбинирование параметров приводит к изменению характеристик бассейна расплава. Так повышение содержания кислорода приводит к удлинению бассейна расплава. Для создания надежной системы управления качеством недостаточно контролировать и осуществлять мониторинг технологического процесса, необходимо контролировать входные

параметры, определяющие соответствующее поведение селективного лазерного сплавления. При этом необходимо определить влияние входных параметров на характеристики процесса.

Обычно, мониторинг технологического процесса осуществляется с использованием алгоритмов управления режимными параметрами (мощность лазера и скорость сканирования). Из рисунка 4 видно, что система управления качеством основывается на алгоритме управления режимными параметрами. На данный момент актуальным остается вопрос прогнозирования параметров СЛС на основе распределения температуры, остаточного напряжения и деформаций. Полученные экспериментальным путем значения параметров качества при различных комбинациях входных параметров и граничных условий являются основой для базы знаний цифровой модели управления качеством аддитивных процессов производства, рисунок 4.



Рисунок 4 – Механизм взаимодействия параметров производственной системы и качества

Таким образом, для определения влияния факторов аддитивного производства на параметры качества необходима цифровая модель

моделирования процесса селективного лазерного сплавления и прогнозирования получаемых параметров качества.

Создаваемая система качества селективного лазерного сплавления отечественных порошковых композиций включает подсистему организационно-технических методов управления качеством и цифровую модель прогнозирования параметров качества. Данная система реализована в лаборатории аддитивных технологий Самарского университета. Дальнейшие работы направлены на разработку модели прогнозирования и оценки коэффициента (параметра) качества при различных технологических параметрах процесса формообразования. Определенный с помощью модели коэффициент сравнивается с экспериментальными данными. Предлагаемый подход должен включать не только прогнозирование параметров качества в зависимости от режимных параметров, но и определение технологических параметров, в том числе и методов формообразования, в условиях заданных параметров качества [15].

1.4 Перспективы применения аддитивных технологий изготовления деталей и узлов из керамических композиционных материалов

Анализ тенденций развития аддитивного производства в авиационной промышленности Евросоюза и США по внедрению методов 3D печати в промышленное производство в целях повышения его эффективности, сокращения сроков вывода аэрокосмической продукции на рынок и снижения эксплуатационных расходов позволил оценить уровень достигнутых успехов зарубежных стран в применении аддитивных технологий в гражданском и военном авиастроении.

По данным ведущих зарубежных экспертов, большинство крупных авиа- и двигателестроительных компаний, таких как Airbus, Boeing, GE, Rolls-Royce, Honeywell, Pratt&Whitney, создали собственную инфраструктуру, необходимую для внедрения в промышленное производство

технологий 3D печати. Авиационная промышленность Евросоюза в целом также прошла начальный этап доведения технологии аддитивного производства до уровня промышленного производства, включая сертификацию ряда «напечатанных» комплектующих. Примером является успешное применение более 1000 мелкогабаритных изделий, изготовленных методом 3D печати в самолете типа A350.

Анализ состояния применения аддитивного производства в авиастроительной отрасли показывает, что в первую очередь основные усилия ее разработчиков и потребителей сосредоточены на совершенствовании технологий производства и ремонта изделий и быстром прототипировании. Производство комплектующих с использованием аддитивных технологий сосредоточено на следующих основных направлениях:

- производство вспомогательных элементов конструкции летательных аппаратов;
- изготовление компонентов авиационных двигателей;
- производство основных силовых элементов конструкции и их компонентов [16].

В настоящее время специалистов авиационной отрасли все больше привлекает возможность применения новых интеркерамоматричных композиционных материалов, создаваемых по технологиям порошковой металлургии, в авиационной технике. Такие материалы способны выдерживать экстремальные нагрузки и температуры, более коррозионностойки и эрозионностойки.

Основным сдерживающим фактором является недостаточный объем данных о физико-механических свойствах данных материалов, отношение прочностных характеристик изделий, созданных из данных материалов, по отношению к полученным классическими методами изготовления (прессованием).

В настоящем докладе представлены данные о проведенных исследованиях прочностных свойств интерметаллокерамоматричных композиционных материалов, использованных при изготовлении экспериментальных образцов методом 3D послойного отверждения [17].

1.5 Производство металлических матричных композитов: состояние дел

ММС могут быть разработаны в соответствии с требованиями различных промышленных применений путем сочетания подходящих компонентов и демонстрируют исключительные свойства, которые трудно продемонстрировать при использовании монолитных материалов. ГМК, армированные различными керамическими частицами, демонстрируют улучшенные механические и трибологические свойства по сравнению с чисто металлической матрицей и более улучшены при увеличении содержания армирования. Легкий ковкий алюминий является наиболее предпочтительным материалом матрицы. Гибридные композиты обладали лучшими свойствами, чем чистая металлическая матрица и монокомпозиции [18].

Способ изготовления играет важную роль в разработке композиционных материалов с улучшенными свойствами. Среди всех рассмотренных технологий изготовления ГМК метод литья с перемешиванием является очень простым, наименее дорогим и может использоваться для массового изготовления ГМК. Выдавливание отлитых под давлением ММС может увеличить межфазное соединение и распределение армирования. Предварительный нагрев упрочняющих частиц перед диспергированием и использование флюса может решить проблемы смачиваемости упрочняющих частиц расплавленной матрицей.

Агломерация происходит, когда частицы плавают на расплавленном металле из-за разницы в плотности, чего можно избежать путем

двухстадийного добавления упрочняющих частиц. Увеличенная площадь поверхности наноразмерных упрочняющих частиц делает проблемы смачиваемости и распределения частиц более сложными. Ультразвуковая обработка помогает диспергировать частицы с хорошим сцеплением матрицы с армированием. Процесс композитного литья обеспечивает лучшую смачиваемость в арматуре и матрице, хорошее распределение частиц и препятствует химическим реакциям между расплавленной матрицей и арматурой [19].

ГМК, изготовленные методом литья под давлением, достигли лучших свойств, чем литье с перемешиванием; даже монокомпозит с отжигом обладает улучшенными свойствами по сравнению с гибридными композитами. Быстрое затвердевание в процессе термического напыления препятствует сегрегации. Метод инфильтрации может обеспечить хорошую смачиваемость и ограничить избыточные межфазные реакции.

Ограничения обработки ММС в жидком состоянии можно преодолеть путем обработки в твердом состоянии ниже температуры плавления матрицы. Порошковая металлургия является одним из наиболее предпочтительных и адаптируемых методов производства ГМК. Порошковая металлургия подтверждает более однородную микроструктуру, высокую прочность, точность размеров, минимальные потери лома и меньше операций обработки по сравнению с другими методами [20].

ГМК, полученные методом спекания с искровой плазмой, испытывали высокую скорость нагрева с меньшим временем спекания и демонстрировали лучшие свойства материала. Процесс холодного распыления - это метод твердотельного распыления, а армирующие порошки не расплавляются, в отличие от термического распыления. Процесс диффузионного связывания широкодиапазонных металлических матриц с контролируемой ориентацией волокон и объемной долей. Лазерный метод инъекции частиц расплава, используемый для получения поверхностных металлических матричных композитов. В результате межфазной реакции в матрице и армировании

образуются вредные фазы при высокотемпературной жидкофазной обработке.

Твердотельная технология FSP функционирует при температуре плавления субстрата и создает проблемы межфазной реакции при жидкофазной обработке. Техника *in-situ* обеспечивает хорошую смачиваемость, равномерное распределение армирования и потенциально низкую стоимость, что делает ее более выгодной по сравнению с техникой *ex-situ* при изготовлении ММС.

Тип армирования, размер, объемная доля, гибридная арматура и тип матричного материала также играют важную роль в развитии композитных материалов. Совместимость матрицы с армированием является обязательной при изготовлении ММС. Все комбинации матрицы и усиления не могут быть легко обработаны. Образование нежелательных фаз, агломерация частиц и низкая смачиваемость являются ключевыми проблемами при изготовлении ММС. Исследователи должны сосредоточиться на экономичных методах изготовления и материалах наряду с методами модификации поверхности [21].

1.6 Радиационно-стойкие технологии соединения для карбида кремния, керамики и композитов

Использование композитов карбида кремния (SiC) в ядерно-энергетических приложениях, в первую очередь в структурных элементах термоядерного реактора или оболочек топливных элементов легководного реактора (LWR) и компонентов активной зоны, получило повышенное внимание в последнее десятилетие и обсуждалась как острая необходимость для таких устройств как термоядерные реакторы [22].

Такие как европейская конструкция TAURO, американские конструкции ARIES-AT и ARIES-ACT и Японская DREAM начали полномасштабно внедрять SiC в детали своих установок. Рисунок 5 дает

схематическое представление конструкции TAURO, по существу состоящей из вложенных пластин, изготовленных из SiC-композита, которые образуют простую коробчатую конструкцию, в которой первая стенка и внутренние поверхности одеяла отдельно охлаждаются Pb-17Li. Концепция ARIES-AT имеет аналогичную конструкцию, опять же с использованием SiC-композита и охлаждающей жидкости Pb-17Li, в довольно простой геометрии для простоты изготовления и соединения.

