



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
ООП/ОПОП Материаловедение и технологии материалов
Отделение школы (НОЦ) Отделение материаловедения

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА БАКАЛАВРА

Тема работы
Формирование структуры порошковых титаноматричных композитов с субмикронной упрочняющей фазой

УДК 621.762:669.295-419.8

Обучающийся

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4Б91	Горлышкина Злата Юрьевна		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Младший научный сотрудник ИФПМ СО РАН	Фирсина И.А.	канд. техн. наук		

КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН ШБИП	Маланина В.А.	канд. экон. наук		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ст.преподаватель ООД ШБИП	Мезенцева И.Л.	-		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП/ОПОП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент Ом ИШНПТ	Ваулина О.Ю.	канд. техн. наук		

ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОСВОЕНИЯ ООП

Код компетенции	Наименование компетенции
Универсальные компетенции	
УК(У)-1	Способен осуществлять поиск, критический анализ и синтез информации, применять системный подход для решения поставленных задач
УК(У)-2	Способен определять круг задач в рамках поставленной цели и выбирать оптимальные способы их решения, исходя из действующих правовых норм, имеющихся ресурсов и ограничений
УК(У)-3	Способен осуществлять социальное взаимодействие и реализовывать свою роль в команде
УК(У)-4	Способен осуществлять деловую коммуникацию в устной и письменной формах на государственном языке Российской Федерации и иностранном(-ых) языке(-ах)
УК(У)-5	Способен воспринимать межкультурное разнообразие общества в социально-историческом, этическом и философском контекстах
УК(У)-6	Способен управлять своим временем, выстраивать и реализовывать траекторию саморазвития на основе принципов образования в течение всей жизни
УК(У)-7	Способен поддерживать должный уровень физической подготовленности для обеспечения полноценной социальной и профессиональной деятельности
УК(У)-8	Способен создавать и поддерживать в повседневной жизни и в профессиональной деятельности безопасные условия жизнедеятельности для сохранения природной среды, обеспечения устойчивого развития общества, в том числе при угрозе и возникновении чрезвычайных ситуаций и военных конфликтов
УК(У)-9	Способен проявлять предприимчивость в профессиональной деятельности, в т.ч. в рамках разработки коммерчески перспективного продукта на основе научно-технической идеи
УК(У)-10	Способен принимать обоснованные экономические решения в различных областях жизнедеятельности
УК(У)-11	Способен формировать нетерпимое отношение к коррупционному поведению
Общепрофессиональные компетенции	
ОПК(У)-1	Способен решать стандартные задачи профессиональной деятельности на основе информационной и библиографической культуры с применением информационно-коммуникационных технологий и с учетом основных требований информационной безопасности
ОПК(У)-2	Способен использовать в профессиональной деятельности знания о подходах и методах получения результатов в теоретических и экспериментальных исследованиях
ОПК(У)-3	Готов применять фундаментальные математические, естественнонаучные и общеинженерные знания в профессиональной деятельности
ОПК(У)-4	Способен сочетать теорию и практику для решения инженерных задач
ОПК(У)-5	Способен применять в практической деятельности принципы рационального использования природных ресурсов и защиты окружающей среды

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



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

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

УТВЕРЖДАЮ:
Руководитель ООП/ОПОП

(Подпись) (Дата) (ФИО)

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

Обучающийся:

Группа	ФИО
4Б91	Горлышкина Злата Юрьевна

Тема работы:

Формирование структуры порошковых титаноматричных композитов с субмикронной упрочняющей фазой	
Утверждена приказом директора ИШНПТ	Приказ № 34-103/с от 03.02.2023

Срок сдачи студентом выполненной работы:	03.06.2023
------------------------------------------	------------

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе	Объектом исследования являются образцы титаноматричных композитов из чистых порошков титана (ТПП-8, ПТОМ-1, ПТМ-1), полученные горячим уплотнением с предварительной механоактивацией в присутствии углеводородов. Дополнительно был проведен отжиг (900 и 1300 °С) с целью определения влияния режимов термообработки на микроструктуру, плотность и пористость, и микротвердость, полученных образцов.
Перечень разделов пояснительной записки подлежащих исследованию, проектированию и разработке	Аналитический обзор был проведен по теме Композиционных материалов и методов упрочнения композитов на основе титана. Целью исследования являлось установление режимов обработки порошков для получения наилучших конкурентоспособных физико-механических характеристик исследуемых материалов. Для выполнения цели были поставлены такие задачи, как: исследование

	пористости образцов, микроструктуры, измерение микротвёрдости, а также объемных изменений до и после отжига горячеуплотненных титановых компактов и компактов с субмикронной карбидной упрочняющей фазой. Из чего необходимо сделать выводы по проделанной работе.
Перечень графического материала <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i>	Презентация ВКР в Power Point
Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы <i>(с указанием разделов)</i>	
Раздел	Консультант
<i>Финансовый менеджмент</i>	Маланина Вероника Анатольевна, канд. экон. наук, доцент, доцент ШБИП и отделения социально-гуманитарных наук
<i>Социальная ответственность</i>	Мезенцева Ирина Леонидовна, старший преподаватель ШБИП и отделения общетехнических дисциплин
Названия разделов, которые должны быть написаны на иностранном языке:	
Нет	

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	20.04.2023
-------------------------------------------------------------------------------------------------	------------

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Младший научный сотрудник ИФПМ СО РАН	Фирсина И.А.	канд. техн. Наук		

Задание принял к исполнению обучающийся:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4Б91	Горлышкина Злата Юрьевна		

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 116 с., 18 рис., 20 табл., 56 источников, 2 прил., где 12 табл.

Ключевые слова: карбид титана, порошки титана, структура, горячее уплотнение, механоактивация, отжиг, пористость, микротвердость, прочность.

Объекты исследования: горячеуплотненные компакты из порошков титана, различающихся дисперсностью и химическим составом, а также титаноматричные композиты с карбидной упрочняющей фазой.

Цель работы: исследование закономерности формирования структуры для получения наилучших физико-механических характеристик материалов.

В ходе работы проводилось изучение микроструктуры, объемных изменений до и после отжига горячеуплотненных титановых компактов, а также с субмикронной карбидной упрочняющей фазой, исходный материал которых был подвергнут предварительной механической активации в планетарной мельнице с добавлением жидких углеводов.

В результате исследований установлены режимы горячего уплотнения, обеспечивающие максимальную плотность и прочность пластин, а также исследовано влияние последующего отжига на их структуру и свойства.

Основные технологические и технико-эксплуатационные характеристики: плотные Ti-компакты и титаноматричные композиты Ti-C с высокой твердостью и прочностью при сохранении приемлемой пластичности.

Степень внедрения: результаты исследований частично изложены в статье, принятой в печать в научный рецензируемый журнал «Физика химия обработки материалов».

Область применения: машиностроение и др. сферы промышленности.

В будущем планируется продолжение данной темы с целью повышения физических и механических свойств, полученных титаноматричных композитов с субмикронной карбидной упрочняющей фазой.

ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ, СОКРАЩЕНИЯ

КМ – композиционные материалы.

Термоциклирование – специальное испытание на циклическое воздействие смены температур (от предельно пониженной до предельно повышенной).

Деструкция – процессы распада.

ГУ – горячее уплотнение.

МА – механоактивация.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	12
1 Литературный обзор	16
1.1 Композиционные материалы.....	16
1.2 Классификация композиционных материалов	17
1.3 Металлические композиционные материалы	20
1.3.1 Дисперсно-упрочненные металлические композиционные материалы	23
1.4 Карбид титана. Свойства. Применение	25
1.5 Получение композиционных материалов методом порошковой металлургии	27
1.5.1 Подготовка порошков к прессованию	30
1.5.2 Формование порошков	31
1.5.2.1 Компактирование заготовок и изделий из титановых порошков и смесей на его основе	34
1.5.3 Спекание порошковых материалов	36
1.5.4 Методы интенсификации процессов спекания и синтеза тугоплавких соединений. Механическое активирование.....	39
1.6 Структура порошковых композитов.....	42
2 Постановка задачи. Материалы и объекты исследования. Методы и методика получения и исследования материалов. Оборудование.....	46
2.1 Постановка задачи	46
2.2 Материалы исследования.....	49
2.3 Объекты исследования.....	50
2.4 Методы и методика получения образцов.....	52
2.5 Оборудование, методы и методика исследования образцов.....	53
3 Практическая часть.....	58
3.1 Объемные изменения при ГУ и ГУ+отжиг пластин из порошков титана	58
3.2 Микроструктура пластин из порошков титана.....	60
3.2.1 Микроструктура пластин после горячего уплотнения и дополнительного отжига	61
3.2.2 Микроструктура пластин из порошков ПТОМ-1, ПТМ-1, ТПП-8 после МА (60 минут) + этанола и ГУ	63
3.2.3 Микроструктура ГУ пластин из порошков титана ТПП-8 с добавкой этанола, подвергнутого различной длительности МА.....	65

3.3 Рентгенофазовый анализ ГУ пластин из МА порошка титана при вариации времени МА	67
3.4 Микротвердость пластин из порошков титана ПТОМ-1, ПТМ, ТПП-8	69
3.4.1 Микротвердость пластин из порошков титана ПТОМ-1, ПТМ, ТПП-8 для ГУ, МА + этанол + ГУ, ГУ + отжиг	69
3.4.2 Микротвердость МА + этанол + ГУ пластин из порошка ТПП-8 при вариации времени обработки МА	71
ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»	72
4 Введение в финансовый менеджмент	73
4.1 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	73
4.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования	73
4.1.2 SWOT-анализ	74
4.2 Планирование научно-исследовательских работ	77
4.2.1 Структура работ в рамках научного исследования	77
4.2.2 Определение трудоемкости выполнения работ и разработка графика проведения	78
4.3 Бюджет научно-технического исследования	81
4.3.1 Расчет материальных затрат научно-технического исследования	82
4.3.2 Расчет амортизации специального оборудования	82
4.3.3 Основная заработная плата исполнителей темы	83
4.3.4 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)	85
4.3.5 Формирование бюджета затрат НТИ	86
4.4 Выводы по разделу	86
ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»	87
5 Введение в социальную ответственность	89
5.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	90
5.1.1 Правовые нормы трудового законодательства	90
5.1.2 Организационные мероприятия обеспечения безопасности	91
5.2 Производственная безопасность	91
5.2.1 Анализ показателей шума	92
5.2.2 Повышенный уровень локальной вибрации	93
5.2.3 Запылённость	93
5.2.4 Отсутствие или недостаток необходимого искусственного освещения	94

5.2.5 Анализ электробезопасности	95
5.3 Экологическая безопасность.....	96
5.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях.....	97
5.5 Выводы по разделу.....	98
6 Основные выводы бакалаврской работы	99
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	101
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	103
ПРИЛОЖЕНИЕ А СОСТАВЫ МАТЕРИАЛОВ.....	109
ПРИЛОЖЕНИЕ Б МИКРОТВЕРДОСТЬ	111

ВВЕДЕНИЕ

Современный мир находится в постоянном развитии и требует непрерывного совершенствования эксплуатационных характеристик изделий и оборудования за счет применения новых конструкционных материалов и технологий получения прочных и износостойких передовых материалов, таких как композиты на основе титана. Композиционные материалы (КМ) имеют более высокий уровень служебных характеристик по сравнению с характеристиками отдельных структурных элементов. Титан и титановые сплавы являются перспективными материалами для использования в разных отраслях (авиационная промышленность, машиностроение, производство инструмента различного назначения, в том числе, металлорежущего, медицинского, бытового и др.), благодаря своей прочности, низкой плотности, высоким механическим свойствам, коррозионной стойкости.

Невысокая поверхностная твердость титановых сплавов является одним из основных препятствий использования их для производства ряда изделий в упомянутых выше областях техники. Объемная термообработка повышает твердость, но снижает пластичность, ударную вязкость, вязкость разрушения, что приводит к образованию трещин и разрушению материала. Повысить твердость поверхностного слоя металла можно также с помощью тонкого защитного покрытия на основе нитрида или карбида, полученного методами газотермического напыления и ионно-плазменным осаждением на поверхность готовой детали. Указанный метод не позволяет в полной мере использовать преимущества тугоплавких соединений титана из-за незначительной толщины напыляемого слоя.

Также ограничивает применение титановых сплавов и их относительно низкая стойкость к окислению поверхности при температурах более 600°C на воздухе.

Дальнейшее повышение служебных характеристик необходимо для повышения их конкурентоспособности по сравнению Ni-сплавами или с высокопрочными сталями. Одним из способов повышения служебных

характеристик титановых сплавов является их использование в качестве матрицы для композиционных материалов: дисперсно-упрочненных, армированных волокнами, слоистых [1, 2, 3].

Титаноматричные композиты с дисперсной упрочняющей фазой могут применяться в виде объемных материалов, полученных методами порошковой металлургии как конструкционные материалы для широкого спектра промышленных изделий, так и в качестве износостойких покрытий, наносимых на поверхности деталей современной техники методами напыления, наплавки и аддитивных технологий. Дисперсно-упрочненные титаноматричные композиты тугоплавкими соединениями углерода с титаном представляют особый научный интерес.