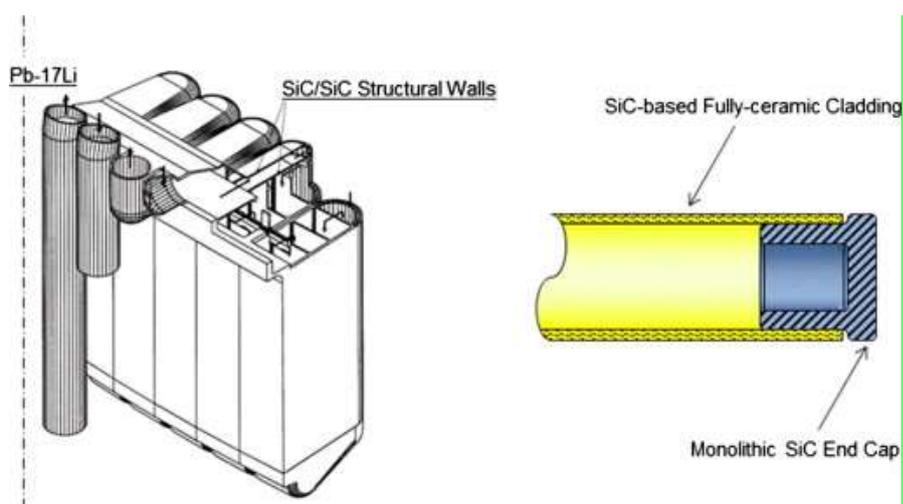


Рисунок 5. – Концептуальная схема конструкции одеяла TAURO (слева) и концевой заглушки полностью керамического топливного стержня LWR (справа).

Для операций с делением энергии обсуждаются два общих типа конструкции, использующих SiC-композиты для LWR-оболочки: полностью керамическая SiC-оболочка и керамическая металлическая оболочка. Для полностью керамического покрытия используется некоторая комбинация волокнистого композита для достижения стойкости к разрушению и высокотемпературных характеристик с одним или несколькими слоями монолитной керамики SiC, используемой для герметизации пористого композита и микротрещины. Используя металлическую керамическую конструкцию, герметизация достигается либо внутренним металлическим пузырем (вкладышем), либо внешним металлическим уплотнением. Для

полностью керамической системы требуется торцевое уплотнение, что является критически важной технологической разработкой, все еще ожидающей решения [23].

Как указывалось ранее, возможность соединения SiC с самим собой или другими материалами является критической, неразрешенной технологической потребностью в применении керамики и композитов SiC в ядерных системах. Это противоречит возможности присоединения SiC или SiC / SiC для неядерных приложений, что может быть достигнуто надежным и надежным способом с помощью ряда традиционных и передовых технологий.

Набор номинально общепринятых методик, который был успешно продемонстрирован, включает в себя соединение предварительно керамических полимеров, стеклокерамику, реакционную связь, полимерные активные металлы / прекерамики и твердофазные реакции вытеснения активного металла. Ключевой вопрос заключается в том, что методы, изученные до настоящего времени, и ограниченные данные, доступные по облучению соединений и материалов, из которых изготовлены эти соединения, продемонстрировали плохую стабильность при облучении [24].

Как обсуждалось ранее, надежная технология соединения для SiC еще предстоит разработать для ядерных применений. Вот почему конструкции механических компонентов для краткосрочного применения (например, гильзы управляющих стержней для высокотемпературных газоохлаждаемых реакторов) полностью исключают проблему соединения, предпочитая вместо этого использовать механические соединения. Однако этот вариант невозможен для систем термоядерного покрытия, которые требуют герметичности для PbLi или в некоторых случаях гелия, или в случае плакирования LWR, поскольку герметичность (удержание продуктов деления и гелия) является функциональным требованием [25].

Другая проблема, связанная с соединением SiC, заключается в отсутствии общепринятого стандартного метода испытаний: надежный тест,

не слишком сложный и / или дорогой в изготовлении и способный обеспечить воспроизводимую прочность на сдвиг, все еще недоступен . Дополнительной проблемой для ядерных применений является использование миниатюрных образцов, необходимых для испытаний облученных образцов. Кручение твердых образцов, по-видимому, является подходящим методом испытаний на сдвиговые свойства после облучения соединений материалов на основе SiC . Оптимизация размера и геометрии крутильных образцов была проведена совместными усилиями Национальной лаборатории Ок-Риджа (США), Киотского университета (Япония) и Политехнического университета Турина (Италия). Основываясь на этой разработке, в этой работе представлено надежное сравнение различных соединений до и после нейтронного облучения [26].

1.7 Соединение на металлической основе

Реакция образования SiC, другой метод формирования материала на основе SiC для присоединения к SiC, чаще всего достигается прямой реакцией кремния и углерода. Типичный технический подход состоит в том, чтобы нагреть предварительно смешанную формулу соединения до температуры чуть выше точки плавления кремния. Во время этого процесса объемное расширение после превращения углерода в SiC постепенно микротрещины уже сформировавшегося SiC, позволяя капиллярной силе продвигать расплавленный кремний дальше в непрореагировавшие области, пока углеродистый предшественник не будет полностью израсходован. Следовательно, полученные микроструктуры соединений состоят из двух отдельных фаз, а именно кристаллического и стехиометрического SiC и непрореагировавшего металлического кремния. Объемная доля непрореагировавшего кремния может быть уменьшена до ~ 10%, когда процесс оптимизирован для снижения содержания кремния в конечном продукте [27].

1.8 Соединение МАХ-фазы

Известно, что некоторые керамики с МАХ-фазой, в том числе $Ti_3 SiC_2$, обладают высокотемпературной прочностью, псевдопластичностью или устойчивостью к повреждениям, а также устойчивостью к окислению. МАХ-фаза соединения $Ti_3 SiC_2$ SiC и SiC-композита может быть достигнута несколькими путями. Твердотельное диффузионное соединение SiC с использованием титановой вставки приводит к образованию фазы $Ti_3 SiC_2$ при определенных условиях обработки. Недавнее исследование в Ок-Риджской национальной лаборатории (ORNL) подтвердило, что с помощью этого метода можно получить почти однофазное соединение $Ti_3 SiC_2$, Донг и соавт. сообщили об успешном соединении SiC горячим прессованием с использованием предварительно синтезированного порошка $Ti_3 SiC_2$ в качестве связующего соединения [28].

1.9 Соединение SiC на основе полимеров

Предкерамические полимеры, такие как поликарбосиланы и полисилоксаны, с инертными и химически активными наполнителями используются в технологиях соединения SiC и имеют адекватные характеристики в качестве соединений с умеренная сила Поликарбосилан, который превращается в SiC, требует высокотемпературной обработки и инертного обращения, в то время как полисилоксаны, которые превращаются в Si-O-Si, могут подвергаться пиролизу при более низких температурах и могут обрабатываться на воздухе. Соединения, изготовленные из таких материалов, имеют прочность от 5 до 30 МПа при испытании на сдвиг.

Известной проблемой, связанной с предшествующими керамическими полимерами, является потеря массы, которая может превышать 50% при превращении в керамическую фазу. Несколько иной подход использует линейную цепь полигидридометилсилоксана (PHMS) в качестве

предшественника полисилоксана с высокой степенью сшивки, применяя подход каталитической химии, разработанный в SRI International, который имеет преимущество гораздо меньшей потери массы при конверсии керамики по сравнению с другими систем, и пиролиз происходит при температурах до ~ 600 С. Полимер PHMS превращается в оксикарбид кремния, что может быть недостатком с точки зрения прочности на ползучесть и коррозионной стойкости в зависимости от структуры и количества свободного углерода [29].

1.10 Титановые сплавы

Стимулом для разработки титановых сплавов с 1948 года изначально был аэрокосмический сектор, когда возникла острая необходимость в новых материалах с более высоким отношением прочности к массе при повышенных температурах. Как упомянуто в главе 1, высокая температура плавления титана (1668 ° С, на 138 ° С выше, чем у железа) была принята в качестве убедительного свидетельства того, что титановые сплавы будут демонстрировать хорошую прочность на ползучесть в широком диапазоне температур. Хотя последующие исследования показали, что этот температурный диапазон был уже, чем ожидалось, в настоящее время титановые сплавы занимают критическое место в инвентаризации материалов аэрокосмической промышленности и около 40% титана используется таким образом во всем мире [30].

Другим важным свойством титановых сплавов является их превосходное сопротивление коррозии, особенно в агрессивных средах, которые содержат хлорид-ионы. Следовательно, они нашли важное применение в химической обработке, судостроении, фармацевтическом производстве и многих других отраслях промышленности. Кроме того, протезы из титанового сплава сегодня широко используются для имплантации в организм человека благодаря их превосходной

биосовместимости и биокоррозии.сопротивление в жидкостях организма вместе с их относительно низким модулем Юнга. В этой главе речь пойдет о титановых сплавах для этих применений и сосредоточится на деформируемых титановых сплавах, на которые в настоящее время приходится более 95% использования титана.

Титан обладает рядом особенностей, которые отличают его от других легких металлов и делают его физическую металлургию сложной и интересной [31].

1.

При 882,5 ° С чистый титан претерпевает аллотропное превращение из гексагональной плотноупакованной (ГПУ) структуры (α) в объемно-центрированную кубическую (ОЦК) фазу (β), которая остается стабильной вплоть до температуры плавления. Температура превращения изменяется с добавлением легирующих элементов.

2.

Титан является переходным металлом с неполной оболочкой в электронной структуре, что позволяет ему образовывать твердые растворы с большинством замещающих элементов, имеющих размерный коэффициент в пределах $\pm 20\%$. Также из-за его электронной конфигурации ($3d^2 4s^2$) титан является парамагнитным, поскольку только некоторые спины его неспаренных 3d электронов будут ориентированы внешним полем.

3.

Титан и его сплавы реагируют со всеми элементами внедрения , включая кислород, азот и водород, в широком диапазоне температур, и растворимость этих элементов внедрения может быть существенной. Например, титан может растворяться до 14,25% О при 600 ° С и 7,6% Н при 1083 ° С, что редко происходит с другими металлами. Следовательно, оксидная пленка или оболочка растворяется в нижней титановой матрице при повышении температуры.

4.

В своих реакциях с другими элементами титан может образовывать твердые растворы и соединения с металлической, ковалентной или ионной связью. При высоких температурах только два твердых материала, иттрий и молибден, не реагируют или не реагируют очень медленно с титаном. Это затрудняет поиск подходящего тигельного материала для плавки титана и его сплавов и для обращения с ними в расплавленном состоянии [32].

2. Объект и методы исследования

2.1 Постановка цели и задач исследования

Из приведенного литературного обзора можно сделать вывод, что титан и его сплавы активно используются в аддитивных технологиях и являются перспективными материалами, несмотря на их достаточную изученность. Использование композиционных материалов в аддитивных технологиях недостаточно развито на сегодняшний день, в том числе в связи с технической сложностью работы с композиционными материалами и порошковыми смесями. Первым шагом на внедрении композитов в аддитивные технологии является проведение научно-исследовательских работ, включающих подбор режимов, оценка оптимальности выбранных режимов по различным параметрам, а также аттестация структуры и свойств полученных материалов.

В связи с этим была сформулирована цель данной работы:

Исследование влияния технологических параметров селективного лазерного сплавления на твердость, микро- и макроструктуру образцов, полученных из порошковых смесей титана и карбида титана с различным соотношением компонентов.

Для достижения данной цели были поставлены следующие задачи:

- 1) Сформировать многослойные образцы из смесей титана и карбида кремния с различным соотношением компонентов, используя широкую сетку режимов, с последующей оценкой качества поверхности полученных образцов.
- 2) Измерить твердость получаемых образцов и выявить возможные тенденции ее изменения в зависимости от различных параметров.
- 3) Проследить изменения фазового состава в образцах в результате взаимодействия карбида кремния и титана в процессе SLS

2.2 Используемые материалы

Титан является одним из наиболее популярных материалов для 3D печати и в производстве, особенно в аэрокосмической и медицинских приложениях. Он объединяет легкость алюминия с прочностью стали, при этом являясь не токсичным. Однако этим преимуществам противостоит относительно высокая стоимость титана. Поэтому снижение отходов делает АП привлекательным вариантом для получения титановых деталей.

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

В нашем случае сплавление титана выполнялось методом (SLS) [33].

2.2.1 Сплав титана марки ВТ 1-0

В данной диссертационной работе исходными материалами являются: Титан марки ВТ 1-0 и карбид кремния (SiC).

Титановая продукция имеет определенную характеристику и указывает на химический состав металла с порядковым номером 22 и атомным весом 47,88. К техническому титану относится марка ВТ1-0, имеющая серебристо-белый оттенок с удельной плотностью в 4,32 г/см³. Данный металл обладает довольно большой легкостью, высокой плотностью, превосходной стойкостью к коррозии с незначительным изменением коэффициента теплового расширения.

Основным преимуществом титана является прочность к коррозии и его легкость. Благодаря этим характеристикам, титановый сплав стал незаменим при строительстве кораблей, ракет и самолетов. Для его получения из руды

применяется самая совершенная технология, благодаря которой лишь в 50-м году наладилось производство титана. По причине этого, данный металл считается редким.

Таблица 4 – Химический состав в % материала ВТ1-0

Fe	C	Si	N	Ti	O	H	Примесей
до 0.25	до 0.07	до 0.1	до 0.04	99.24 - 99.7	до 0.2	до 0.01	прочих 0.3

Таблица 5. – Физические свойства материала ВТ1-0

T	E 10 ⁻⁵	a 10 ⁶	l	г	C	R 10 ⁹
Град	МПа	1/Град	Вт/(м·град)	кг/м ³	Дж/(кг·град)	Ом·м
20	1.12		18.85	4505	540	
100		8.2				

Преимущества:

- Металл имеет плотность равную 4505 кг на метр кубический. То есть вес одного кубического метра металла будет составлять всего 4,5 тонны! Это практически в два раза меньше веса аналогичного объема металла из нержавеющей стали! Для сравнения, плотность самой востребованной марки нержавеющей стали 12Х18Н10Т составляет 7920 кг/м³.

- Титан ВТ1-0 обладает высокой прочностью, но при этом является пластичным и вязким. Однако невысокая тепловая прочность делают его менее пригодным для авиационной промышленности, чем специальные сплавы, разработанные именно для этих целей.

- Обладает невысоким коэффициентом теплового расширения. Проще говоря, несильно расширяется и несильно сжимается при воздействии жара и холода. Это свойство значительно снижает степень износа изделий.

- Металл обладает отличной химической устойчивостью и сопротивляемостью к агрессивным средам. Устойчив к окислению благодаря тому, что на поверхности образуется прочная оксидная пленка, которая препятствует глубокому окислению. Устойчив к кислотам и хлору! Среди

всех других, трубы из этого металла лучше всего подходят для транспортировке жидкого хлора.

- Металл имеет высокую температуру плавления: порядка 1668 градусов Цельсия. Это обеспечивает возможность его применения в условиях очень высоких температур.
- Не реагирует на магнитные поля и не намагничивается. При этом не выталкивается из поля, как например медь. Замечательное свойство для приборостроения.

Недостатки:

- Чистый металл с малым количеством посторонних примесей научились добывать сравнительно недавно. Для этого используют самые передовые технологии, и это не могло не сказаться на цене.
- Кроме этого, металл очень твердый и для его обработки также необходимы относительно более серьезные затраты энергии и соответствующее оборудование.
- При плавке металл становится очень активным и начинает вступать в соединения с различными газами в атмосфере. По этой причине плавить его приходится в вакууме или в специальной инертной среде.

Все указанные недостатки прямым образом влияют на стоимость итоговых изделий металлопроката. Именно высокая цена является тем фактором, который мешает повсеместной замене изделий из нержавеющей стали на титановые VT1. Его очень сложно добывать, плавить и обрабатывать.

Аналоги марки VT1-0:

- В Соединенных Штатах Америки аналогом является Grade 2
- В Германии - DIN 7034, DIN 3.7035, DIN Ti2
- В Японии - JIS CI2
- Во Франции - AFNOR T-40

- В Англии -IMI125

Порошок титановый удовлетворяет различные требования к сырью для производства деталей и элементов путем спекания, литья под давлением и распылительной штамповки.

Полученные детали обладают отличными техническими и механическими свойствами. Основными из них являются:

- небольшой вес;
- большой запас прочности;
- пластичность и жаропрочность;
- устойчивость к коррозионным процессам.

Изделия из титана отличаются износостойкостью, отсутствием ферромагнитных свойств, устойчивостью к воздействию высоких и низких температур. Биологическая нейтральность, долговечность и превосходные прочностные качества позволяют использовать порошок из титана и его сплавов в медицинской отрасли для создания имплантов и протезов [34].

Преимуществом использования металлических порошков является высокая экономичности и производительность при создании изделий со сложным профилем и внутренними полостями, а также возможность восстановления геометрических параметров детали при сильном износе. Топологическая оптимизация позволяет снизить массу изделий и свести к минимуму процент отходов. Детали и элементы из титанового порошка изготавливаются путем:

- лазерного сплавления;
- изостатического прессования;
- сплавления электронно-лучевой пушкой.

Селективно-лазерное сплавление применяется для изготовления изделий любой сложности по компьютерной модели. Основные этапы создания деталей:

- нанесение на платформу слоя титанового порошка необходимой толщины;
- расплавление лазерным лучем частиц металла на определенных участках согласно трехмерному макету;
- после опускания платформы на высоту слоя процесс повторяется до окончательного формирования модели.

После окончания работы установки несплавленный порошок удаляется. Эта технология позволяет изготавливать изделия с тонкими стенками, перегородками, нависающими участками. Детали из титанового порошка обладают твердостью, плотностью и однородностью материала. Стоит отметить и высокую точность изготовления. Все технологические процессы автоматизированы, что гарантирует идеальную геометрию изделия и точное соответствие заданным параметрам [35].

Металлический порошок, изготовленный из технического титана VT1-0 и других сплавов, применяется для защиты деталей машин и промышленного оборудования, работающего в сложных эксплуатационных условиях — воздействию серьезных механических нагрузок, абразивных веществ и высоких температур. Основные сферы применения напыления титановыми порошками — электротехническая отрасль, приборостроение, машиностроение, авиастроение, атомная энергетика, горнодобывающая промышленность [36].

2.2.2 Карбид кремния (SiC)

При химическом взаимодействии кремния и углерода получается вещество с высокой степенью электрической и механической прочности и достаточным уровнем теплопроводности – SiC карбид кремния. Кристаллы беспримесного соединения бесцветные. В природе соединение встречается редко и в небольших количествах. При добавлении определенного количества железа меняется цвет и физико-химические характеристики. При

промышленном производстве используются электропечи, где углеродом восстанавливается двуокись кремния .

К преимуществам изделий из карбида кремния следует отнести:

- большой уровень твердости, который достигает величины 92 единиц по Роквеллу;
- прочностной предел на изгиб до 350 и на сжатие 2300 МегаПаскалей;
- не подверженность короблению, разбуханию и сохранение стабильности геометрических параметров под воздействием высоких температур и агрессивных сред;
- повышенная термическая и коррозионная стойкость;
- длительный эксплуатационный срок.

Особенности SiC создают высокий потенциал для новых сфер применения этого материала. Многие предприятия сегодня продолжают совершенствовать технологии и расширять рынки сбыта [37].