Известен наноструктурный композиционный материал на основе чистого титана с размером зерна ≤ 250 нм, дисперсно-упрочненный наноразмерными частицами карбида или нитрида титана, с размером частиц 2-10 нм, полученный изостатическим термическим прессованием механической смеси титана и нитридных и карбонитридных микрочастиц. При этом упрочняющие частицы равномерно распределены в объеме материала, а их общая доля в объеме материала составляет 0,05-0,50 об.%. Полученный материал с содержанием упрочняющих компонентов до 0,5 об.% не может обеспечить высоких эксплуатационных свойств в условиях высоких длительных статических и динамических нагрузок [4]. Согласно общепринятым представлениям для получения металломатричного композита с высокой прочностью в сочетании с приемлемой пластичностью упрочняющие частицы должны иметь субмикронный размер и объемную долю не более 10 %.

Для получения дисперсно-упрочненных титаноматричных композитов в литературе упоминаются также методы, основанные на механохимической активации с последующей деформационно-термической обработкой, которая нередко довольно энергозатратна и не обеспечивает необходимой твердости для производства, к примеру, режущего инструмента. Исследование и

оптимизация этих методов является ключевым моментом для перехода на новый уровень разработки титаноматричных композитов.

Физико-механические и триботехнические свойства титаноматричных композитов во многом определяются не только свойствами упрочняющей фазы и матрицы, но и такими структурными характеристиками, как дисперсность и объемная доля твердой упрочняющей фазы. Поэтому исследование закономерностей формирования структуры титаноматричных композитов и установление способов целенаправленного регулирования указанных выше структурных характеристик является *актуальной и важной в научном и прикладном отношении задачей*.

Целью настоящей работы являлось:

– рассмотреть закономерности формирования структуры порошковых титаноматричных композитов с субмикронной карбидной упрочняющей фазой. Отдельная *практическая задача работы* заключалась в установлении режимов обработки порошков с целью получения наилучших конкурентоспособных физико-механических характеристик исследуемых материалов.

Новизна работы. Предложена методика получения композиционного титаноматричного материала системы Ti-C, упрочненные субмикронными частицами нестехиометрического карбида титана $TiC_{0,5}$ методом горячего уплотнения, обеспечивающим деформацию со сдвиговой компонентой, дающей дополнительный прирост пластичности, и/или дополнительным кратковременным отжигом порошка титана, который был подвергнут предварительной механической активации в планетарной мельнице с добавлением жидких углеводородов.

Практическая значимость. Установлены режимы горячего уплотнения (ГУ), обеспечивающие максимальную плотность и прочность пластин, спрессованных титановых порошков, используемых в работе, отличающихся дисперсностью и содержанием примесей, а также исследовано влияние последующего отжига на их структуру и свойства.

Реализация результатов работы. Порошки композиционного титаноматричного материала, упрочненного субмикронными частицами после обработки по предложенной в работе методике, были использованы для получения композиционных СВС порошков «TiC+Ti матрица», которые, в свою очередь, были эффективно использованы для электроннолучевой наплавки износостойких покрытий на титановую подложку.

Кроме того, полученные металломатричные композиционные порошки могут быть использованы для получения плотных композитов консолидацией (наряду с использованным в работе горячим уплотнением) другими методами: спекание, горячее прессование, искровое плазменное спекание (SPS), аддитивные технологии (SLS, SLM).

Публикации. Результаты исследований, представленные в данной работе, частично изложены в статье «Горячее уплотнение титановых порошков при деформации со сдвиговой компонентой», принятой в печать в научный рецензируемый журнал «Физика химия обработки материалов».

Место проведения исследований, проекты. Исследования были проведены в институте Физики прочности и материаловедения СО РАН в лаборатории Физики консолидации порошковых материалов. Работа проводилась в рамках государственного задания ИФПМ СО РАН, тема номер FWRW-2021-0005 и при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 23-29-00106).

1 Литературный обзор

1.1 Композиционные материалы

Композиционными называют сложные материалы, в состав которых входят сильно отличающиеся по свойствам нерастворимые или мало растворимые друг в друге компоненты, разделённые в материале ярко выраженной границей [5].

В настоящее время в различных отраслях производства используется множество композиционных материалов. Сочетание различных свойств композиционных материалов позволяет применять их в авиастроении, машиностроении, медицине и других сферах промышленности. Достижение необходимых эксплуатационных характеристик деталей машин, как правило, требует разработки новых композиционных материалов, и является сложной и актуальной задачей современной науки.

Согласно [6], к композитам относятся материалы, обладающие следующими характеристиками:

- 1) Состав, форма и распределение структурных компонентов материала;
- 2) Материал состоит из двух или более структурных компонентов, различающихся по химическому составу и разделённых выраженной границей;
- 3) Свойства материала зависят от каждого из его компонентов, которые в связи с этим должны присутствовать в достаточно больших количествах (больше некоторого критического содержания);
- 4) Материал обладает такими свойствами, которых не имеют его компоненты, входящие в их состав, например, твердость в сочетании с пластичностью или прочность при малом удельном весе. Для оптимизации свойств выбирают компоненты с резко отличающимися, но дополняющими друг друга свойствами;

5) Материал неоднороден в микромасштабе и однороден в макромасштабе.

Отличительной особенностью композиционных материалов является то, что в них проявляются в большей мере достоинства компонентов, а не их недостатки. Вместе с тем композиционным материалам присущи свойства, которыми не обладают отдельные элементы, входящие в их состав, например, твердость в сочетании с пластичностью или прочность при малом удельном весе. Для оптимизации свойств выбирают компоненты с резко отличающимися, но дополняющими друг друга свойствами.

В композите присутствует основа, называемая матрицей (связкой), которая соединяет компоненты, обеспечивая сохранение необходимой формы и размера изделия [7]. Наполнитель или упрочняющая фаза определенным образом распределена в объеме связки и придает ей специфичные свойства. Между связкой и упрочняющей фазой существует четко выраженная граница раздела [8].

В настоящее время известны несколько способов классификации КМ. Они разделены по различным признакам. Рассмотрим их подробнее.

1.2 Классификация композиционных материалов

Наиболее часто используется классификация из источника [6], в основу которой положено деление КМ по типу матричного материала (рисунок 1). В соответствии с этой классификацией композиционные материалы делятся на полимерные (ПКМ), металлические (МКМ), керамические (ККМ), углерод-углеродные (УУКМ) и гибридные (ГКМ). Гибридные композиты представляют собой материалы с матрицей смешанного типа.

По природе компонентов композиционные материалы (КМ) делят на четыре группы:

- 1) С содержанием компонентов из металлов или сплавов;
- 2) С содержанием компонентов из неорганических соединений (оксидов, карбидов, нитридов и др.);

- 3) С содержанием неметаллические элементов (углерод, бор и др.);
- 4) С содержанием компонентов из органических соединений (эпоксидные, полиэфирные, фенольные и другие смолы).



Рисунок 1 – Классификация КМ по типу материала

В зависимости от геометрии армирующих элементов и их взаимного расположения композиты бывают изотропными (материалы, имеющие одинаковые свойства во всех направлениях) или анизотропными [9]. Свойства анизотропных материалов зависят от направления в исследуемом объекте. Анизотропию КМ, как правило, специально предусматривают при проектировании материала для того, чтобы обеспечить необходимый уровень свойств изделия.

Известна также классификация КМ по геометрии компонентов [10]. Она основана на понятии элементарного образца КМ, т.е. такого минимального объема материала, который характеризуется всем комплексом основных признаков КМ. В самом общем случае элементарный образец КМ должен иметь все три размера, существенно превосходящие минимальный размер компонентов (рисунок 2). Согласно такой классификации КМ подразделяются на три основные группы:

- 1) Материалы с нульмерными компонентами (все три размера компонентов являются величинами одного и того же порядка);
- 2) Материалы с одномерными компонентами (один из размеров компонентов значительно превышает два других и соизмерим с характерным размером элементарного образца КМ);

3) Материалы с двумерными компонентами (два размера компонентов значительно превосходят третий и соизмеримы с характерным размером элементарного образца КМ).

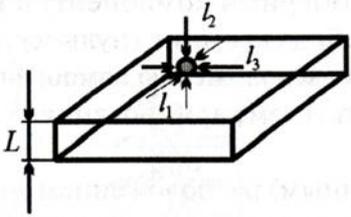
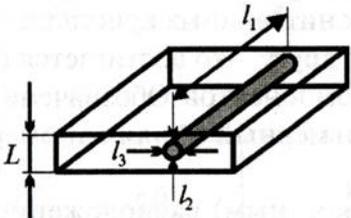
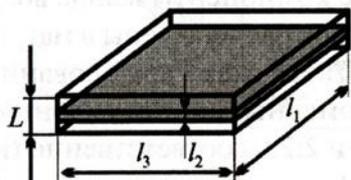
Наименование компонента	Геометрия компонента	Соотношение размеров
Нульмерный		$\frac{l_1}{L} \ll 1; \frac{l_2}{L} \ll 1; \frac{l_3}{L} \ll 1$
Одномерный		$\frac{l_1}{L} \sim 1; \frac{l_2}{L} \ll 1; \frac{l_3}{L} \ll 1$
Двумерный		$\frac{l_1}{L} \sim 1; \frac{l_2}{L} \ll 1; \frac{l_3}{L} \sim 1$

Рисунок 2 – Классификация КМ по геометрии компонентов

Кроме КМ с нульмерными, одномерными и двумерными компонентами созданы комбинированные КМ, содержащие два или три компонента различной размерности.

По форме наполнителя композиционные материалы разделяют на дисперсно-упрочненные, волокнистые и слоистые. Дисперсно-упрочненными называют композиционные материалы, упрочненные нульмерными наполнителями, а волокнистыми – упрочненные одномерными, слоистыми – двумерными наполнителями. Для дисперсно-упрочненных композитов, в отличие от волокнистых, характерно отсутствие анизотропии свойств (рисунок 3). В слоистых композитах в качестве наполнителя применяют плоские листы бумаги, ткани или асбеста.

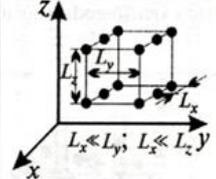
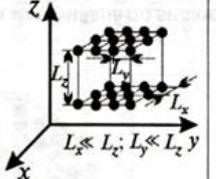
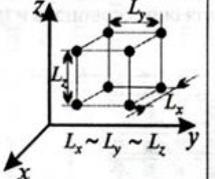
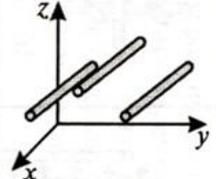
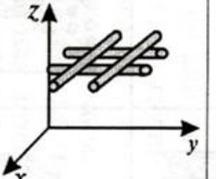
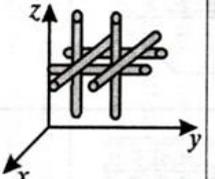
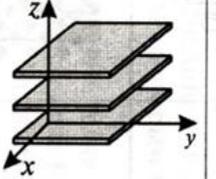
Геометрия компонента		Расположение компонентов					
Наименование	Обозначение	одноосное (линейное)		двухосное (плоскостное)		трехосное (объемное)	
		Схема	Обозначение	Схема	Обозначение	Схема	Обозначение
Нульмерный	0'		0':0':0'		0':0':0'		0':0':0'
Одномерный	1		1:0:0		1:1:0		1:1:1
Двумерный	2	—	—		2:2:0	—	—

Рисунок 3 – Классификация композиционных материалов по схеме армирования

1.3 Металлические композиционные материалы

В МКМ сочетаются достоинства конструкционных металлических материалов и наполнителя различной природы. Композиционные материалы на металлической основе имеют более высокие значения служебных характеристик, зависящих от свойств матрицы.

Выделим основные преимущества МКМ по сравнению с композитами на других основах:

- 1) Механические свойства: высокие значения характеристик, зависящих от свойств матрицы (предел прочности и модуль упругости в направлении, перпендикулярном оси армирующих волокон; высокая пластичность, вязкость разрушения; сохранение прочностных характеристик до температур плавления основного металла);
- 2) Физические свойства: высокая тепло- и электропроводность;
- 3) Химические свойства: негорючесть (по сравнению с КМ на полимерной основе);

4) Технологические свойства: хорошая деформируемость, обрабатываемость.

Композиты с металлической матрицей разделяют на армированные волокнами (волокнистые композиты); наполненные тонкодисперсными частицами, не растворяющимися в основном металле (дисперсно-упрочненные композиты) и слоистые. В первом случае, при нагружении материала основную нагрузку будут воспринимать волокна. Прочность композиционных (волокнистых) материалов определяется свойствами волокон; матрица в основном должна перераспределять напряжения между армирующими элементами [11]. Поэтому модуль упругости и прочность волокон должны быть значительно выше, чем аналогичные характеристики матрицы. Металлические композиционные материалы, как правило, малопластичны. Однако волокна в МКМ уменьшают скорость распространения трещин, зарождающихся в матрице, и практически полностью исключают внезапное хрупкое разрушение. Стоит отметить, что матрица может передавать напряжение волокнам только в том случае, когда существует прочная связь на поверхности раздела армирующее волокно – матрица. Анизотропия свойств волокнистых композиционных материалов учитывается при конструировании деталей для оптимизации свойств путем согласования поля сопротивления с полями напряжения.

В дисперсно-упрочненные МКМ искусственно вводят мелкие равномерно распределенные тугоплавкие частицы карбидов, оксидов, нитридов и других, не взаимодействующие с матрицей и не растворяющиеся в ней вплоть до температуры плавления фаз. Чем мельче частицы наполнителя и меньше расстояние между ними, тем прочнее МКМ. Более мягкая матрица воспринимает на себя внешнюю нагрузку, а дисперсные твердые частицы выполняют функцию дислокационного барьера, препятствуя движению дислокаций и, таким образом, повышая предел прочности и текучести материала. Такие включения называются дисперсной упрочняющей фазой.

Слоистые МКМ набираются из чередующихся слоев наполнителя и матричного материала (типа «сэндвич»). Слои наполнителя могут иметь различную ориентацию. Возможно [1] поочередное использование слоев наполнителя из разных материалов с разными механическими свойствами.

Металлические КМ получают широким диапазоном способов, а классификация по способу их получения представлена на рисунке 4.

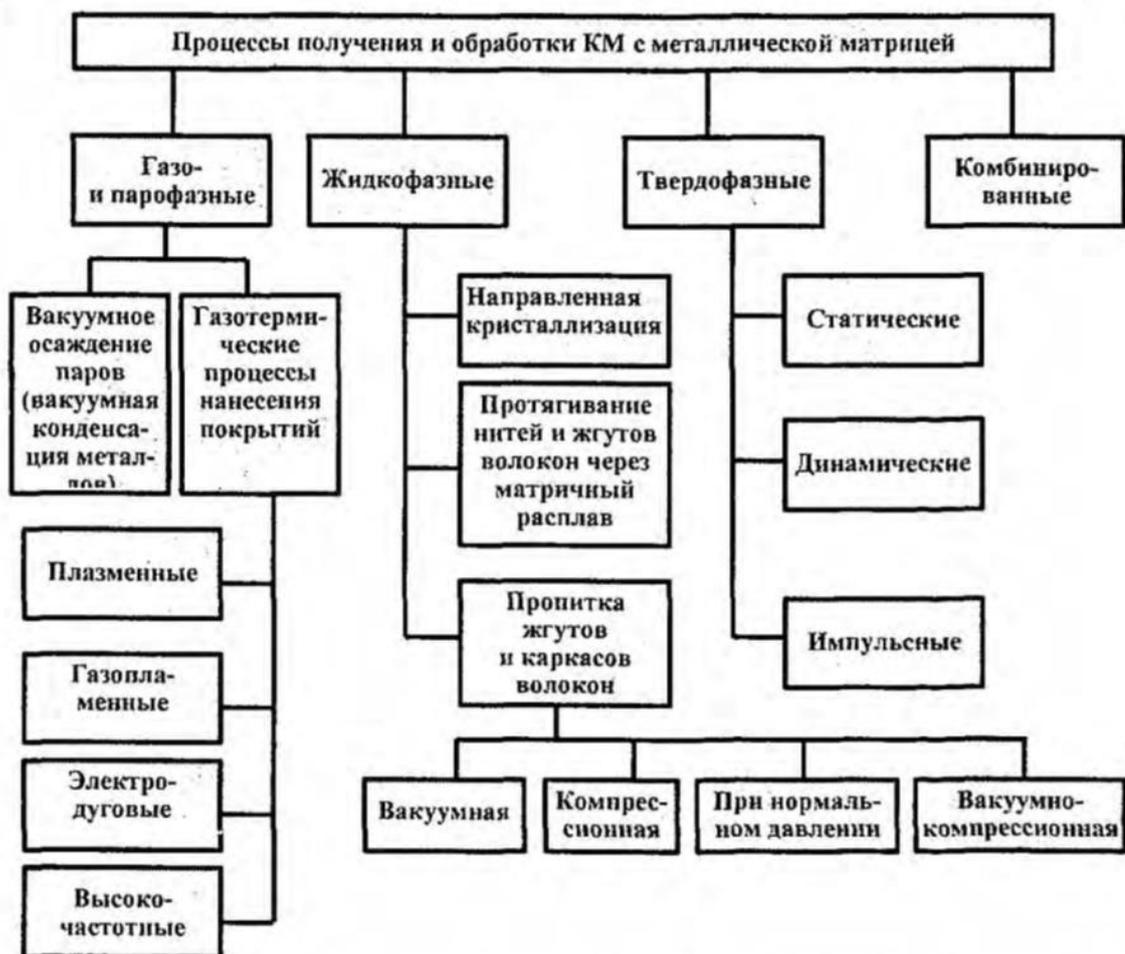


Рисунок 4 – Общая классификация для КМ с металлической матрицей

В зависимости от агрегатного состояния матричного материала в процессе изготовления существуют твердо-, жидко-, газо- и парофазные, а также комбинированные методы получения МКМ.

В качестве матриц в МКМ выступают никель, алюминий, магний, титан, медь, интерметаллические соединения и сплавы, как например легированные стали и чугуны.

Положительным моментом является возможность использования традиционного оборудования для изготовления МКМ. С другой стороны, значительные сложности при производстве МКМ вызывают высокая температура их получения и взаимодействие армирующего наполнителя и матрицы, приводящие к деградации их свойств. Кроме того, различное термическое расширение наполнителя и матрицы приводит к разрушению композита при термоциклировании. Наконец, композит может иметь меньшую коррозионную стойкость, чем матрица, вследствие изменения микроструктуры композита и разницы электрохимического потенциала наполнитель-матрица. Поэтому отдельный интерес представляют МКМ с дисперсным упрочнением.

1.3.1 Дисперсно-упрочненные металлические композиционные материалы

Дисперсно-упрочненные КМ получают методами порошковой металлургии или введением наполнителей в жидкий металл перед разливкой. В качестве упрочняющей фазы используют частицы оксидов, карбидов, нитридов, боридов, интерметаллических соединений.

Материалы матриц для изготовления МКМ: легкие металлы и сплавы на основе алюминия и магния; сплавы на основе титана, меди, жаропрочные и жаростойкие сплавы на основе железа, никеля и кобальта; тугоплавкие сплавы на основе вольфрама, молибдена и ниобия и др. Наиболее широко применяются дисперсно-упрочнённые композиционные материалы на основе металлов с невысокой плотностью (Al, Mg, Ti) и сплавы на их основе, а также жаропрочного никеля.

Материалы на основе алюминия называются спечённым алюминиевым порошком (САП) и состоят из алюминия и чешуек Al_2O_3 (в количестве до 18%). Материал САП характеризуется высокой прочностью, жаропрочностью, коррозионной стойкостью и термической стабильностью свойств. С увеличением содержания окиси алюминия повышается прочность,

твёрдость, жаропрочность и уменьшается пластичность. Из САП изготавливают поршневые штоки, лопатки компрессоров, лопасти вентиляторов и турбин, обмотки трансформаторов.

В материалах на основе никеля в качестве матрицы используют никель и его сплавы с хромом (до 20%) со структурой твёрдых растворов. Материалы на основе никеля обладают высокой жаростойкостью, стойкостью к разупрочнению с повышением температуры. Из никелевых МКМ изготавливают детали двигателей, подверженные воздействию температур до 1573 К и невысоких напряжений. Области применения этих материалов не ограничены. В МКМ с никелево-хромовой матрицей, содержащей алюминий, и в более сложнолегированных матрицах упрочнение дисперсными частицами сочетается с упрочнением интерметаллидными фазами, выделяющимися из твердого раствора при старении. Уровень их механических свойств очень высок. МКМ на основе никеля и его сплавов применяются главным образом в авиационной и космической технике для изготовления лопаток газовых турбин, камер сгорания, форсажных камер авиационных двигателей, теплозащитных панелей, а также сосудов и трубопроводов, работающих при высоких температурах в агрессивных средах [1].

Титан и титановые сплавы являются очень привлекательными материалами для перспективных сфер применения благодаря их свойствам: низкой плотности, высоким механическим свойствам и коррозионной стойкости. Одним из способов совершенствования титановых сплавов является их применение в качестве матрицы для упрочненных композиционных материалов (КМ), которые обладают очень хорошими механическими свойствами [12]. Дисперсно-упрочненные материалы на основе титана с оксидами и карбидами служат для изготовления компрессорных дисков и других изделий, эксплуатируемые при 873-973 К.

В качестве упрочняющей фазы используют дисперсные порошки оксидов, карбидов, нитридов, боридов и других тугоплавких соединений.

Отдельный интерес среди перечисленных выше дисперсных упрочняющих фаз представляет кубический карбид титана, который отличается высокой температурой плавления, твердостью, стойкостью в агрессивных средах и износостойкостью. Свойства карбида титана достаточно детально изучены и представлены в литературе [13-15]. Твердость карбида титана максимальна по сравнению с твердостью других металлических карбидов с кубической решеткой (ZrC, HfC, VC). Перед карбидами других металлов, обладающими похожими свойствами, карбид титана также имеет преимущество по стоимости сырья для получения карбидов.

1.4 Карбид титана. Свойства. Применение

Данное вещество представляет собой соединение углерода и металлического титана (химическая формула TiC). Диаграмма состояния системы Ti–C представлена на рисунке 5.

В системе титан-углерод существует одна карбидная фаза TiC с широкой областью гомогенности (37-50 ат.% углерода). Карбид кристаллизуется в кубической сингонии, период кристаллической решетки зависит от содержания углерода и изменяется в пределах 0,4299-0,4329 нм. Соединение обладает высокой тугоплавкостью $T_{пл} = 3420 \text{ K}$ и микротвердостью в пределах Н_ц 2800-3200.

Углерод понижает температуру плавления Ti от 1663 до $1653 \pm 7^\circ\text{C}$ – температуры эвтектической кристаллизации $\text{Ж} \leftrightarrow \beta\text{Ti} + \text{TiC}$; в эвтектике содержится 1,5 ат.% C. Растворимость C в Ti при эвтектической температуре составляет 0,55 ат.%. Углерод повышает температуру $\alpha \leftrightarrow \beta$ -превращения Ti от 882°C – температуры перитектоидной реакции образования αTi . Растворимость C в βTi при температуре 920°C составляет 0,5 ат. % и в αTi – 2 ат.% согласно источнику [16].

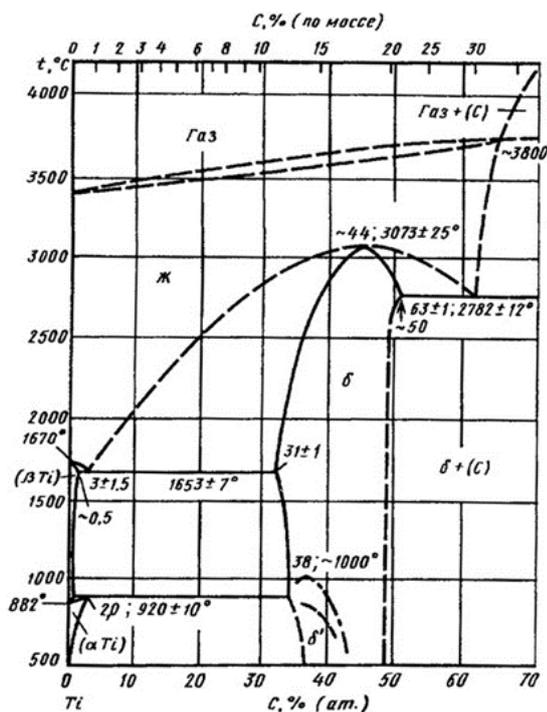


Рисунок 5 – Диаграмма состояния Ti-C

Карбид титана в зависимости от метода и технологии получения имеет вид: волокон, покрытий, монокристаллов или порошков. Чаще всего используют материал в виде порошка.

Отличается особыми прочностными характеристиками, жаропрочностью и стойкостью к действию некоторых кислот (серной и соляной). Способно выдерживать резкие температурные скачки. Плавится карбид титана без разложения, а при нагревании в вакуумной среде свыше 3000 °C выделяет пары, содержащие повышенное количество титана. Понижение же электропроводности при увеличении температуры указывает на явный металлический характер этого соединения. На прочностные свойства карбида титана главное влияние оказывает пористость и значительно меньше сказывается дефектность TiC по углероду, способ изготовления и размер зерен образцов. Например, с увеличением пористости образцов из карбида титана на 5% их прочность уменьшается вдвое.

Для горячепрессованных образцов из карбида титана с плотностью 96% прочность вплоть до температуры 1000 °C составляет ~ 500 МПа, но затем происходит ее резкое падение. Одной из причин небольшой

высокотемпературной прочности карбида титана является наличие в нем примесей (Fe, Co, Si и $C_{\text{своб}}$), которые сегрегируются на границах зерен и образуют легкоплавкие фазы. Для увеличения высокотемпературной прочности проводят вакуумную обработку ($T = 2150 \text{ }^\circ\text{C}$; $t = 10 \text{ ч}$), которая значительно снижает уровень примесей на границах зерен. При температурах ниже $400 \text{ }^\circ\text{C}$ механизм разрушения карбида титана имеет в основном хрупкий характер, а при более высокой температуре наблюдается переход в хрупко-вязкую область. При уменьшении содержания связанного углерода в карбиде титана температура хрупко-вязкого перехода снижается ($\text{TiC}_{1.05} \sim 1400 \text{ }^\circ\text{C}$, $\text{TiC}_{0.97} \sim 900 \text{ }^\circ\text{C}$). Микротвердость карбида титана уменьшается от 31500 до 15000 МПа при увеличении дефектности TiC по углероду [13].

Карбид титана современный сверхтвердый материал. Свойства дают возможность использовать титан карбида в конструировании деталей различных машин. Добавление TiC в сплавы существенно повышает их свариваемость. Кроме того, этот материал широко применяется в производстве абразивных паст для обработки материалов. Изготовленное из титана карбида оборудование позволяет в несколько раз ускорить обработку разного рода сталей и увеличить производительность труда горной, металлообрабатывающей и рудной промышленностях. Используют титана карбид и в инструментальной, и других видах промышленности.