Твердые частицы, карбида кремния (SiC), имеющие диаметры в диапазоне 30–100 мкм, широко используются в высокопрочных применениях, таких как производство абразивных и износостойких механизмов. Учитывая их превосходные физические и механические свойства (высокая прочность, долговечность и теплоемкость), порошки SiC недавно были приняты в качестве теплоносителя для концентрированных солнечных тепловых установок.

Также их порошка SiC производят керамику которая обладает многими превосходными свойствами, такими как высокая твердость, высокая механическая прочность, высокая устойчивость к коррозии и т.д. Карбидокремниевая керамика широко применяется в нефтяной, химической, микроэлектронной, автомобильной, аэрокосмической, авиационной,

лазерной, горнодобывающей и атомной энергетике и других областях промышленности [38].

2.2.3 Исходный материал

На рисунке 6 изображена структура SiC в масштабе x500. Структура не является идеально сферической, присутствуют частицы сложной формы. В целом, порошок обладает высокой текучестью и может быть использован в аддитивных технологиях.

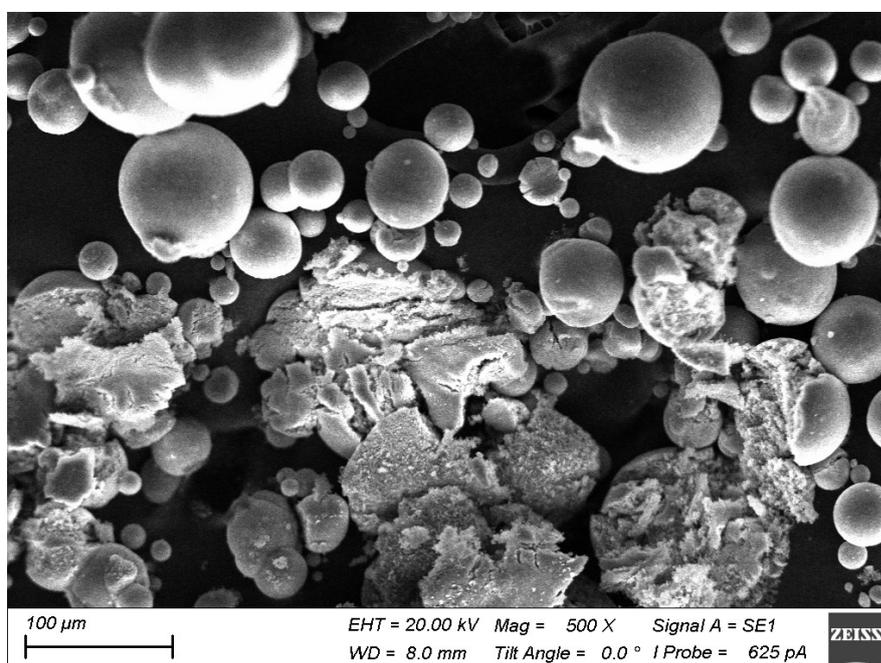


Рисунок 6 – Структура SiC.

На рисунке 7 изображена структура Ti в масштабе x500. В отличие от SiC частицы титана имеют идеально сферическую форму. Данные порошки специально были приготовлены для применения в аддитивных технологиях по методу газовой атомизации.

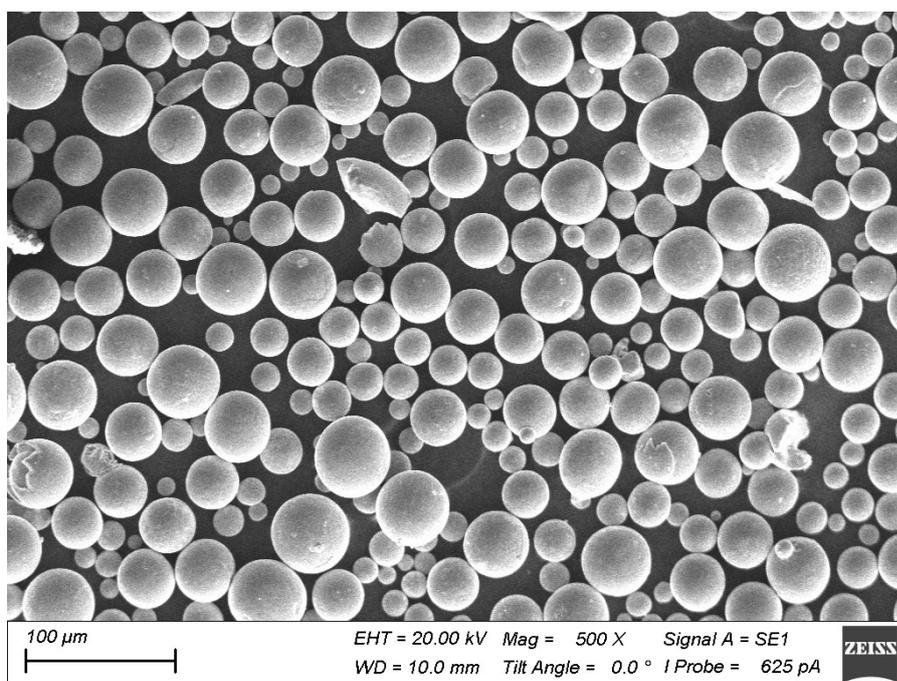


Рисунок 7 – Структура Ti.

Перед проведением экспериментов мы смешали два вида порошка, титан марки ВТ 1-0 и карбид кремния в следующих соотношениях:

Таблица 6. – Шихтовка исходных смесей

Название смеси	Шихтовка исходных смесей, г	
	Ti	SiC
5SiC	95	5
10SiC	90	10
15SiC	85	15
20SiC	80	20

2.3 Экспериментальное оборудование

Научно-производственная лаборатория «Современные производственные технологии» является высокотехнологичной и многофункциональной лабораторией, которая полностью соответствует заданным требованиям аддитивных технологий. Спектр выполняемых работ максимально разнообразен: происходит разработка и внедрение новых видов пластика применяемом в печати, происходит разработка новых видов композиционных материалов не имеющих аналогов, ведется проектировка и создание приборов для неразрушающего контроля. Новые технологии разработанные в лаборатории очень хорошо себя зарекомендовали в разных областях промышленности, машиностроительной, авиационной, космической. В медицине разрабатываемые материалы имеют значимую роль, производится изготовление деталей протезирования.

SLS или Selective Laser Sintering– технология аддитивного производства, основанная на послойном спекании порошковых материалов. Данная технология аддитивного производства широко востребована при изготовлении разнообразных композиционных материалов. Методом SLS возможно послойное соединение разных видов материалов, (метал, керамика, стекло, пластик), ранее было не возможным создание композиционных материалов высокого качества другими методами.

При выполнении экспериментов относящихся к данной магистерской диссертации использовалась установка селективного лазерного сплавления, разработанная в научно-образовательном центре «Современные производственные технологии»



Рисунок 8 – Установка селективного лазерного сплавления, разработанный в научно-образовательном центре «Современные производственные технологии»

Основные параметры оборудования:

- минимальная высота печати одного слоя 50 мкм;
- минимальный разрешающая способность 200 мкм;
- максимальная мощность лазера 500 Вт;
- максимальная скорость сканирования 2 м/с;
- область построения 100x100x100 мм (ДxШxВ).

Габариты:

- высота 1800 мм
- ширина 1600 мм
- глубина 1100 мм
- масса 600 кг

Источник лазерного излучения:

- волоконный непрерывный лазер
- длина волны 1060-1070 нм
- мощность лазера 500 Вт [82].



Рисунок 9 – используемый лазер серии ЛК/YLR

Серия ЛК/YLR иттербиевых волоконных лазеров была разработана для использования в промышленности. Это компактные и эффективные лазеры могут успешно заменять громоздкие и неэффективные лазеры. Основными применениями этих лазеров являются резка, сварка и наплавка материалов. Обладают выходной мощностью от 20 Вт до 1.5 кВт, работают на длине волны 1060-1100 нм. Надежность этих лазеров не имеет себе равных ни в одной твердотельной или газовой лазерной системе. Лазеры серий YLR идеально подходят для научных приложений и для интеграции в различные датчики и биомедицинские приборы

Основные особенности:

- Волоконный выход с высоким качеством пучка излучения.
- Высокая мощность
- Надежность и долговечность
- Компактный и прочный корпус
- Эффективность
- Внешний компьютерный интерфейс

Применения:

- Промышленные применения
- Научные исследования



Рисунок 10 – многофункциональный газоанализатор многокомпонентных смесей [39].

многокомпонентных смесей предназначен для проведения технологического и экологического мониторинга путем непрерывного автоматического измерения от одного до трех компонентов из следующего набора газов: угарного газа CO, углекислого газа CO₂, диоксида серы SO₂, водорода H₂, азота N₂, метана CH₄, окиси азота NO, кислорода O₂, гелия He в бинарных (двойных) и многокомпонентных смесях. Используются в составе автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУ ТП) в черной, цветной металлургии, цементной и стекольной промышленности, предприятиях производства кирпича и керамики, в химической и нефтехимической промышленности, ТЭЦ, ГРЭС, котельных и т.д.

Устройство и принцип действия:

Газоанализаторы представляют собой автоматические одноблочные приборы непрерывного действия. Газоанализаторы, в зависимости от группы конструктивного исполнения, включают в себя от одного до трех измерительных каналов, с различными принципами измерений. Двух и трехканальные газоанализаторы могут быть изготовлены как с единым газовым каналом для всех измерительных каналов, так и с отдельными газовыми каналами для отдельных измерительных каналов, что должно быть указано при заказе газоанализаторов.

Принцип действия:

- CO, CH₄, NO, SO₂ – оптико-акустический;
- CO₂ – оптико-акустический и термокондуктометрический;
- H₂, N₂, He – термокондуктометрический.



Рисунок 11 – камера-реактор [40]

Камера - реактор:

- габаритные размеры (x,y,z) 500×600×230 мм
- рабочий объем (x,y,z) 100×100×80 мм
- прокачка защитного газа 30 л/ч

Параметры печати:

- скорость построения 2-7 см³/ч
- практическая толщина слоя 20-200 мкм
- точность позиционирования ± 0,05 мм

Принцип работы:

При воздействии лазерного луча направленного в нужную нам область, в камере происходит послойное наплавление материала заданной формы, методом селективного лазерного сплавления.

Конкурентным преимуществом является возможность создания деталей высокой сложности форм.

Процесс производства деталей методом SLS полностью исключает применение сварных соединений, что позволяет нам получать монолитные изделия с высокими химико-физическими, прочностными показателями. Также конструкция данной камеры имеет удобный доступ к подложке и к лазерному излучателю. Конструкция проста, практична, в тоже время максимально эффективна.

2.4 Исследовательское оборудование

При производстве материалов аддитивного производства, требуется высококачественное исследовательское оборудование. Получаемые изделия имеют разные виды шероховатости, необходимо применение шлифовально-полировального станка марки Saphir 520 (АТМ). Данный шлифовально-полировальный станок отлично себя зарекомендовал при обработке изделий разной степени сложности. Огромнейшим плюсом данного станка является его высокая степень полирования, также отличается практичностью, имея не большие размеры в сравнении с аналогами, пульт управления понятен, дисплей информативен, в работе с данным шлифовально-полировальным станком никаких проблем не возникало.



Рисунок 12 – Шлифовально-полировальный станок Saphir 520 (АТМ) [41]

The SAPHIR 520 представляет собой однодисковую шлифовально-полировальную машину с смонтированной сверху шлифовально-полировальной головой RUBIN 500 с диаметром рабочего диска 200-250 мм.

Реализует весь процесс шлифовки, начиная с грубой шлифовки, заканчивая мягкой полировкой для подготовки образца. Обрабатывается от 1 до 6 образцов за 1 цикл. Управление осуществляется с помощью кнопок управления и дисплея с диагональю 4.3". Обновленная конструкция рабочего диска позволяет работать без использования несущего диска. Управляющее ПО позволяет настраивать и сохранять до 200 пользовательских программ, а также защищать их паролем.

Голова SAPHIR 520 оборудована защитным кожухом и устанавливает новый стандарт безопасности эксплуатации. Единичное и центральное

давление, функция памяти, встроенная система дозирования, измерение съема материала это далеко не все возможности машины.

Технические характеристики:

- Рабочие диски Ø 200 - 250 мм
- Количество образцов 1-5 образцов Ø 40 мм
- Усилие единичного давления регулируемое усилие 5-100 Н
- Усилие центрального давления Регулируемое усилие 20-350

Н

- Потребляемая мощность 1.8 кВт
- Мощность привода (шлифовальный станок) 0,55 кВт S6/40%
- Мощность привода (шлифовальная голова) 0.13 кВт S1
- Скорость (шлифовка) 50 - 600 мин-1
- Скорость (голова) 140 мин-1
- Габариты ШхВхГл 470 x 480 x 620 мм
- Вес ~ 52кг
- Подключение воды 1х шланг подачи воды R ½ "макс. 6 бар

После получения образцов необходимо произвести испытания на твердость.

В данной магистерской диссертации мы проводили испытания на твердость по Роквеллу.

Испытания проводились используя твердомер модели TH500 показанный на рисунке 9.

TH500 хорошо зарекомендовал при измерении различных материалов, точность измерения верна. Твердомер соответствует стандартам: BSEN 10109 - 96, ISO 6508.2. Легок в использовании, имеет высокую повторяемость получаемых результатов, удобен в обслуживании.



Рисунок 13 – Стационарный твердомер по Роквеллу TH500 [42]

- Технические характеристики:
- Предварительная нагрузка 98.1 Н (10 кг)
- Общая нагрузка 588.4 Н (60 кг) 980.7 Н (100 кг) 1471 Н (150 кг)
- Шкалы по Роквеллу HRA, HRB, HRC
- Диапазон измерений 20 – 80 HRA, 20 - 100 HRB, 20 - 80 HRC
- Дискретность измерений 0.5 HR единиц твердости по Роквеллу
- Вертикальное пространство измерений максимально 200 мм
- Горизонтальное пространство измерений максимально 160 мм
- Габаритные размеры твердомера 720 x 225 x 790 мм Масса 100 кг

Для определения микротвердости в лаборатории имеется твердомер марки ПМТ-3 рисунок 10. Данный твердомер предназначен для измерения твердости поверхности образцов по методу Виккерса. ПМТ-3 обладает высокой точностью измерения, во время проведения испытаний относящихся

к данной магистерской диссертации, очень часто приходилось испытывать образцы при помощи твердомера ПМТ-3, что очень хорошо сказалось на конечных результатах работы.



Рисунок 14 – ПМТ-3 прибор для определение микротвердости

Для проведения металлографических наблюдений использовался инвертированный микроскоп Axiovert 200MAT. отличается оптической схемой, в которой наблюдаемая плоскость образца направлена вниз, а револьверная головка с объективами находится под предметным столиком. Благодаря этому плоскость образца всегда строго перпендикулярная оптической оси объектива, что позволяет при больших увеличениях наблюдать всю поверхность в фокусе.



Рисунок 15 – Микроскоп Axiovert 200 MAT инвертированный
металлографический [43]

Таблица 7 – Технические характеристики Axiovert 200 MAT

Габаритные размеры микроскопа, мм, не более	295×805×707
Диапазон измерений шкалы объект-микromетра, мм	0,01 - 5
Цена деления шкалы объект-микromетра, мкм	10
Пределы абсолютной погрешности шкалы объект-микromетра, мкм	±0,2
Пределы отклонения общей длины шкалы объект-микromетра, мкм	±2
Масса, кг, не более	26

4 Финансовый менеджмент ресурсоэффективность и ресурсосбережение

4.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования

Новый материал направлен на отечественный рынок, предполагается его применение в машиностроительном комплексе относящемся к холдингу «Швабе».

Карбид титана-кремния (Ti_3SiC_2) представляет собой обрабатываемую керамику, демонстрирующую уникальную комбинацию различных свойств. Например, он демонстрирует превосходную стойкость к тепловому удару, превосходящую титанат алюминия, также демонстрирует высокую демпфирующую способность, сравнимую с нейлоном, несмотря на высокий модуль упругости (320 ГПа), сравнимый с глиноземом. Показывает высокую электрическую и теплопроводность, сопоставимые с металлическим свинцом, несмотря на хорошую стойкость к окислению при повышенных температурах до 1273 К и хорошую коррозионную стойкость в кислых растворах.

Ti_3SiC_2 имеет кристаллическую структуру с плоскими слоями Si, связанными вместе с октаэдрами TiC.

Опираясь на методические указания составлена карта сегментирования, аддитивных производств в России, рисунок 19.

EBM–(Electron beam melting,)–Электронно-лучевое плавление.

SLM–(Selective Laser Melting)– Селективное лазерное плавление.

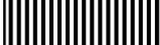
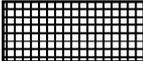
Российские производители SLM и EBM							
	Корпоративный сайт	Инновационное оборудование	Государственная корпорация	Институты, научные центры	Мелкосерийное производство	Среднесерийное производство	Крупносерийное производство
Крупные							
Средние							
							
Мелкие							
							
							
							

Рисунок 19 – Карта сегментирования производителей SLM и EBM

- 1) «Росатом» 
- 2) «СПбГМТУ» 
- 3) «СО РАН» 
- 4) «УрФУ» 
- 5) «3DSLА — Российские 3D-принтеры» 
- 6) «Лазеры и аппаратура» 
- 7) «ЛАР Технологии» 

Составив карту сегментирования можно определить количество отечественных компаний, их размер и объемы производства, также возможно

проанализировать конкурентоспособность нашей организации, в последствии задав вектор дальнейшего развития.

Лаборатория «СО РАН» ориентируется на создание элементов протезирования и деталей применяемых в машиностроении.

Привлекательным сегментов является космическая отрасль, так-как наука не стоит на месте, а прогрессивные технологии выходят на более высокий уровень, космическая отрасль является перспективным направлением в применении материалов аддитивного производства.

4.1.2 Анализ конкурентных технических решений

В качестве основных конкурентных технических решений были выбраны следующие технологии:

В качестве основных конкурентных технических решений были выбраны следующие технологии:

- получение Ti_3SiC_2 методом SLS (данная работа) (1),
- получение Ti_3SiC_2 горячим прессованием (2).

Результаты конкурентного анализа приведены в таблице 13

Таблица 13 – Оценочная карта

Критерии оценки	Вес	Баллы		Конкурентоспособность	
		Б ₁	Б ₂	К ₁	К ₂
Технические критерии оценки ресурсоэффективности					
1. Энергоэкономичность	0,3	5	3	1,5	0,9
2. Функциональная мощность	0,2	5	3	1,0	0,6
3. Повышение производительности труда пользователя	0,2	5	4	1,0	0,8
4. Простота эксплуатации	0,005	5	4	0,25	0,2
5. Стойкость материала	0,1	5	4	0,5	0,4
6. Надежность	0,1	5	4	0,5	0,4
Экономические критерии оценки эффективности					
7. Конкурентоспособность технологии	0,05	5	4	0,25	0,2
Итого:		35	26	5,0	3,5

- Критерий «функциональная мощность» отражает наличие, либо отсутствие дополнительных возможностей.