1.5 Получение композиционных материалов методом порошковой металлургии

Порошковая металлургия [17] – область техники, охватывающая процессы получения порошков металлов и металлоподобных соединений и процессы изготовления изделий из них без расплавления.

Характерной особенностью порошковой металлургии является применение исходного материала в виде порошков, из которых прессованием формируются изделия заданной формы и размеров. Полученные заготовки

подвергаются спеканию при температуре ниже температуры плавления основного компонента.

Основными достоинствами технологии производства изделий методом порошковой металлургии являются:

- 1) Возможность изготовления деталей из тугоплавких металлов и соединений, когда другие методы использовать невозможно;
- 2) Значительная экономия металла за счет получения изделий высокой точности, в минимальной степени нуждающихся в последующей механической обработке (отходы составляют не более 1-3%);
- 3) Возможность получения материалов максимальной чистоты;
- 4) Простота технологии порошковой металлургии.

Методом порошковой металлургии изготавливают тугоплавкие металлы, твердые сплавы, жаропрочные и дисперсно-упрочненные материалы, алмазно-металлические материалы, пористые материалы: антифрикционные и фрикционные, фильтры; электропроводники, конструкционные детали, в том числе работающие при высоких температурах и в агрессивных средах, материалы для атомной техники.

Порошковые жаропрочные материалы можно разделить на три основные группы:

- 1) Материалы на основе тугоплавких металлов: вольфрама, молибдена, ниобия, тантала, рения, циркония;
- 2) Материалы на основе соединений тугоплавких металлов с углеродом (карбиды), бором (бориды), азотом (нитриды), кремнием (силициды);
- 3) Композиционные материалы на основе тугоплавких окислов.

Первая группа материалов недостаточно жаростойка и, как правило, не может применяться без защитных покрытий, предохраняющих от окисления. Решение такой задачи пока возможно для температур до 600 °С, а для длительной работы при температурах выше 2000 °С. Перспективными являются соединения второй группы, обладающие высокой температурой

плавления (в пределах 2000-4000 °С), высокой прочностью межатомной связи, высокой твердостью и металлической природой (высокой тепло- и электропроводностью, металлическим блеском).

Материалы, предназначенные для работы при высоких температурах, должны отвечать сложному комплексу требований, в частности иметь высокие показатели жаропрочности (прочность при высокой температуре), жаростойкости (сопротивление окислению), термостойкости (сопротивление тепловому удару) и эрозионной стойкости (сопротивление износу). Тугоплавкие соединения обладают высокой жаропрочностью, а если учесть их сравнительно малый удельный вес, то значительно превосходят в этом отношении металлические жаропрочные сплавы. Однако наряду с высокими показателями жаропрочности и жаростойкости твердые соединения тугоплавких металлов обладают значительной хрупкостью и зачастую не могут быть использованы в чистом виде, так как легко разрушаются от тепловых ударов, вибраций и прочих воздействий. Чтобы устранить этот недостаток, необходимо повысить пластичность таких материалов, что осуществляется введением в твердое соединение соответствующей пластичной связки. При этом необходимо помнить, что жаропрочность в целом определяется свойствами как твердого соединения, так и металлической связки.

Применение методов порошковой металлургии позволило получить новые жаропрочные материалы, пластические свойства, теплопроводность и электропроводность которых обеспечиваются металлическим компонентом, а упрочнение – введением в металлическую основу дисперсных частиц. Благодаря стабильности свойств при повышенных температурах такие дисперсно-упрочненные материалы привлекают заслуженное внимание, так как главным недостатком современных конструкционных материалов является именно потеря прочности при высоких температурах. Дисперсно-упрочненные материалы содержат в своей структуре дисперсные частицы (обычно окисные тугоплавкие), равномерно распределенные в металлической

матрице. Размер дисперсных частиц и расстояние между ними определяют свойства материала. Обычно их размер составляет менее 0,1 мкм, расстояние между частицами – также порядка 0,1 мкм.

Дисперсные включения вводят в металлы и сплавы следующими методами:

- механическим смешиванием,
- механическим легированием,
- реакционным смешиванием,
- химическим смешиванием,
- разложением смесей солей,
- поверхностным окислением,
- внутренним окислением,
- водородным восстановлением в растворах,
- химическим осаждением из растворов.

Введение дисперсных включений тугоплавких соединений в металлы и сплавы позволяет значительно повысить физико-механические свойства металлической основы при высоких температурах, получить ценные с практической точки зрения сочетания свойств и значительно расширить области использования особенно широко распространенных цветных металлов и сплавов. Дисперсно-упрочненные материалы могут успешно применяться в теплообменниках, электровакуумных приборах, в авиа- и ракетостроении, в химическом машиностроении, в электротехнике и многих других отраслях народного хозяйства. Перспективность технологии дисперсного упрочнения обуславливает быстрое расширение диапазона материалов этого типа и разработку различных методов получения дисперсно-упрочненных материалов.

1.5.1 Подготовка порошков к прессованию

Подготовка порошков к прессованию состоит из классификации их по размерам, смешивания и предварительной обработки. Порошки с размерами

частиц 40-50 мкм и более разделяют просеиванием на ситах, а более мелкие частицы разделяют воздушной сепарацией. После составления смеси порошков необходимого гранулометрического и химического состава приступают к смешиванию. Для смешивания порошков применяют барабаны с эксцентриковой осью вращения, шаровые и вибрационные мельницы и другие смешивающие устройства. При необходимости особо тщательного перемешивания компонентов шихты применяют мокрое смешивание в мельницах с добавкой к шихте спирта или дистиллированной воды. В процессе смешивания можно вводить технологические присадки различного назначения: пластификаторы, облегчающие процесс прессования и получение более прочного брикета (парафин, стеарин, глицерин, раствор каучука в бензине, олеиновая кислота и др.); легкоплавкие присадки, активизирующие процесс спекания и летучие вещества, позволяющие получать изделия с заданной пористостью. Для повышения текучести порошка и возможности объемного дозирования при автоматическом прессовании его подвергают гранулированию, т. е. изготавливают из отдельных частиц порошка гранулы (зерна) определенной величины, обладающие достаточной прочностью для сохранения своей формы до момента прессования. Предварительную обработку порошков – механическую или термическую (отжиг) – применяют для повышения пластичности, прессуемости и спекаемости порошков. Классифицированные, смешанные и предварительно обработанные порошки в виде шихты поступают на прессование [18].

1.5.2 Формование порошков

Формование складывается из подготовки порошков к прессованию, процесса прессования, выпрессовки заготовок, контроля качества прессовок. Подготовка порошков к прессованию состоит из очистки, отсева на фракции по величине частиц, смешивания, иногда грануляции, механической или термической обработки.

Рассев порошков (классификация) производится для получения порошков с частицами определенного размера (фракций), которые поступают на следующую операцию – смешивание. После отсева отбирают только нужные для данного технологического процесса фракции. Классификация порошков с крупностью выше 40-50 мкм производится с помощью сит, а более тонких – методом воздушной сепарации.

Главной задачей смешивания является получение однородной по химическому составу шихты. Однородность шихты зависит от способа смешивания, продолжительности, гранулометрического состава и плотности порошков. Различают сухое (механическое) и мокрое (химическое) смешивание.

Сухое смешивание производят в шаровых мельницах, конусных или вибрационных смесителях, мокрое – в спирте, бензине или дистиллированной воде. Мокрое смешивание обладает рядом преимуществ перед сухим: получается более однородная смесь; происходит более интенсивное перемешивание; отсутствует распыление мелких частиц по всему объему смесителя и запыление воздуха в цехе.

В ряде случаев при смешивании для улучшения текучести порошков производят их грануляцию (укрупнение). Для облегчения прессования труднопрессуемых порошков при смешивании (или грануляции) вводят специальные склеивающие или пластифицирующие вещества. Кроме того, в шихту могут вводиться добавки для улучшения процессов спекания или обеспечения определенной пористости изделий.

Механическая обработка применяется в том случае, когда требуется дополнительно измельчить порошок. Для этого обычно используют шаровые или молотковые мельницы.

Очистка порошков необходима вследствие загрязнения их оксидами, продуктами износа материала мельниц и дробящих тел. Очистка осуществляется химическими, гидромеханическими или магнитными методами.

Термическая обработка (отжиг) производится для снятия наклепа (понижения твердости), улучшение структуры и обрабатываемости материалов, снятие внутренних напряжений, рафинирования химического состава в результате удаления углерода и других примесей, уменьшения окисленности. Результатом отжига нередко бывает укрупнение частиц. Если необходимо снять наклеп, то отжиг производится при температуре $\sim 0,4$ от абсолютной температуры плавления металла порошка, т. е. выше температуры рекристаллизации. Обязательным при отжиге является применение защитной или восстановительной атмосферы [19].

Методы формования порошковых и композиционных материалов и заготовок весьма разнообразны (рисунок 6).

По времени действия их можно подразделить на прерывные и непрерывные, по принципам приложения давления – на постепенно возрастающие, мгновенно возрастающие и вибрационные, по направлению или схеме формования – на односторонние, двусторонние, всесторонние и центробежные, по применяемой температуре – на холодное формование при комнатной температуре и горячее при повышенной, по атмосфере – на формование на воздухе, в вакууме и в инертной среде.

К прерывным методам относится большинство случаев формования, когда имеет место поштучное изготовление изделий: формование на разного рода прессах (гидравлических, механических, вибрационных), а также различные виды изостатического (всестороннего) формования – гидростатическое в тонких оболочках, изостатическое в толстостенных эластичных оболочках, горячее изостатическое, взрывное.

К непрерывным методам, при помощи которых можно получать изделия значительной длины, относятся клиновое формование, мундштучное (экструзия) и прокатка металлических порошков. Кроме того, к методам формования относится так называемое шликерное литье, которое практически осуществляется без приложения давления.



Рисунок 6 – Методы формования металлических порошков

1.5.2.1 Компактирование заготовок и изделий из титановых порошков и смесей на его основе

Изделия из титана и его сплавов конструкционного назначения получают преимущественно по технологиям традиционной металлургии: «плавка → горячая деформация → механообработка».

С целью дальнейшего удешевления предпринимаются попытки исключить стадию плавки из технологии получения компактных изделий или полуфабрикатов из титана. В большинстве случаев это достигается горячей деформацией пористых заготовок, полученных холодным прессованием и последующим спеканием титанового порошка. Из традиционных квазистатических методов компактирования пористых заготовок можно выделить два основных (горячего прессования и горячее изостатическое прессование). Оба этих метода требуют специализированного оборудования и защитной среды для порошков или прессовки от окисления. При этом успех не всегда гарантируется. В работе [20] после обработки в газостате (960 °С, 140 МПа, 270 мин) пористых предварительно спеченных заготовок из отсева губчатого титана уплотнение произошло только в поверхностном

слое толщиной до 1500-1600 мкм. Пористость нижележащей части заготовок осталась неизменной.

Чаще используют динамические методы компактирования титановых порошков (гидродинамический, магнитодинамический, электроразрядный, взрывной). Во всех случаях мерой интенсивности воздействия на порошок служит либо энергия движущегося ударника, либо скорость удара. Описаны и менее распространенные методы высокоскоростного компактирования, например, давлением на слой порошка плазмы, возникающей при взрывном испарении алюминиевой фольги электрическим разрядом [21]. При высокоскоростном нагружении происходит мгновенный нагрев порошка и его пластификация. Однако из-за кратковременности термомеханического воздействия не удается получить полностью беспористый материал. В большинстве случаев динамическим компактированием получают заготовки для последующего спекания. При этом одновременно с увеличением плотности происходит диффузионное сращивание смежных порошинок, что обеспечивает высокую прочность и пластичность спеченного материала.

Для уменьшения пористости спеченных заготовок их дополнительно подвергают горячей деформации, обычно динамической (штамповка). При одностороннем прессовании в закрытом штампе из-за трения о стенки матрицы степень уплотнения и пористость меняются по высоте прессовки. Для предотвращения или уменьшения этой неоднородности применяют двустороннее прессование [22] или прессование с противодавлением [23]. С точки зрения повышения физико-механических свойств горячепрессованных порошковых заготовок считается установленным полезное влияние сдвиговых деформаций [24-25]. При боковом относительном смещении смежных порошинок происходит удаление окисных пленок с образованием контакта ювенильных поверхностей. Для включения сдвиговой компоненты деформации при горячей штамповке применяют пресс-формы специальной конструкции, на которых реализуется «режим с элементами истечения» [26]. В этом случае плотность 99,8-100% достигается при давлении 560-650 МПа,

в то время как при штамповке в закрытом штампе при давлении 700-800 МПа плотность не превышает 98-98,5% [27]. Температура нагрева под горячее уплотнение сильно влияет на плотность и пластичность. Приемлемая пластичность проявляется только после горячей деформации титановых заготовок, нагретых при 850 °С и выше. Деформация по схеме, обеспечивающей сдвиговую компоненту, дает дополнительный прирост пластичности. При нагреве под штамповку на воздухе пористых титановых заготовок возможно окисление поверхностного слоя, особенно при печном нагреве [28]. Поэтому необходимо использовать индукционный нагрев или защитную атмосферу.

1.5.3 Спекание порошковых материалов

После холодного формования порошковые заготовки обладают чрезвычайно низкими механическими свойствами и иногда при приложении даже самого незначительного усилия могут снова рассыпаться в порошок. Для повышения механической прочности и придания изделиям необходимых физико-химических свойств сформованные заготовки подвергаются термической обработке (нагреву), называемой спеканием, одной из конечных операций технологии изготовления изделий методом порошковой металлургии.