- Под «простотой эксплуатации» понимается то, насколько быстрее и проще проходит данный процесс для получения требуемых свойств материала, что так же снижает требования к уровню квалификации привлекаемого персонала.

- Под «надежностью» подразумевается уровень дефектности получаемого продукта, повышение надежности достигается за счет снижения дефектности, а так же за счет отмены дополнительной обработки.

Конкурентоспособность проекта 1 исполнения относительно проекта 2 исполнения:

$$K=1 \times 35=35$$

Конкурентным преимуществом данного материала является более высокая прочность. Материал был создан методом SLS (селективное лазерное сплавление), при использовании данного метода можно создавать детали разной сложности форм, с достижением более высоких химико-физических показателей, что невозможно достичь горячим прессованием.

4.1.3 FAST-анализ

Стадия 1

В качестве объекта FAST-анализа выступает порошковая смесь Ti+C.

Стадия 2

1) Целью для создания данного композиционного материала является внедрение более совершенного объекта на производственный рынок. За счет более усовершенствованной кристаллической решетки, данный материал необходим в разных сферах деятельности, начиная с медицины заканчивая космической сферой.

2) Так-как в роли главной функции у нас выступает композиционный материал несущий основополагающую функцию для производства деталей и заготовок применяемых в различных сферах деятельности, в качестве основной функции применяем смесь порошков непосредственно из которых данный композиционный материал будет состоять. Для более цельного описания основной функции вводим еще несколько переменных: оборудование (3D-установка), подбор порошковой смеси, режимы, ПК с предустановленными САПР.

3) В качестве вспомогательной функции принимаем ПК с предустановленными САПР. Без функции компьютера дальнейшие опыты и последующее получение заготовок данного материала проблематична, так-как при помощи ПК производится предварительные расчеты свойств и характеристик материала, с последующим моделированием заготовки.

Таблица 14 – Классификация функций, выполняемых объектом исследования

Наименование детали (узла, процесса)	Количество во деталей на узел	Выполняемая функция	Ранг функции		
			Главная	Основная	Вспомогательная
1) Композит. Материал	–	Служит материалом для изготовления деталей	x		
2) 3D-Установка	1	Обеспечивает спекание порошков двух видов		x	
3) Порошковая смесь	–	Качество порошка влияет на конечный продукт		x	
4) Режимы	–	Правильно подобранные режимы влияют на процесс изготовления		x	

Продолжение таблицы 14

5) ПК	1	Служит для контроля режимов, оценки, расчетов, моделирования			х
-------	---	--------------------------------------------------------------	--	--	---

Стадия 3

Таблица 15 – Матрица смежности

	Функция 1	Функция 2	Функция 3	Функция 4	Функция 5
Функция 1	=	<	=	<	<
Функция 2	>	=	=	<	<
Функция 3	=	=	=	<	<
Функция 4	>	>	>	=	=
Функция 5	>	>	>	=	=

Таблица 16 – Матрица количественных соотношений функций

	Функция 1	Функция 2	Функция 3	Функция 4	Функция 5	Итого
Функция 1	1	0.5	1	0.5	0.5	3.5
Функция 2	1.5	1	1	0.5	0.5	4.5
Функция 3	1	1	1	0.5	0.5	4
Функция 4	1.5	1.5	1.5	1	1	6.5
Функция 5	1.5	1.5	1.5	1	1	6.5
						$\Sigma=25$

Определение значимости функции

Функция 1=3.5/25=0.14

Функция 2=4.5/25=0.18

Функция 3=4/25=0.16

Функция 4=6.5/25=0.26

Функция 5=6.5/25=0.26

$\Sigma=0.14+0.18+0.16+0.26+0.26=1$

Стадия 5. Построение функционально-стоимостной диаграммы объекта и ее анализ

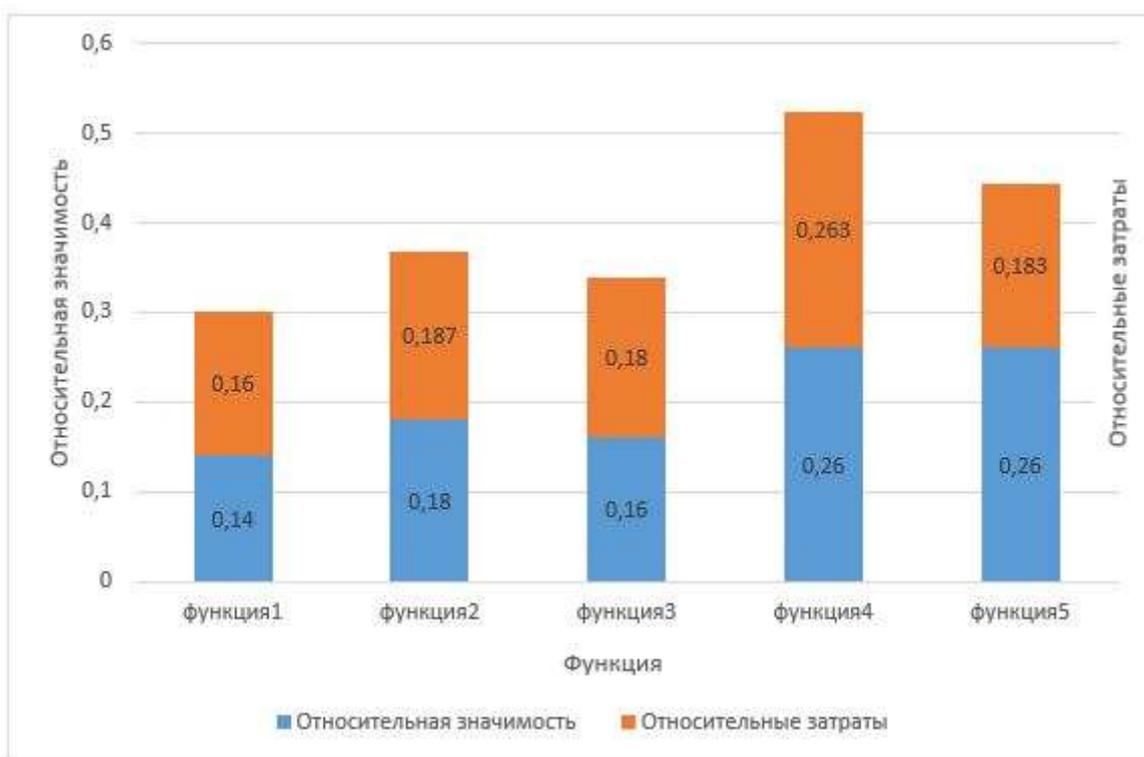


Рисунок 20 – Функционально-стоимостная диаграмма

Анализ приведенной выше ФСД рисунок 20, показывает основные затраты связанные с производством композиционного материала. Незначительные диспропорции наблюдаются в 1 и в 3 функциях, в дальнейшем будут проводиться работы по полному исключению диспропорций. На данном этапе затраты оправданы.

Стадия 6. Оптимизация функций выполняемых объектом.

1) Для улучшения качества заготовок применяется более усовершенствованный метод послойного моделирования, применение данного метода позволит нам получать заготовки высокого качества с минимальным количеством брака, что в последствии снизит объем затрат на исходный материал.

2) Для того что бы снизить часть выделенных средств на проект, закупка исходного материала производилась у отечественных производителей. Качество порошка не уступает зарубежным аналогам, а цена в разы меньше.

3) Чтоб предотвратить увеличение затрат расходующихся на аренду определенного вида 3D-установок, лаборатория приобрела собственную установку.

4) За счет применения качественной оснастки мы получили качественный материал при этом удалось сохранить часть выделенных средств , в последствии перенаправленных на закупку узлов 3D-установки.

4.1.4 Диаграмма Исикавы

Диаграмма причины-следствия Исикавы (Cause-and-Effect-Diagram) – это графический метод анализа и формирования причинно-следственных связей, инструментальное средство для систематического определения причин проблемы и последующего графического представления. Данная диаграмма используется для выявления причин возникновения проблем, анализа и структурирования проекта, а также для оценки причинно-следственных связей. Проблемной областью анализа является шероховатость поверхности полученной детали методом SLS. К факторам, влияющим на объект анализа, можно отнести:

1) Персонал

- 2) Оборудование
- 3) Технология проведения работ

Причинно-следственная диаграмма представлена на рисунке 3



Рисунок 21 – Причинно-следственная диаграмма

4.1.5 SWOT-анализ

Описание сильных и слабых сторон проекта, выявление возможностей и угроз.

Сильные стороны. Сильные стороны—это факторы, характеризующие конкурентоспособную стороны научно-исследовательского проекта.

Слабые стороны. Слабость—это недостаток, упущение или ограниченность научно-исследовательского проекта, которые препятствуют достижению его целей.

Результаты первого этапа представлены в таблице 17.

Таблица 17 – Результаты первого этапа SWOT-анализа

	<p>Сильные стороны</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Повышение эффективности производственных процессов; 2. Снижение энергозатрат; 3. По сравнению с другими методами производства, стоимость гораздо ниже; 4. Высокий спрос на рынке композиционных материалов; 5. Отличные показатели качества; 6. Широкие возможности по масштабированию проекта. 	<p>Слабые стороны</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Качество порошковой смеси не всегда соответствует заявленным характеристикам; 2. Дорогостоящее оборудование (3D-установка); 3. Тщательный подбор режимов, малейшее отклонение приведет к браку; 4. Малое количество предприятий по распространению и применению данной технологии.
<p>Возможности</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Использование инновационной инфраструктуры ТПУ; 2. Внедрение новых элементов в кристаллическую решетку; 3. Увеличение производственных мощностей; 4. Повышение качества исходного материала. 		
<p>Угрозы</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Рост цен на детали оборудования; 2. Отсутствие инвестирования; 3. Отказ предприятий от нашего материала; 4. Влияние общего климата рынка на производство и внедрение данного композиционного материала . 		

Интерактивная матрица проекта представлена в таблице 18;19:

Таблица 18 – Интерактивная матрица проекта (сильные стороны)

	Сил1	Сил2	Сил3	Сил4	Сил5	Сил6
В1	+	+	+	–	+	+
В2	–	–	–	+	+	–
В3	+	–	+	+	–	+
В4	+	–	–	–	+	0
У1	–	–	+	–	–	+
У2	–	–	–	–	–	–
У3	–	–	–	–	–	–
У4	0	–	–	+	–	+

Таблица 19 – Интерактивная матрица проекта (слабые стороны)

	Слаб1	Слаб2	Слаб3	Слаб4
В1	–	+	–	–
В2	–	+	+	–
В3	–	–	–	–
В4	–	+	+	–
У1	–	+	–	+
У2	+	–	+	–
У3	0	–	–	–
У4	–	–	–	–

Таблица 20 – Итоговая матрица SWOD

	<p>Сильные стороны</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Повышение эффективности производственных процессов; 2. Снижение энергозатрат; 3. По сравнению с другими методами производства, стоимость гораздо ниже; 4. Высокий спрос на рынке композиционных материалов; 5. Отличные показатели качества; 6. Широкие возможности по масштабированию проекта. 	<p>Слабые стороны</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Качество порошковой смеси не всегда соответствует заявленным характеристикам; 2. Дорогостоящее оборудование (3D-установка); 3. Тщательный подбор режимов, малейшее отклонение приведет к браку; 4. Малое количество предприятий по распространению и применению данной технологии.
<p>Возможности</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Использование инновационной инфраструктуры ТПУ; 2. Внедрение новых элементов в кристаллическую решетку; 3. Увеличение производственных мощностей; 4. Повышение качества исходного материала. 	<p>V1C1C2C3C4C5C6: За счет использования инновационного оборудования, качество и производство материала выходят на высокий уровень.</p> <p>B2C4C5C6: С усовершенствованной кристаллической решеткой будут улучшаться химико-физ показатели.</p> <p>V3C1C3C4C6: Для здоровой конкуренции на рынке необходимы больше объемы .</p> <p>B4C1C5; Производство напрямую зависит от качества.</p>	<p>V1C2; Инновационная инфраструктура требует дорогостоящей оснастки(3D-установка).</p> <p>B2C2C3; Без качественного оборудования невозможно создать материал соответствующий заданным показателям.</p> <p>B4C2C3; Правильно подобранные режимы позволят качественно спекать порошки двух видов.</p>
<p>Угрозы</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Рост цен на детали оборудования; 2. Отсутствие инвестирования; 3. Отказ предприятий от нашего материала; 4. Влияние общего климата рынка на производство и внедрение данного композиционного материала . 	<p>U1C3C6; За счет повышении эффективности возрастает нагрузка на оборудование, что в последствие ведет к поломкам.</p> <p>U4C4C6; Общемировой рынок задает вектор развития цен и спроса.</p>	<p>U1C2C4; Дорогостоящее оборудование требует своевременной диагностики. Качество деталей для ремонта должно соответствовать ГОСТУ.</p> <p>U2C1C3; Инвестирование зависит от качества производимого материала.</p>

Таким образом, можно сделать вывод, что проект необходимо развивать, применяя наиболее новые и оптимизированные методы в производстве. Необходимо использовать оборудование и исходный материал высокого качества, что позволит создать материал с высокими химико-физическими показателями.

4.1.6 Оценка готовности проекта к коммерциализации

Таблица 21 – Оценка готовности проекта к коммерциализации

№ п/п	Наименование	Степень проработанности научно- го проекта	Уровень имеющихся знаний у разработчика
1.	Определен имеющийся научно-технический задел	5	4
2.	Определены перспективные направления коммерциализации научно- технического задела	4	4
3.	Определены отрасли и технологии (товары, услуги) для предложения на рынке	4	4
4.	Определена товарная форма научно-технического задела для представления на рынок	4	4
5.	Определены авторы и осуществлена охрана их прав	5	4
6.	Проведена оценка стоимости интеллектуальной собственности	5	4
7.	Проведены маркетинговые исследования рынков сбыта	5	3
8.	Разработан бизнес-план коммерциализации научной разработки	4	4
9.	Определены пути продвижения научной разработки на рынок	4	3
10.	Разработана стратегия (форма) реализации научной разработки	4	4
11.	Проработаны вопросы международного сотрудничества и выхода на зарубежный рынок	3	3

Продолжение таблицы 21

12.	Проработаны вопросы использования услуг инфраструктуры поддержки, получения льгот	4	4
13.	Проработаны вопросы финансирования коммерциализации научной разработки	4	3
14.	Имеется команда для коммерциализации научной разработки	4	4
15	Проработан механизм реализации научного проекта	4	3
	Итого баллов	63	55

Опираясь на итоговое количество баллов, разработку можно считать перспективной. Основные объемы инвестирования должны быть направлены в своевременную модернизацию оборудования, в закупку качественного исходного материала, также одним из главных направлений инвестирования считаю международный рынок сбыта, не стоит забывать и про маркетинговое направление, без должного инвестирования маркетингового направления сложно будет проработать стратегию сбыта и провести анализ конкурентных организаций схожего производства.

4.2 Инициация проекта

4.2.1 Цели и результат проекта

В данном разделе необходимо привести информацию о заинтересованных сторонах проекта, иерархии целей проекта и критериях достижения целей.

Таблица 22 – Заинтересованные стороны проекта

Заинтересованные стороны проекта	Ожидания заинтересованных сторон
Машиностроительные организации	Внедрение нового материала в производство
Научная лаборатория аддитивного центра	Получение материала, соответствующего нормам потенциальных заказчиков
Томский политехнический университет	Внедрение усовершенствованной технологии, с последующей реализацией проекта
Магистрант	Должное освоение программы магистранта, с последующим подтверждением степени

Таблица 23 – Цели и результат проекта

Цели проекта:	Получение композиционного материала с усовершенствованными прочностными характеристиками
Ожидаемые результаты проекта:	Получив материал нужной нам структуры, предполагается реализовать его во многих производственных направлениях
Критерии приемки результата проекта:	<ol style="list-style-type: none">1. Внутренние технологические требования организаций и структур использующих данный материал2. Образцы должны соответствовать заявленным характеристикам представленным на начальной стадии проекта
Требования к результату проекта:	Требование:
	Соотношение порошковой массы должно соответствовать заданным нормативам
	Исключаются любые отклонения дисперсности структуры от заданных значений
	Прохождение испытаний (физическое воздействие, тепловое воздействие)
	При проведении испытаний, объект должен продемонстрировать соответствие с заданными значениями прочности

4.2.2 Организационная структура проекта

На данном этапе работы необходимо решить следующие вопросы: кто будет входить в рабочую группу данного проекта, определить роль каждого участника в данном проекте, а также прописать функции, выполняемые каждым из участников и их трудозатраты в проекте.

Таблица 24 – Рабочая группа проекта

№ п/п	ФИО, основное место работы, должность	Роль в проекте	Функции	Трудо-затраты, час.
1	Клименов В.А. Профессор. Заведующий кафедрой - руководитель отделения на правах кафедры, ТПУ	Руководитель проекта	Отвечает за реализацию проекта в пределах заданных ограничений по ресурсам, координирует деятельность участников проекта.	500 час.
2	Криницын М.Г. Младший научный сотрудник Научно-производственная лаборатория "Современные производственные технологии", ТПУ	Эксперт проекта	Контролирует ход выполнения работ, имеет доступ и разрешения на работу с определенными видами установок.	950 час.
3	Габитов Э.К. Магистрант	Исполнитель по проекту	Исполнение работ связанных с изготовлением материала.	1050 час.
ИТОГО:				2500

4.2.3 Ограничения и допущения проекта

Ограничения проекта – это все факторы, которые могут послужить ограничением степени свободы участников команды проекта, а также

«границы проекта» - параметры проекта или его продукта, которые не будут реализованных в рамках данного проекта.

Таблица 25 – Ограничения проекта

Фактор	Ограничения/ допущения
3.1. Бюджет проекта	Составляет 2 100 000 руб. Не рекомендуется превышать бюджет, заявленный на начальной стадии проекта.
3.1.1. Источник финансирования	Производится плановая проверка выделяемых средств ТПУ. Лаборатория представляет все расходы необходимые на выполнение работ.
3.2. Сроки проекта:	Ограничения по срокам идентичны ограничениям защиты.
3.2.1. Дата утверждения плана управления проектом	После утверждения даты магистрант может сразу приступить к выполнению работ
3.2.2. Дата завершения проекта	После завершения и последующей защиты ВКР допускается продолжение работ по проекту.
3.3. Прочие ограничения и допущения*	Не допускается использовать порошок более низкого качества. Не допускается использовать оборудование в личных целях, не связанных с проектом. Не допускается разглашать информацию о структуре материала и методике выполнения работ.

4.3 Планирование и управление техническим проектом

4.3.1 Иерархическая структура работ проекта.