Это процесс получения высокоплотных и пористых материалов (изделий) из мелких порошкообразных или пылевидных материалов (матричные металлы и армирующие наполнители) при повышенных температурах. Спекание, как правило, проводят в атмосферной или вакуумной печи. В большинстве случаев вакуумное спекание позволяет достичь лучших результатов, так как тонкодисперсные металлические порошки имеют повышенную склонность к окислению в кислородсодержащих средах.

Спекание производится при температуре 0,6-0,9 абсолютной температуры плавления металла порошка в случае однокомпонентной шихты

или же температуры плавления основного металла в многокомпонентной системе порошков. В процессе спекания в результате количественного и качественного изменения контактов между частицами, обусловленного большой подвижностью атомов при повышенных температурах, увеличивается поверхность сцепления частиц, контакт из неметаллического становится металлическим, повышается прочность изделия, изменяются его размеры и свойства. При спекании происходят следующие основные явления:

- повышение подвижности атомов, обусловленное температурным эффектом и вызывающее изменение объема изделия;
- изменение контактной поверхности частиц (преимущественно их увеличение);
- амортизация (релаксация) остаточных напряжений и изменение формы частиц;
- рекристаллизация, являющаяся одним из проявлений изменения контактной поверхности частиц;
- перемещение частиц, связанное с изменением объема и пористости порошковых тел;
- восстановление окислов и удаление адсорбированных жидкостей и газов;
- изменение физических и механических свойств, вызванное изменением величины и характера контакта между структурными элементами порошкового металла и изменением структуры самих частиц.

Все явления, сопровождающие процесс спекания порошков, прямо или косвенно связаны с количественными или качественными изменениями контакта между частицами и с объемной деформацией частиц.

Процесс спекания во времени, с повышением температуры, можно условно разделить на ряд стадий. В начальной стадии спекания между частицами существует неметаллический контакт. Для этой стадии характерно незначительное повышение прочности и увеличение контакта, что можно

объяснить удалением влаги с поверхностного слоя окислов. Усадка в этом периоде крайне незначительна из-за наличия растягивающих остаточных напряжений, созданных формованием. При дальнейшем повышении температуры спекания часто наблюдается восстановление окислов, в результате которого неметаллический контакт между частицами превращается в металлический. Следующая стадия характеризуется значительным ростом металлического контакта вследствие подвижности атомов металла, начинается изменение формы частиц (собирабельная рекристаллизация).

В зависимости от дисперсности порошка эта стадия спекания начинается при температуре 20-40% температуры плавления. Наблюдаемая амортизация остаточных напряжений заканчивается к началу последней стадии спекания, которая характеризуется сильным увеличением скорости диффузионных процессов, полным восстановлением окислов и началом роста частиц. В зависимости от дисперсности порошков эта стадия спекания начинается при температуре 50-75% температуры плавления основного компонента. Для большинства чистых порошковых металлов температура спекания почти совпадает с температурой начала роста частиц, так как при более низкой температуре трудно получить достаточную прочность материала, а при более высокой наблюдается чрезмерный рост зерна. Для металлов, образующих трудновосстановимые окислы, препятствующие росту частиц, температура спекания выше и приближается к точке плавления. Чем выше температура спекания, тем быстрее заканчивается усадка и достигаются наиболее высокие механические свойства. Выдержка при спекании колеблется от нескольких минут (для небольших загрузок и изделий) до суток и более (при больших загрузках, крупных и сложных изделиях и плохой спекаемости материала).

Способы спекания различаются по методам нагрева, по среде, окружающей изделие, по составу порошка, из которого изготовлено изделие, и другим факторам. Для спекания порошковых изделий применяются печи

самого разнообразного типа как по конструкции, так и по способу нагрева. Выбор типа печи зависит от режима спекания (температура, продолжительность и характер спекания), режима охлаждения, химического состава изделий, их количества, формы и величины [29].

Спекание осуществляют двумя способами: твердофазным (по мере нагрева заготовок не образуется жидкий расплав одного из компонентов), и жидкофазным (в ходе повышения температуры нагрева поликомпонентных заготовок наиболее легкоплавкий компонент начинает вступать в жидкое агрегатное состояние – плавиться). Весьма распространенным является также способ горячего формования, объединяющий в себе процессы прессования и спекания. В завершение процесса может быть реализован ряд дополнительных отделочных операций, включая обработку резанием, калибрование, нитроцементацию, диффузионное хромирование, нанесение гальванического покрытия и пропитку готовых изделий с тем, чтобы добиться требуемой точности заданных габаритных параметров, повысить степень прочности и класс поверхностной чистоты [30].

1.5.4 Методы интенсификации процессов спекания и синтеза тугоплавких соединений. Механическое активирование

Целью разработки методов активированного спекания является создание оптимальных условий проведения процесса спекания. При этом стремятся к увеличению степени уплотнения и уменьшению температуры спекания.

Методы интенсификации процессов спекания:

1) Механическое активирование (увеличение свободной энергии и кривизны частиц, уменьшение пути диффузии, получение порошков длительного сухого помола (как кристаллические, так и аморфные), которые более активны при спекании (и более реакционноспособны), чем порошки мокрого помола);

2) Тепловое активирование спекания (максимальная температура спекания и скорость подъема температуры);

3) Химическое активирование спекания (введение добавок, образующие жидкую фазу, которые должны хорошо смачивать и иметь меньшую вязкость, или добавок, не образующие с основным материалом жидкой фазы и влияющие на рост кристаллов:

– активирующие процесс спекания и одновременно ускоряющие рекристаллизацию (TiO в Al_2O_3 , Li_2O в MgO др.);

– активирующие спекание, но замедляющие процесс рекристаллизации (MgO или BeO в Al_2O_3);

– замедляющие процесс спекания и рост зерен (CaO, CoO/CdO в Al_2O_3).

В технологии наиболее широко используется механическая активация. Наряду с ней существуют техника горячего прессования, уплотнение взрывом и кратковременное спекание (термическая активация процессов спекания с помощью увеличения температуры и скорости нагревания). Основные факторы механической активации – увеличение активности поверхности и кристаллической решетки, за счет образования дефектов и дислокаций при пластической деформации частиц, фазовым превращениям и даже аморфизации кристаллов, что влияет на их химическую активность.

Механоактивация происходит, когда скорость накопления дефектов превышает скорость их исчезновения. Это реализуется в так называемых энергонагружаемых аппаратах: центробежных, планетарных и струйных мельницах, дезинтеграторах и др., где сочетаются высокие частота и сила механического воздействия. Механоактивация широко применяется для получения тугоплавких соединений и композитов.

Классы обрабатываемых материалов [31]:

– оксиды (например, Al_2O_3 , SiO_2 , TiO_2 , MgO, ZnO и др.);

– карбиды (SiC , B_4C , TiC и др.);

– нитриды (AlN , Si_3N_4 и др.);

– металлы, интерметаллиды и их сплавы (W, Mo, NiTi и др.);

– композиционные материалы природного и синтетического происхождения (шунгит, бокситы, керметы, ситаллы и др.)

– твердофазные отходы;

– растительное сырьё.

Следствия механохимической активации [31]:

– снижение температуры спекания продуктов помола;

– улучшение механических свойств материалов (снижение пористости, повышение прочности и улучшение пластических свойств и др.);

– повышение реакционной способности твердых реагентов.

Часть механической энергии, подведенной к твердому телу во время активации, усваивается им в виде новой поверхности, линейных и точечных дефектов. Известно, что химические свойства кристаллов определяются наличием в них дефектов, их природой и концентрацией.

Механоактивация смеси численно равна суммарному изменению свободной энергии системы под действием механических сил.

Одно из главных положений механоактивации заключается в том, что может быть механоактивация без измельчения, но не может быть измельчения без активации. Отсюда следует, что, во-первых, нельзя разделить измельчение и активацию: любое измельчение есть активация, так как под действием внешних сил увеличивается запас энергии измельчаемого вещества хотя бы за счет увеличения поверхностной энергии; во-вторых, любой измельчающий аппарат является механоактиватором.

Помол в любом аппарате даёт активацию обрабатываемого материала в большей или меньшей степени.

Каждый компонент в смеси играет свою собственную роль, имеет характерное строение кристалла, различную твёрдость, способность к размалываемости и активации. В связи с этим, каждый компонент смеси необходимо активировать в соответствии с его свойствами по отдельному режиму механоактивации. Для механоактивации различных компонентов

смеси необходимо регулировать вес помольной загрузки за счёт использования мелющих тел, изготовленных из различных материалов.

Механоактивация материалов в мельницах является наиболее распространенной технологической операцией в современном производстве.

1.6 Структура порошковых композитов

Ранее в разделе 1.2 о классификации КМ упоминалось, что по механической структуре композиты делятся на несколько основных классов: волокнистые, слоистые, дисперсно-упрочнённые, упрочнённые субмикронными частицами и нанокомпозиты. Волокнистые композиты армируются волокнами или нитевидными кристаллами. Даже небольшое содержание наполнителя в композитах такого типа приводит к существенному улучшению механических свойств материала. Широко варьировать свойства материала позволяет также изменение ориентации размера и концентрации волокон. В слоистых композиционных материалах матрица и наполнитель расположены слоями, как, например, в триплексах (многослойное стекло), фанере, клееных деревянных конструкциях и слоистых пластиках. Микроструктура остальных классов композиционных материалов характеризуется тем, что матрицу наполняют частицами армирующего вещества, а различаются они размерами частиц. В композитах, упрочнённых частицами, их размер больше 1 мкм, а содержание составляет 20-25 % (по объёму), тогда как дисперсно-упрочнённые композиты включают в себя от 1 до 15 % (по объёму) частиц размером от 0,01 до 0,1 мкм. Размеры частиц, входящих в состав нанокомпозитов, еще меньше и составляют 10-100 нм [32].

Структуру дисперсно-упрочнённых композиционных материалов подразделяют на два типа – агрегатная и дисперсная. В агрегатной структуре частицы упрочняющей фазы окружены несколькими зёрнами матрицы, которые имеют различную кристаллографическую ориентацию, а в дисперсной структуре частицы упрочняющей фазы окружены матрицей,

имеющие одинаковую ориентацию. Преобладание той или иной структуры определяется способом получения порошковых смесей. Процесс получения должен быть таким, чтобы обеспечить создание стабильной дислокационной структуры, способствующей многократному повышению прочности и сохранению пластичности. В некоторых случаях при прессовании удается существенно улучшить структурные параметры по сравнению с параметрами исходных порошкообразных смесей за счет измельчения частиц.

Чтобы сделать порошковый материал конкурентоспособной со штамповкой, необходимо добиться высоких механических свойств. Большая часть свойств зависит от химического состава и микроструктуры, а степень чистоты будет сказываться на сопротивлении мало- и высокоцикловой усталости, вязкости разрушения. Можно регулировать окончательную микроструктуру, а, следовательно, и окончательный уровень свойств и чувствительность к инородным частицам путем изменения структуры частиц порошка, режима компактирования и термической обработки после компактирования [33].

Так присутствие водорода приводит к увеличению твердости и хрупкости. Например, титан наиболее активный элемент и связывает большое количество водорода, но с повышением температуры растворимость его снижается в 10 раз в интервале температур 300-1100 °С [34]. Спекание титана, так же как и других металлов, обладающих повышенным сродством ко всем газам, кроме инертных, осуществляется в атмосфере аргона или гелия или в вакуумных печах.

На микроструктуру оказывают немаловажное влияние также пористость и плотность. Пористость может быть открытая – это отношение объема пор, сообщающихся с внешней средой, к объему порошковой формовки, и закрытая – отношение объема пор, не сообщающихся с внешней средой, к объему порошковой формовки. Контроль пористости композитов при расчете и проектировании конструкционных материалов для различных отраслей материаловедения крайне важен. Многие физико-химические и

эксплуатационные свойства композиционных материалов зависят как от компонентного состава, так и в значительной степени от имеющихся в них дефектов, проявляющихся в виде пор, трещин, являющихся концентраторами напряжения. Увеличение пористости приводит к уменьшению содержания связующего в материале, происходит ослабление структурного каркаса порошкового композитного материала. Это влечет к непосредственному снижению плотности композита, в результате ухудшается качество получаемых материалов [35].

Для всех порошковых материалов, увеличение плотности приводит к существенному повышению прочности и пластичности [36].

Различают насыпную плотность – это отношение массы порошка при свободной насыпке к его объёму, истинную плотность – это отношение массы порошкового продукта к его объёму при нулевой пористости порошка. Для определения насыпной плотности применяют метод с использованием воронки или метод волюмометра «Скотта». Плотность спеченных изделий определяют геометрическим измерением объема и взвешиванием или путем гидростатического взвешивания. Насыпная плотность учитывает не только объем частиц материала, но и пространство между ними, поэтому насыпная плотность гораздо меньше, чем истинная.

Можно выделить две группы порошковых материалов в зависимости от плотности и назначения: плотные это материалы с минимальной пористостью, полученные на основе порошков титана, железа, меди, никеля, алюминия и их сплавов; и пористые, в которых после окончательной обработки свыше 10-15% пор по объёму. Процесс уплотнения-консолидации можно подразделить на три стадии. Первая стадия уплотнения характеризуется значительным преобладанием разгружающей деформации, нарушающей контакты, над нагружающей деформацией. Обычно в этой стадии формовка под нагрузкой или еще не успевает консолидироваться в связное тело, или после снятия нагрузки превращается в несвязное тело. Вторая стадия характерна для пластичных и средней твердости металлов.

Третья стадия характеризуется значениями коэффициента консолидации равным или близким к единице [37].