Иерархическая структура работ (ИСР) – детализация укрупненной структуры работ. В процессе создания ИСР структурируется и определяется содержание всего проекта.



Рисунок 22 – Иерархическая структура по ВКР

4.4 План проекта

В рамках планирования научного проекта необходимо построить календарный график проекта, который может быть представлен в виде линейного графика.

Таблица 26 – Календарный план проекта

Код работы	Название	Длительность, дни	Дата начала работ	Дата окончания работ	Состав участников
1	Составление технического задания	4	06.09.19	09.09.19	Клименов В.А
2	Изучение литературы	44	10.09.19	23.10.19	Габитов Э.К
3	Анализ порошка	10	24.10.19	02.11.19	Габитов Э.К
4	Моделирование детали в «SolidWorks» «КОМПАС»	23	03.11.19	25.11.19	Габитов Э.К
5	ТГА анализ	21	26.11.19	15.12.19	Габитов Э.К
6	Техническая настройка 3d-печати	14	16.12.19	30.12.19	Криницын М.Г. Габитов Э.К
7	Проведение серии экспериментов	34	27.03.20	18.05.20	Габитов Э.К
8	Анализ результатов эксперимента в	5	20.05.20	25.05.20	Клименов В.А
9	Защита проекта	1		Июнь 2020	

Диаграмма Ганта – это тип столбчатых диаграмм (гистограмм), который используется для иллюстрации календарного плана проекта, на котором работы по теме представляются протяженными во времени отрезками, характеризующимися датами начала и окончания выполнения данных работ с указанием исполнителей. График строится в виде таблицы (таблица 15) с разбивкой по месяцам и декадам (10 дней) за период времени выполнения научного проекта.

Талица 27 – Календарный план-график

Код работ	Вид работ	Исполнители	К кал. дн,	Продолжительность выполнения работ												
				Сен	Окт	Ноя	дек	мар	май	Июнь						
1	Составление технического задания	Руководитель	4	■												
2	Изучение литературы	Дипломник	44	■	■											
3	Анализ порошка	Дипломник	10			■										
4	Моделирование детали в SolidWorks	Дипломник	23				■									
5	ТАГ анализ	Дипломник	21					■								
6	Техническая настройка 3d-печати	Дипломник	14						■							
7	Проведение серии экспериментов	Дипломник	34									■	■			
8	Анализ эксперимента.	Руководитель	5											■		
9	Защита	Дипломник	1													■

Руководитель 

Дипломник 

4.5 Бюджет научного исследования

При планировании бюджета научного исследования необходимо обеспечить полное и верное отражение различных видов расходов, связанных с его выполнением.

В процессе формирования бюджета используется следующая группировка затрат по статьям:

4.5.1 Сырье, материалы, комплектующие изделия, покупные материалы и полуфабрикаты

В эту статью включаются затраты на приобретение всех видов материалов, комплектующих изделий и полуфабрикатов, необходимых для выполнения работ по данной теме. Количество потребных материальных ценностей определяется по нормам расхода.

Таблица 28 – Сырье, материалы, комплектующие изделия, покупные материалы.

Наименование	Единица измерения	Количество	Цена за ед., руб.	Затраты на материалы, (Зм), руб.
Порошок марки: ВТ-6	кг	2	60000	120000
Пенетрант марки: VP-30	мл	1	1500	1500
Пластификатор	гр	5	500	500
Итого				122000

4.5.2 Специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ

В данную статью включают все затраты, связанные с приобретением специального оборудования (приборов, контрольно-измерительной аппаратуры, стендов, устройств и механизмов), необходимого для проведения работ по конкретной теме. Определение стоимости спецоборудования производится по действующим прейскурантам, а в ряде случаев по договорной цене.

Таблица 29 – Расчет затрат по статье «Спецоборудование для научных работ»

№ п/п	Наименование оборудования	Кол-во единиц оборудования	Цена за ед.,руб.	Годовая амортизация, руб.
1.	3D-установка	1	5 000 000	1250000
2.	Испытательный стенд	1	1 500 000	375000
3	ПК	1	50000	12500
Итого				1637000

Таблица 30 – Затраты на электроэнергию и услуги связи

№ п/п	Наименование	Годовые затраты, руб.
1	Электричество	104748
2	Услуги связи (интернет)	8400
3	Итого	113148

4.5.3 Основная заработная плата

В настоящую статью включается основная заработная плата научных и инженерно-технических работников, рабочих макетных мастерских и опытных производств, непосредственно участвующих в выполнении работ по данной теме. Величина расходов по заработной плате определяется исходя из трудоемкости выполняемых работ и действующей системы оплаты труда. В состав основной заработной платы включается премия, выплачиваемая ежемесячно из фонда заработной платы (размер определяется Положением об оплате труда).

Таблица 31 – Расчет основной заработной платы

Исполнитель	Оклад, руб.	Средняя заработная плата, руб./дн.	Трудоемкость, раб. дн.	Основная заработная плата, руб.
Руководитель	23100,00	2415,00	10	24150,00
Студент	17000,00	1777,28	56	99527,68
Итого				123677,68

4.5.4 Дополнительная заработная плата научно-производственного персонала

В данную статью включается сумма выплат, предусмотренных законодательством о труде, например, оплата очередных и дополнительных отпусков; оплата времени, связанного с выполнением государственных и общественных обязанностей; выплата вознаграждения за выслугу лет и т.п.

Таблица 32 – Расчет дополнительной заработной платы

Исполнитель	Основная заработная плата, руб.	Коэффициент дополнительной заработной платы	Дополнительная заработная плата, руб.
Руководитель	24150,00	0,15	3622,50
Студент	99527,68		14929,16
Итого			18551,66

4.5.5 Отчисления на социальные нужды

$k_{внеб}$ – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд обязательного медицинского страхования и пр.).

На 2020 г. в соответствии с Федеральным законом от 24.07.2009 №212-ФЗ установлен размер страховых взносов равный 30%. На основании пункта 1 ст.58 закона №212-ФЗ для учреждений осуществляющих образовательную и научную деятельность в 2020 году водится пониженная ставка – 30,1%. Отчисления во внебюджетные фонды представлены ниже.

Таблица 33 – Отчисления на социальные нужды

Исполнитель	Основная заработная плата, руб	Дополнительная заработная плата, руб
Руководитель проекта	24150,00	3622,50
Студент-дипломник	99527,68	14929,16
Коэффициент отчислений	0,271	
Итого	38544,15	

4.5.6 Накладные расходы

В эту статью включаются затраты на управление и хозяйственное обслуживание, которые могут быть отнесены непосредственно на конкретную тему. Кроме того, сюда относятся расходы по содержанию, эксплуатации и ремонту оборудования, производственного инструмента и инвентаря, зданий, сооружений и др.

$$C_{\text{накл}} = k_{\text{накл}} \cdot (123677 + 18551) = 22756$$

Таблица 34 – Группировка затрат

	Статьи	Стоимость	Итого плановая себестоимость
1	Сырье, материалы (за вычетом возвратных отходов), покупные изделия и полуфабрикаты	122000	2075677
2	Специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ	1637000	
3	Затраты на электроэнергию и услуги связи	113148	
4	Основная заработная плата	123677.68	
5	Дополнительная заработная плата	18551.66	
6	Отчисления на социальные нужды	38544.15	
7	Накладные расходы	22756	

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

На основе расчёта интегрального показателя эффективности проведем оценку ресурсной эффективности проекта. Для определения необходимо рассчитать показатель ресурсной и финансовой эффективности.

Ресурсная эффективность (РЭ):

$$I_{pi} = \sum a_i \cdot b_i$$

где I_{pi} – интегральный показатель РЭ; a_i – весовой коэффициент; b_i – экспертная оценка разботки в баллах по i -тому показателю.

Показатели:

Научная ценность: в ходе проведенной работы изучены физические и химические процессы, воздействующие на материал при спекании, изучено строение кристаллической решетки, проведены испытания композиционного материала.

Практическая значимость: Разработан композиционный материал (Ti_3SiC_2), обладающий отличными химико-физическими показателями. Данный материал является универсальным, из него можно изготавливать детали применяемые в узлах машин, также хорошо может себя проявить и в космической отрасли.

Эффективность: Получаемые заготовки успешно прошли испытания, предполагается внедрение данного материала в машиностроительных комплекс, относящийся к холдингу «Швабе».

Стоимость: разработанный материал нельзя назвать не дорогим, цена на порошок по меркам аддитивных имеет среднюю стоимость, но и сам материал предполагается применять в самых агрессивных средах, на детали из данного материала возложена огромная ответственность.

Конкурентоспособность: Разработанный материал получаемый методом SLS не имеет отечественных аналогов, есть похожие материалы получаемые горячим прессованием, но своими прочностными

характеристиками существенно уступают нашему композиту. Результаты оценки представлены в таблице 35.

Таблица 35 – Оценка ресурсоэффективности

Критерии	Весовой коэффициент	Бальная оценка разработки
1. Эффективность	0,25	5
2. Стоимость	0,2	4
3. Практическая значимость	0,2	5
4. Научная ценность	0,1	5
5. Конкурентоспособность	0,05	5
6. Выполнимость	0,2	4
Итого:	1,00	

Интегральный показатель ресурсоэффективности:

$$I_{pi}=5 \cdot 0,25+4 \cdot 0,2+5 \cdot 0,2+5 \cdot 0,1+5 \cdot 0,05+4 \cdot 0,2=4,6 \text{ баллов}$$

Полученный показатель имеет высокое значение по 5-бальной шкале, следовательно, проект жизнеспособен, имеет высокую значимость и конкурентоспособность.