Поскольку исходная микроструктура частиц порошка, их химический состав и степень чистоты, плотность и пористость оказывают решающее влияние на конечные механические свойства изделий, необходимо изучить эти параметры для всех видов порошков, чтобы иметь возможность выбрать наилучшую технологию изготовления порошкового композита для заданной области применения.

2 Постановка задачи. Материалы и объекты исследования. Методы и методика получения и исследования материалов. Оборудование

2.1 Постановка задачи

Из обзора литературных источников известно, что титан и его сплавы обладают высокой удельной прочностью и стойкостью в агрессивных средах, хотя имеют существенный недостаток: низкая износостойкость в контактных парах и в условиях воздействия абразива. Для повышения износостойкости в титан и его сплавы вводят упрочняющую фазу в виде дисперсных частиц тугоплавких соединений, среди которых наибольший интерес представляет карбид титана. Дисперсные частицы карбида титана, равномерно распределенные в титановой матрице, обеспечивают многократное увеличение износостойкости титана и его сплавов. Дисперсноупрочненные частицами карбида титана композиты на основе титана и их сплавов представляют научный и прикладной интерес. Известны методы получения титаноматричных композитов из порошков карбида титана и титана методами традиционной металлургии, например, спеканием, изостатическим горячим прессованием (HIP) и искровое плазменное спекание (SPS), которые позволяют получать малопористый материал из порошков и порошковых смесей.

Необходима разработка новых методов получения титаноматричных композитов с дисперсным карбидным упрочнением, позволяющих снизить энергозатратность и повысить физико-механические свойства полученных композитов.

Дисперсность и объемная доля упрочняющей карбидной фазы являются основными параметрами структуры, которые определяют механические свойства и триботехнические характеристики композита.

Предложенная в работе технология исключает стадию плавки из технологии получения компактных изделий или полуфабрикатов из титана

конструкционного назначения традиционной металлургии: «плавка → горячая деформация → механообработка». Для уменьшения пористости спеченных заготовок обычно их дополнительно подвергают горячей деформации, обычно динамической (штамповка). При одностороннем прессовании в закрытом штампе из-за трения о стенки матрицы степень уплотнения и пористость меняются по высоте прессовки. Для предотвращения или уменьшения этой неоднородности применяют двустороннее прессование [38] или прессование с противодавлением [39]. При боковом относительном смещении смежных порошинок происходит удаление окисных пленок с образованием контакта ювенильных поверхностей. Деформация по схеме, обеспечивающей сдвиговую компоненту, дает дополнительный прирост пластичности [40-41]. При нагреве под штамповку на воздухе пористых титановых заготовок возможно окисление поверхностного слоя, особенно при печном нагреве [42]. Поэтому необходимо использовать индукционный нагрев или защитную атмосферу. Доля сдвиговой деформации при штамповке в закрытом штампе тем больше, чем меньше диаметр уплотняемой заготовки диаметра матрицы штампа. Однако при большом различии этих диаметров, также как при свободной осадке возможно растрескивание периферийных областей прессовки из-за сильной неоднородности деформации в радиальном направлении [43]. Для предотвращения этого растрескивания необходим постоянный боковой подпор уплотняемой заготовки. Это требование было реализовано в настоящей работе. При использованной в работе схеме горячего уплотнения титановых порошков предотвращается периферийное растрескивание и одновременно обеспечивается большая доля сдвиговой компоненты деформации, повышающей прочность и пластичность.

Согласно общепринятым представлениям для получения металлматричного композита с высокой прочностью в сочетании с приемлемой пластичностью упрочняющие частицы должны иметь субмикронный размер и объемную долю не более 10%.

Наша попытка получить титаноматричные композиционные порошки, упрочненные субмикронной карбидной фазой путем двух последовательных технологических операций, а именно: интенсивной обработкой порошковой смеси титана с углеродом (сажей) в планетарной мельнице и кратковременным нагревом механоактивированной (МА) смеси с целью синтеза карбида титана, не получили ожидаемого результата.

Согласно нашей оценке для получения 10 об.% $TiC_{0,5}$ в титановой матрице к титану необходимо добавить около 1 масс.% углерода. Однако согласно результатам рентгеноструктурного анализа в смеси титана с 1% углерода (сажи), в которую был добавлен этанол для уменьшения налипания порошка после интенсивной механоактивации и последующего кратковременного нагрева до 900 °С было обнаружено 22,9 об.% карбида титана, почти втрое больше, (таблица А.1). Уменьшение добавки сажи мало повлияло на содержание карбида. Более того, даже после обработки титанового порошка без добавки сажи получено 9,6 об.% карбида титана. Было сделано предположение, что углерод попадает в титановый порошок в результате деструкции этанола.

Мы оценили содержание газовых примесей в титановом порошке, предположив, что этанол (C_2H_5OH) разлагается в процессе механоактивации, а кислород, водород и углерод, освободившиеся при его разложении, а также содержащиеся в неразложившемся остатке (в случае неполного разложения) целиком растворяются в решетке титана (таблица А.2).

В работе предложен способ получения объемных титаноматричных композитов, упрочненных субмикронными частицами карбида титана. Способ заключается в горячем уплотнении порошковых смесей титана, подвергнутого интенсивной механоактивации в планетарной мельнице в среде аргона с добавлением этанола. Известно [44], что МА реакционных смесей служит эффективным инструментом влияния на структуру и фазовый состав продуктов синтеза. Практической целью работы было установить режимы механоактивации, при которой образуется необходимая объемная

доля карбидной фазы в процессе деструкции этанола для достижения максимальных физико-механических свойств композитов, и горячего уплотнения (ГУ), обеспечивающие максимальную плотность и прочность пластин, спрессованных из трех использованных титановых порошков, отличающихся дисперсностью и содержанием примесей, а также исследовать влияние последующего отжига на их структуру и свойства.

2.2 Материалы исследования

В рамках учебной исследовательской работы в 6 семестре (февраль – июнь 2022 года) было проведено ознакомление с методикой получения образцов из порошковых смесей титана марок ПТМ-1, ТПП-8 с добавлением сажи П-803 с вариацией объемной доли. Принято участие в получении горячеуплотненных пластин из данных механоактивированных порошковых смесей. Полученные пластины были подвергнуты полировке для проведения оптической металлографии и измерения объемной доли карбидных зерен без учета пористости, а также среднего размера карбидных зерен в предположении их сферичности для каждого состава с помощью программ «JMicroVision 1.2.7» и «ImageJ».

Было показано, что дисперсность карбидной фазы не изменялась в зависимости от увеличения содержания углерода с 0,2 об.% до 1,0 об.% в смесях и находится в пределах разброса (таблица А.3). При этом объемное содержание карбидной фазы увеличилось, например, для порошковой смеси ПТМ-1 + С (сажа) с 13,13 до 22,23 об.%. Расчётные данные согласовались с результатами рентгеноструктурного анализа (таблица А.1).

Как уже упоминалось в разделе 2.1, было сделано предположение, что источником углерода для образования карбида титана служат продукты деструкции C_2H_5OH в процессе интенсивной механоактивации титанового порошка в присутствии этанола, который был добавлен для уменьшения налипания порошка при интенсивной механоактивации. Результатом взаимодействия титана с продуктами деструкции углеводородов является

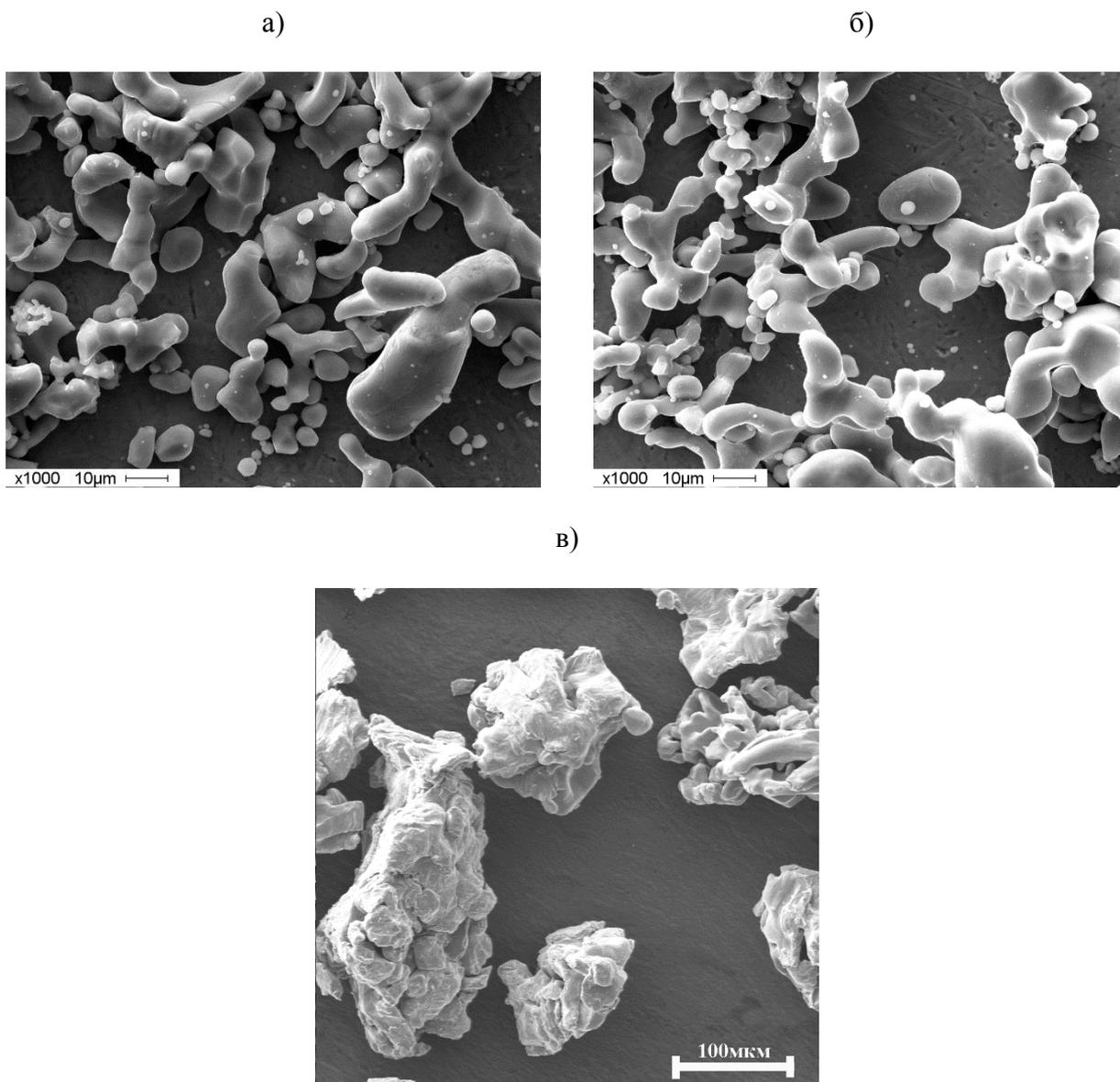
образование карбида и гидрида титана и сложных карбогидридных фаз Ti(C,H). Предположение о деструкции этанола в процессе механоактивации порошка титана и их смесей с углеродом подтверждалось также и результатами химического анализа механоактивированного титанового порошка в присутствии этанола (таблица А.2).

Полученные результаты легли в основу дальнейшего исследования титаноматричных композитов, полученных горячим уплотнением предварительно механоактивированных порошков титана в среде аргона с добавлением этанола с дальнейшей дополнительной термической обработкой с целью определения влияния режимов механоактивации, горячего уплотнения и синтеза на структуру, фазовый состав и микротвердость получаемых компактов и композитов.

В рамках учебной исследовательской работы в 7 (сентябрь – ноябрь) 2023 года) и в 8 (февраль – апрель 2023 года) семестрах были исследована микроструктура, измерены плотность и микротвердость полученных горячеуплотнённых компактов и композитов из чистых порошков титана без механоактивации и предварительно механоактивированных с добавлением этанола в планетарной мельнице до и после отжига. Материалы, методы и методики исследования, полученные основные результаты и выводы изложены ниже.

2.3 Объекты исследования

В работе использовались три марки (рисунок 7) промышленных порошков титана – ПТМ-1, ПТОМ-1, ТПП-8, различающиеся дисперсностью и химическим составом. Согласно сертификату качества поставщика ООО «БВБ Альянс», г. Екатеринбург, порошок ПТМ-1 имеет средний размер 45 мкм, а порошок ПТОМ-1 – менее 40 мкм. Порошок ТПП-8 по ТУ 1791-449-05785388-99 имеет средней размер до 160 мкм (таблица 1). Порошки получены методом восстановления гидридом кальция и имеют несферическую дендритную форму.



а – ПТМ-1; б – ПТОМ-1; в – ТПШ-8
 Рисунок 7 – Форма исходных титановых порошков

Химический состав порошков приведен в таблице 1, согласно которой вне зависимости от марки порошка имеются примеси железа, никеля и кальция.

Таблица 1 – Химический состав исходных порошков ПТОМ-1, ПТМ-1 и ТПШ-8

Марка	Fe	Ni	Ti	Ca	C	Si	N ₂	N	H ₂	Cl
ПТОМ-1	0,18	0,14	осн.	0,07	0,045	0,1	0,08	-	0,35	0,003
ПТМ-1	0,19	0,20	осн.	0,05	0,05	0,05	0,07	-	0,32	0,004
ТПШ-8	0,29	-	осн.	-	-	-	-	0,025	-	0,13

сборок. После охлаждения пластинки из спрессованного порошка освобождали от стальной оболочки. Размер пластинок в поперечном сечении составлял $(2,6 \pm 0,2) \times (21 \pm 1,0)$ мм в зависимости от вида титанового порошка и давления горячего уплотнения. Плотность пластинок, спрессованных под разным давлением, определяли методом гидростатического взвешивания. Часть из полученных после прессования пластин подвергали отжигу при температуре 870 °С с выдержкой 2 часа или 1300°С, 1 час. Из пластин вырезали образцы, полученных при давлении 600 МПа, размером 2,5 × 10 × 32 мм для приготовления шлифов и исследования.

2.5 Оборудование, методы и методика исследования образцов

Плотность пластинок, спрессованных под разным давлением, определяли методом гидростатического взвешивания по ГОСТ 15139-69 с помощью аналитических весов ВЛР-200 (рисунок 9) с точностью взвешивания до 0,001 г.



Рисунок 9 – Внешний вид ВЛР-200

Метод позволяет вычислить плотность жидкостей и твердых тел на основании закона Архимеда. Суть метода гидростатического взвешивания заключается в замерах, которые происходят в два этапа: вначале в воздухе, а потом в жидкости с известными точными значениями плотности жидкости.

При взвешивании в воде подставка для стакана устанавливалась над чашкой весов таким образом, чтобы иметь достаточную высоту для

свободного перемещения чаши. Образчик подвешивался на стойкой к коррозии проволоке диаметром 0,04-0,06 мм. Масса образца была 6-10 г.

Плотность вычисляли по формуле (1):

$$\gamma = \frac{m_1 \cdot \gamma_{\text{в}}}{(m_1 - m_2)}, \quad (1)$$

где m_1 , m_2 – массы образца, взвешенного, соответственно, на воздухе и в воде, г; $\gamma_{\text{в}}$ – плотность воды, г/см³.

Пористость вычисляли по формуле (2):

$$\eta = \frac{\rho_{\text{теор}} - \rho_{\text{обр}}}{\rho_{\text{теор}}} \cdot 100\%, \quad (2)$$

где $\rho_{\text{обр}}$ – плотность образца (г/см³), $\rho_{\text{теор}}$ – плотность беспористого материала, в качестве которой использовали справочную плотность титана (4,51 г/см³).

Уплотнение всех образцов было рассчитано по формуле (3):

$$\eta = \frac{\rho_{\text{кон}} - \rho_{\text{нач}}}{\rho_{\text{кон}}} \cdot 100\%, \quad (3)$$

где $\rho_{\text{кон}}$ – плотность образца после отжига (г/см³), $\rho_{\text{нач}}$ – плотность образца после горячего уплотнения (г/см³).

Металлографические шлифы готовились с помощью автоматической шлифовально-полировальной машины ATM SAPHIR 520 (рисунок 10), где доступны последовательность по времени, пониженное давление, контроль скорости, направления вращения, пневматическая регулировка понижения одиночного и центрального давления, также как наличие функции памяти программ и еще ряд характеристик [45].



Рисунок 10 – Внешний вид машины Saphir 520

Металлографические шлифы готовились в три этапа: 1 – подготовка образцов для гнездового держателя образцов, 2 – получение «зеркальной» поверхности и 3 – травление образцов для более контрастного выделения структурных элементов. На первом этапе образцы пластин плоской поверхностью устанавливались на дно цилиндрической формы диаметром 20 мм, затем заливались эпоксидной смолой с отвердителем.

Полученные обоймы шлифовали и полировали на шлифовальных кругах Struers waterproof различной зернистости (200, 120, 64, 46, 22, 15, 8, 5 мкм). Полировка поверхностей осуществлялась с помощью суспензий MetaDi Supreme (9, 6, 3 мкм) на мелкозернистых (менее 3 мкм) специализированных полировочных кругах и на сукне с применением алмазной пасты АСМ2/1 НОМ и АСМ1/0 НОМ, ГОСТ 25593-8, с дисперсностью алмазных включений 2-1 и 1-0 мкм, соответственно.

Скорость вращения при шлифовании составляла около 270 об/мин, при полировании – около 380 об/мин. Время обработки 5-10 мин с контролем качества поверхности шлифа на микроскопе «Альтами МЕТ 1М» (рисунок 11) до получения «зеркальной» поверхности с характерным металлическим блеском.

Металлографический цифровой микроскоп Альтами МЕТ 1М предназначен для исследования микроструктуры металлов и сплавов в отраженном свете в светлом поле при прямом освещении [46].



Рисунок 11 – Внешний вид микроскопа Альтами МЕТ 1М

Для выявления особенностей микроструктуры образцов шлифы были потравлены реактивом Келлера: 95 мл H_2O + 2,5 мл HNO_3 + 1,0 мл $HF(45\%)$ + 1,5 мл HCl , с последующей промывкой под проточной водой и сушкой воздухом.

Измерение микротвердости проводилось на микротвердомере ПМТ-3 (рисунок 12), который предназначен для измерения микротвердости металлов, сплавов, абразивов, керамики и минералов путем вдавливанием алмазного наконечника, имеющего форму пирамиды [47].



Рисунок 12 – Внешний вид микротвердомера ПМТ-3

Отпечатки от алмазного были получены при нагрузке 200 Гс (1,96 Н), с выдержкой под нагрузкой, временем приложения и снятия нагрузки по 7 сек. Измерение проводилось поперек поперечного шлифа в шахматном порядке от края до края по 20 измерений на каждом образце с шагом около 250 мкм.

Значения микротвердости порошков после ГУ и ГУ+отжиг пластин были получены с помощью программы Excel 2013 с использованием формулы (4):

$$\frac{1,854 \times F}{((d_1 - d_2) \times 0,001 \times 0,308)^2} \quad (4)$$

где d_1 , d_2 – начало и конец диагонали в единицах шкалы ПМТ-3; F – нагрузка на наконечник, которая составляла 200 гс (1,96 Н).

Часть результатов исследования порошковых компактов были получены на оборудовании Центра коллективного пользования ИФПМ СО РАН «Нанотех». Оптические изображения микроструктур были получены с помощью микроскопа AXIOVERT-200MAT. Структурно-фазовый анализ компактов был проведен на дифрактометре ДРОН-3 методом рентгеноструктурного анализа и растровой электронной микроскопии (EVO 50, Zeiss, Germany). Для химического анализа на газовые примеси использовали прибор LECO ONH 836, а для анализа на углерод прибор марки AN-7529M. Механоактивацию проводили в планетарной мельнице Activator 2S. Испытания на трехточечный изгиб по ГОСТ 57749-2017 были получены с помощью испытательной машины INSTRON 1185.

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»

Студенту:

Группа	ФИО
4Б91	Горлышкиной Злате Юрьевне

Школа	ИШНПТ	Отделение школы (НОЦ)	ОМ
Уровень образования	Бакалавриат	Направление/специальность	22.03.01 Материаловедение и технологии материалов

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

<p>1. <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i></p>	<p>Стоимость материальных ресурсов и специального оборудования определены в соответствии с рыночными ценами г. Томска, тарифные ставки исполнителей определены штатным расписанием ИФПМ СО РАН. Бюджет для реализации НИ: 2 394 699,94 руб. Человеческие ресурсы: 2 человека (лаборант, научный руководитель).</p>
<p>2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i></p>	<p>Итого страховые отчисления составили: 66 377,3 руб.</p>
<p>3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i></p>	<p>Отчисления во внебюджетные фонды 30,2%</p>

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

<p>1. <i>Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения</i></p>	<p>Расчет конкурентоспособности SWOT – анализ</p>
<p>2. <i>Планирование и формирование бюджета научных исследований</i></p>	<p>Структура работ. Определение трудоемкости. Разработка графика проведения исследования.</p>

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

1. *Оценка конкурентоспособности технических решений*
2. *Матрица SWOT*
3. *График проведения и бюджет НИ*

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	01.04.2023
-------------------------------------------------------------	-------------------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН ШБИП ТПУ	Маланина Вероника Анатольевна	К.Э.Н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4Б91	Горлышкина Злата Юрьевна		

4 Введение в финансовый менеджмент

В настоящее время научные исследования потребляют много человеческих и материальных ресурсов, вследствие чего, ученым необходимо находить инвесторов для сотрудничества или искать финансовую поддержку российского научного фонда. Ученым необходимо иметь полное представление о своих собственных исследованиях, анализировать стоимость исследований и давать оценку практичности и целесообразности научно-исследовательской работы, коммерческой привлекательности конечной продукции данной НИР.

Данный раздел, предусматривает рассмотрение следующих задач:

- оценка коммерческого потенциала разработки;
- планирование научно-исследовательской работы;
- расчет бюджета научно-исследовательской работы;
- определение ресурсной, финансовой, бюджетной эффективности исследования.

Целью данной работы является определение влияния режимов механообработки и термообработки на микроструктуру, плотность и пористость, а также микротвердость компактов и композитов, полученных из порошков титана, отличающихся дисперсностью и содержанием примесей.

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

4.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования

Для дальнейшего внедрения титаноматричных композитов, полученных горячим уплотнением с предварительной механоактивацией в присутствии углеводородов и дополнительной термообработкой в промышленность необходимо определиться с потенциальными потребителями.

Механоактивация дает двукратное увеличение твердости горячеуплотненных титановых порошков и позволяет получить титаноматричный композит с упрочняющей субмикронной карбидной фазой, обладающий высокими физико-механическими свойствами.

Потребителями исследуемого метода могут стать предприятия машиностроительной и авиационной промышленности, производители инструмента различного назначения, в том числе, металлорежущего, медицинского, бытового и других.

4.1.2 SWOT-анализ

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

Первый этап, составляется матрица SWOT, в которой описаны слабые и сильные стороны проекта, выявленные возможности и угрозы для реализации проекта, которые проявились или могут появиться в его внешней среде, приведены в таблице 6.

Таблица 6 – Матрица SWOT-анализа

Сильные стороны	Слабые стороны
С1. Низкая цена исходного сырья.	Сл1. Сложности с получением качественного сырья
С2. Высокая твердость при сохранении достаточной пластичности, однородность фазового распределения по объему, а также износостойкость и прочность покрытий, полученных с применением данных композитов.	Сл2. Долгое время подготовки образца, используемого при проведении научного исследования.
С3. Экологичность технологии.	Сл3. Эксперименты имеют погрешности и неопределенности.
С4. Квалифицированный персонал.	Сл4. Малообъемное производство.
С5. Простота изготовления	Сл5. Устаревшее Недостаточность современного оборудования для проведения испытаний и исследований в свободном доступе.

Продолжение таблицы 6

Возможности	Угрозы
В1. Использование оборудования ИНШПТ ТПУ и ИФПМ СО РАН.	У1. Повышение себестоимости конечного продукта. Снижение стоимости разработок конкурентов.
В2. Увеличение объема спроса на новые разработки.	У2. Появление зарубежных аналогов и их внедрение на рынок.

На втором этапе на основании матрицы SWOT строятся интерактивные матрицы возможностей и угроз, позволяющие оценить эффективность проекта, а также надежность его реализации. Соотношения параметров представлены в таблицах 7-10.

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

		Сильные стороны проекта				
Возможности проекта		C1	C2	C3	C4	C5
	B1	-	-	+	+	+
	B2	+	-	+	+	+

Таблица 8 – Интерактивная матрица проекта «Возможности проекта и слабые стороны»

		Слабые стороны проекта				
Возможности проекта		C1	C2	C3	C4	C5
	B1	-	-	+	+	+
	B2	-	-	+	+	+

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

		Сильные стороны проекта				
Угрозы проекта		C1	C2	C3	C4	C5
	У1	+	-	-	+	-
	У2	+	+	-	+	-

Таблица 10 – Интерактивная матрица проекта «Угрозы проекта и слабые стороны»

		Слабые стороны проекта				
Угрозы проекта		Сл1	Сл2	Сл3	Сл4	Сл5
	У1	+	-	-	+	+
	У2	+	-	-	+	+

Результаты анализа представлены в итоговой таблице 11.

Таблица 11 – Итоговая таблица SWOT-анализа

	<p>Сильные стороны научно-исследовательского проекта</p> <p>C1. Низкая цена исходного сырья.</p> <p>C2. Высокая трещиностойкость и ударопрочность продукции.</p> <p>C3. Экологичность технологии.</p> <p>C4. Квалифицированный персонал.</p> <p>C5. Простота изготовления</p>	<p>Слабые стороны научно-исследовательского проекта</p> <p>Сл1: Сложности с получением качественного сырья</p> <p>Сл2: Долгое время подготовки образца, используемого при проведении научного исследования.</p> <p>Сл3: Эксперименты имеют погрешности и неопределенности.</p> <p>Сл4: Сложности переработки.</p> <p>Сл5: Устаревшее оборудование</p>
<p>Возможности</p> <p>V1: Использование оборудования ИНШПТ ТПУ и ИФПМ СО РАН.</p> <p>V2: Появление потенциального спроса на новые разработки.</p>	<p>Направления развития</p> <p>V1C2C3C4: Высокие механические показатели продукта позволят эффективно внедрять его в различные отрасли, где он будет выступать в качестве экономически более выгодного аналога уже используемых материалов.</p> <p>V2C4C5: Спрос на данный продукт в купе с относительной простотой его изготовления означает, что постанова на массовое производство будет произведена достаточно просто и быстро.</p>	<p>Сдерживающие факторы</p> <p>V1C1C2C5: Использование новейшего оборудования позволит дать более качественную оценку материалам и снизить погрешность эксперимента.</p>
<p>Угрозы</p> <p>U1: Снижение стоимости разработок конкурентов.</p> <p>U2: Появление зарубежных аналогов и более ранний их выход на рынок.</p>	<p>Угрозы развития</p> <p>U1C2. Несмотря на снижение стоимости разработок конкурентов, наши продукты имеют конкурентноспособные физико-механические свойства, хорошую перспективу развития.</p> <p>U2C2. Наши продукты обладают являются более привлекательными на мировом рынке, обладая рядом преимуществ перед другими технологиями получения композитов Ti-C</p>	<p>Уязвимости:</p> <p>U1Cл1Cл1. Введение систем совершенствования производственных процессов для развития технологии полного цикла производства</p>

В результате SWOT-анализа показано, что преимущества разрабатываемой технологии преобладают над ее недостатками. Имеющиеся недостатки не являются критичными, полное или частичное их устранение значительно ускорит процесс внедрения и распространения полученного продукта.

Результаты анализа учтены в дальнейшей научно-исследовательской разработке.

4.2 Планирование научно-исследовательских работ

4.2.1 Структура работ в рамках научного исследования

Планирование комплекса научно-исследовательских работ осуществляется в порядке:

- определение структуры работ в рамках научного исследования;
- определение количества исполнителей для каждой из работ;
- установление продолжительности работ;
- построение графика проведения научных исследований.

Для оптимизации работ удобно использовать классический метод линейного планирования и управления.

Результатом такого планирования является составление линейного графика выполнения всех работ. Порядок этапов работ и распределение исполнителей для данной научно-исследовательской работы, приведен в таблице 12.

Таблица 12 – Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

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

4.2.2 Определение трудоемкости выполнения работ и разработка графика проведения

При проведении научных исследований основную часть стоимости разработки составляют трудовые затраты, поэтому определение трудоемкости проводимых работ является важным этапом составления сметы.

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

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

Где:

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

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

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

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

$$T_{pi} = \frac{t_{ожi}}{Ч_i}, \quad (4.2)$$

Где:

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

$t_{ожi}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения одной работы, человеко-дни;

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

Для перевода длительности каждого этапа из рабочих в календарные дни, необходимо воспользоваться формулой (4.3):

$$T_{ki \text{ инж}} = T_{pi} * k_{\text{кал}}, \quad (4.3)$$

Где:

$T_{ki \text{ инж}}$ – продолжительность выполнения i -й работы в календарных днях;

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

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

Календарный коэффициент определяется по формуле:

$$k_{\text{кал инж}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}}} = \frac{365}{365 - 104 - 14} = 1,48 \quad (4.4)$$

Где:

$T_{\text{кал}}$ – общее количество календарных дней в году;

$T_{\text{вых}}$ – общее количество выходных дней в году;

$T_{\text{пр}}$ – общее количество праздничных дней в году.

Расчеты временных показателей проведения научного исследования обобщены в таблице 13.

Таблица 13 – Временные показатели проведения научного исследования

Название работы	Трудоёмкость работ						Длительность работ в рабочих днях T_{pi}	Длительность работ в календарных днях T_{ki}
	t_{min} , чел-дни		t_{max} , чел-дни		$t_{ожг}$, чел-дни			
	Исп.1	Исп.2	Исп.1	Исп.2	Исп.1	Исп.2		
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1. Составление и утверждение технического задания, утверждение плана-графика	3	-	4	-	3,4	-	3,4	5
2. Календарное планирование выполнения ВКР	2	3	3	4	2,4	3,4	2,9	4
3. Обзор научной литературы	-	7	-	14	-	9,8	9,8	14
4. Выбор методов исследования	-	2	-	4	-	2,8	2,8	4
5. Планирование эксперимента	2	6	4	8	2,8	6,8	4,8	7
6. Подготовка образцов для эксперимента	-	7	-	10	-	8,2	8,2	12
7. Проведение эксперимента	15	15	20	20	15	17	16	24
8. Обработка полученных данных	-	10	-	15	-	12	12	18
9. Оценка правильности полученных результатов	2	3	4	5	2,8	3,8	3,3	5
10. Составление пояснительной записки	-	8	-	10	-	8,8	8,8	13
Итого:	24	61	35	90	26,4	72,6	72	106

Примечание:

Исп. 1 – научный руководитель, Исп. 2 – лаборант.

На основе таблицы составлен календарный план-график выполнения проекта с использованием диаграммы Ганта (таблица 14).

Таблица 14 – Диаграмма Ганта

№	Вид работ	Исп	T _{кi} , кал. дн.	Продолжительность работ												
				февр			март			Апр			май			
				1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
1	Составление и утверждение технического задания, утверждение плана-графика	Исп1	5	□												
2	Календарное планирование выполнения ВКР	Исп1 Исп2	4	□												
3	Обзор научной литературы	Исп2	14		□											
4	Выбор методов исследования	Исп2	4			□										
5	Планирование эксперимента	Исп1 Исп2	7				□									
6	Подготовка образцов для эксперимента	Исп2	12				■	□								
7	Проведение эксперимента	Исп1 Исп2	25						■	□						
8	Обработка полученных данных	Исп2	18									□				
9	Оценка правильности полученных результатов	Исп1 Исп2	5											□		
10	Составление пояснительной записки	Исп2	13													□

Примечание:

■ – Исп. 1 (научный руководитель), □ – Исп. 2 (инженер)

4.3 Бюджет научно-технического исследования

При планировании бюджета научно-технического исследования учитывались все виды расходов, связанных с его выполнением. В этой работе использовать следующую группировку затрат по следующим статьям:

- материальные затраты научно-исследовательской работы (НИР);
- затраты на специальное оборудование для экспериментальных работ;

- основная заработная плата исполнителей темы;
- дополнительная заработная плата исполнителей темы;
- отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления);
- накладные расходы НИР.

4.3.1 Расчет материальных затрат научно-технического исследования

Материальные затраты – это затраты организации на приобретение сырья и материалов для создания готовой продукции.

Данная часть включает затрат всех материалов, используемых при получении композиционного материала на основе промышленных порошков титана – ПТМ-1, ПТОМ-1, ТПП-8. Расчет затрат представлен в таблице 15.

Таблица 15 – Затраты на получение композита на основе Ti-порошков

Наименование статей	Единица измерения	Количество	Цена за ед., руб.	Итого затраты, руб.
Порошок ПТМ-1	100 г	800	199	1 592
Порошок ПТОМ-1	100 г	800	1400	11 200
Порошок ТПП-8	100 г	800	480	3 840
Этанол	100 мл	10000	50	5000
Итого:				21 632

4.3.2 Расчет амортизации специального оборудования

Расчет сводится к определению амортизационных отчислений, так как оборудование было приобретено до начала выполнения данной работы и эксплуатировалось ранее, поэтому при расчете затрат на оборудовании учитываем только рабочие дни по данной теме.

Расчет амортизации проводится следующим образом:

Норма амортизации: рассчитывается по формуле:

$$H_A = \frac{1}{n}, \quad (4.5)$$

Где n - срок полезного использования в количестве лет.

Амортизация оборудования рассчитывается по формуле:

$$A = \frac{H_A * I}{12} * t, \quad (4.6)$$

Где I – итоговая сумма, тыс. руб.; t – время использования, мес.

Таблица 16 – Затраты на оборудование

№ п/п	Наименование Оборудования	Кол-во ед.	Срок полезного использования, лет	Время использования, мес.	H_A , %	Цена оборудования, руб.	Амортизация
1	2	3	4	5	6	7	8
1	Установка для горячего прессования	1	15	1	7	330 000	192 500
2	Аналитические весы «ВЛР-200»	1	20	0,20	5	60 000	5000
3	Шлифовально-полировальная машина АТМ «SAPHIR 520»	1	10	2	10	680 000	1 133 333
4	Микроскоп «Альтами МЕТ 1М»	1	10	0,45	10	550 000	206 250
5	Микротвердомер «ПМТ-3»	1	15	0,75	7	530 000	231 875
Итого:						1 768 958 руб.	

4.3.3 Основная заработная плата исполнителей темы

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

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

$$Z_{осн} = Z_{дн} * T_p \quad (4.7)$$

Где $Z_{дн}$ – среднедневная заработная плата, руб.; T_p – продолжительность работ, выполняемых работником, раб.дн. (таблица 13).

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле.

Для пятидневной рабочей недели (рабочая неделя руководителя):

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_{\text{м}} * M}{F_{\text{д}}} = \frac{51285 * 11,2}{213} = 2696,7 \text{ руб} \quad (4.8)$$

Где $Z_{\text{м}}$ – месячный должностной оклад работника, руб.;

$F_{\text{д}}$ – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дней;

M - количество месяцев работы без отпуска в течение года, где

При отпуске в 28 рабочих дней: $M = 1,2$ месяца; 5 – дневная рабочая неделя;

При отпуске в 56 рабочих дней: $M = 10,3$ месяца, 6 – дневная рабочая неделя.

Для пятидневной рабочей недели (рабочая неделя лаборанта):

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_{\text{м}} * M}{F_{\text{д}}} = \frac{33150 * 11,2}{213} = 1743,1 \text{ руб}, \quad (4.9)$$

Должностной оклад работника за месяц:

Для руководителя:

$$\begin{aligned} Z_{\text{м}} &= Z_{\text{мс}} * (1 + k_{\text{пр}} + k_{\text{д}}) k_{\text{р}} = \\ &= 26300 * (1 + 0,3 + 0,2) * 1,3 = 51285 \end{aligned} \quad (4.10)$$

Для лаборанта:

$$\begin{aligned} Z_{\text{м}} &= Z_{\text{мс}} * (1 + k_{\text{пр}} + k_{\text{д}}) k_{\text{р}} = \\ &= 17000 * (1 + 0,3 + 0,2) * 1,3 = 33150 \end{aligned} \quad (4.11)$$

Где $Z_{\text{мс}}$ – заработная плата, согласно тарифной ставке, руб.;

$k_{\text{пр}}$ – премиальный коэффициент, равен 0,3;

$k_{\text{д}}$ – коэффициент доплат и надбавок, равен 0,2;

$k_{\text{р}}$ – районный коэффициент, равен 1,3 (для г. Томска).

Таблица 17 – Баланс рабочего времени исполнителей

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

Таблица 18 – Расчет основной заработной платы исполнителей

Исполнители НИ	$Z_{мс}, руб$	$k_{пр}$	$k_{д}$	$k_{р}$	$Z_{м}, руб$	$Z_{осн}, руб$	$T_p, раб.дн.$	$Z_{осн}, руб$
Руководитель	26300	0,3	0,2	1,3	51285	2696,7	11,4	24479,22
Инженер	17000	0,3	0,2	1,3	33150	1743,1	72,6	155893,98
Итого:								180373,2

Дополнительная заработная плата определяется по формуле:

Для руководителя:

$$Z_{доп} = k_{доп} * Z_{осн} = 0,15 * 24479,22 = 3671,9 \text{ руб} \quad (4.12)$$

Для инженера:

$$Z_{доп} = k_{доп} * Z_{осн} = 0,15 * 155893,98 = 23384,1 \text{ руб} \quad (4.13)$$

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

Итого дополнительная зарплата составляет: 27 056 руб.

4.3.4 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)

Отчисления во внебюджетные фонды определяются по формуле:

Для руководителя:

$$\begin{aligned} Z_{внеб} &= k_{внеб} * (Z_{осн} + Z_{доп}) = \\ &= 0,32 * (24479,22 + 3671,9) = 9008,3 \text{ руб} \end{aligned} \quad (4.14)$$

Для лаборанта:

$$\begin{aligned} Z_{внеб} &= k_{внеб} * (Z_{осн} + Z_{доп}) = \\ &= 0,32 * (155893,9 + 23384,1) = 57369 \text{ руб} \end{aligned} \quad (4.15)$$

Где $k_{\text{внеб}}$ - коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд ОМС и социальное страхование). Общая ставка взносов составляет в 2023 году – 30,2% (ст. 425, 426 НК РФ).

Итого страховые отчисления составили: 66 377,3 руб.

4.3.5 Формирование бюджета затрат НТИ

Рассчитанная величина затрат научно-исследовательской работы является основой для формирования бюджета затрат проекта, который при формировании договора с заказчиком защищается научной организацией в качестве нижнего предела затрат на разработку научно-технической продукции (таблица 19).

Таблица 19 – Расчет бюджета затрат НТИ

Наименование статьи	Подраздел работы	Сумма, руб.
1. Материальные затраты НТИ	Пункт 4.3.1	21 632
2. Затраты на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ	Пункт 4.3.2	1 768 958
3. Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	Пункт 4.3.3	180373,2
4. Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы	Пункт 4.3.3	27 056
5. Отчисления во внебюджетные фонды	Пункт 4.3.4	66 377,3
Сумма ст. 1-5	-	2 064 396,5
6. Накладные расходы	16% от суммы ст. 1-5	330 303,44
Бюджет затрат НТИ:	Сумма ст. 1-6	2 394 699,94

4.4 Выводы по разделу

1. В ходе планирования для руководителя и лаборанта разработан график реализации этапа работ, который позволяет оценивать и планировать рабочее время исполнителей. Определено: общее количество календарных дней для выполнения работ составляет 107 дней; общее количество дней, в течение которых работал инженер, составляет 73 дня; общее количество дней, в течение которых работал руководитель, составляет 12 дней;

2. Для оценки затрат на реализацию проекта разработан проектный бюджет, который составляет 2 394 699,94 руб.