



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 22.04.01 Материаловедение и технологии материалов
Отделение школы Отделение материаловедения

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА МАГИСТРАНТА

Тема работы
Функционально-градиентная оптическая керамика с кубической структурой

УДК 666.3-126535.345: 661..8

Обучающийся

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4БМ12	Ли Шухуэй		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
профессор ОМ ИШНПТ	Хасанов О.Л.	д.т.н. профессор		

Консультант

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
инженер ОМ ИШНПТ	Пайгин В. Д.	к.т.н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент ОСГН ШБИП	Кащук И. В.	к.т.н. доцент		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент ООД ШБИП	Антоневич О.А.	к.б.н.		

По разделу «Приложение. Раздел на английском языке»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
старший преподаватель ОИЯ	Демьяненко Н. В.	-		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП/ОПОП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
профессор ОМ ИШНПТ	Хасанов О.Л.	д.т.н. профессор		

ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОСВОЕНИЯ ООП

Код компетенции СУОС	Наименование компетенции СУОС
Универсальные компетенции	
УК(У)-1	Способен осуществлять критический анализ проблемных ситуаций на основе системного подхода, вырабатывать стратегию действий
УК(У)-2	Способен управлять проектом на всех этапах жизненного цикла
УК(У)-3	Способен организовывать и руководить работой команды, вырабатывая командную стратегию для достижения поставленной цели
УК(У)-4	Способен применять современные коммуникативные технологии, в том числе на иностранном языке, для академического и профессионального взаимодействия
УК(У)-5	Способен анализировать и учитывать разнообразие культур в процессе межкультурного взаимодействия
УК(У)-6	Способен определять и реализовывать приоритеты собственной деятельности и способы ее совершенствования на основе самооценки
Общепрофессиональные компетенции	
ОПК(У)-1	Способен решать производственные и/или исследовательские задачи, на основе фундаментальных знаний в области материаловедения и технологии материалов
ОПК(У)-2	Способен разрабатывать научно-техническую, проектную и служебную документацию, оформлять научно-технические отчеты, обзоры, публикации, рецензии
ОПК(У)-3	Способен участвовать в управлении профессиональной деятельностью, используя знания в области системы менеджмента качества
ОПК(У)-4	Способен находить и перерабатывать информацию, требуемую для принятия решений в научных исследованиях и в практической технической деятельности
ОПК(У)-5	Способен оценивать результаты научно-технических разработок, научных исследований и обосновывать собственный выбор, систематизируя и обобщая достижения в области материаловедения и технологии материалов, смежных областях
Профессиональные компетенции	
ПК(У)-1	Способен реализовывать на производстве технологии сухого компактирования порошковых материалов, используя методы горячего и холодного прессования, ультразвукового и коллекторного компактирования
ПК(У)-2	Способен диагностировать и модернизировать эксплуатационные свойства характеристики материалов с учетом наноразмерной составляющей, используя традиционное и современное оборудование и программное обеспечение приборов
ПК(У)-3	Способен исследовать состав и структуру веществ, с учетом специфики наноразмерных материалов, используя современное оборудование и программное обеспечение приборов
ПК(У)-4	Способен прогнозировать влияние микро- и нано- масштаба на механические, физические, поверхностные и другие свойства материалов при выборе и реализации технологии получения объемных наноматериалов
ПК(У)-5	Способен реализовывать технологии получения наноматериалов с учетом ресурсоэффективности и экологической безопасности



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 22.04.01 Материаловедение и технологии материалов
Отделение школы Отделение материаловедения

УТВЕРЖДАЮ:
Руководитель ООП/ОПОП
_____ О.Л. Хасанов
«13» марта 2023 г.

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы в форме магистерской
работы

Обучающийся:

Группа	ФИО
4БМ12	Ли Шухуэй

Тема работы:

Функционально-градиентная оптическая керамика с кубической структурой	
Утверждена приказом директора ИШНПТ	Приказ № 61-7/с от 02.03.2023 г.

Срок сдачи студентом выполненной работы:	14.06.2023
--	------------

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе	Цель работы - изготовление функционально-градиентных керамик на основе $MgAl_2O_4$ и $ZrO_2(10\% Y_2O_3)$ методом электроимпульсного плазменного спекания, изучение их механических и оптических свойств.
Перечень разделов пояснительной записки подлежащих исследованию, проектированию и разработке	Обзор современного состояния технологии изготовления ФГК. Электроимпульсное плазменное спекание образцов на $MgAl_2O_4$ и $ZrO_2(10\% Y_2O_3)$. Анализ данных, полученных в процессе электроимпульсного плазменного спекания, построение кривых усадки. Рентгенофазовый анализ и микроскопия образцов ФГК. Измерение плотности, микротвердости и светопропускания образцов ФГК.

	Анализ социальной ответственности и финансового менеджмента, ресурсоэффективности и ресурсосбережению;
Перечень графического материала	Графики, рисунки, таблицы
Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы	
Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент	Кашук Ирина Вадимовна
Социальная ответственность	Антоневич Ольга Алексеевна
Раздел ВКР на английском языке	Демьяненко Наталия Владимировна
Названия разделов, которые должны быть написаны на иностранном языке:	
1) Литературный обзор	
2) Методическая часть	

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	13.03.2023
---	------------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
инженер ОМ ИШНПТ	Пайгин В. Д.	к.т.н.		13.03.2023

Задание принял к исполнению обучающийся:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4БМ12	Ли Шухуэй		13.03.2023



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 22.04.01 Материаловедение и технологии материалов
Уровень образования магистр
Отделение школы Отделение материаловедения
Период выполнения весенний семестр 2022 /2023 учебного года

Форма представления работы:

Магистерская диссертация

КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН выполнения выпускной квалификационной работы

Срок сдачи студентом выполненной работы:	14.06.2023
--	------------

Дата контроля	Название раздела	Максимальный балл раздела
13.03.2023	1. Литературный обзор	20
03.04.2023	2. Экспериментальная часть	20
24.04.2023	3. Обсуждение результатов и оформление работы	30
15.05.2023	4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсоемкость	10
22.05.2023	5. Социальная ответственность	10
14.06.2023	6. Обязательное приложение на иностранном языке	10

СОСТАВИЛ:

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ОМ ИШНПТ	Хасанов О.Л.	Д.Т.Н., профессор		02.03.2023

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель ООП

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ОМ ИШНПТ	Хасанов О.Л.	Д.Т.Н., профессор		02.03.2023

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

Студенту:

Группа	ФИО
4БМ12	Ли Шухуэй

Школа	ИШНПТ	Отделение Школа	Отделение материаловедения
Уровень образования	Магистратура	Направление /специальность	22.04.01 Материаловедение и технологии материалов

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

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

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

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

Перечень графического материала

<ol style="list-style-type: none"> 1. Оценка конкурентоспособности ИП 2. Матрица SWOT 3. Диаграмма Ганта 4. Бюджет НИ 5. Основные показатели эффективности НИ
--

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	13.03.2023
---	------------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент ОСГН ШБИП	Кашук Ирина Вадимовна	к.т.н. доцент		13.03.2023

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4БМ12	Ли Шухуэй		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа 4БМ12		ФИО Ли Шухуэй	
Школа	ИШНПТ	Отделение (НОЦ)	ОМ
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	22.04.01 Материаловедение и технологии материалов

Тема ВКР:

Функционально-градиентная оптическая керамика с кубической структурой	
Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:	
<p>Введение</p> <ul style="list-style-type: none"> – Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика) и области его применения. – Описание рабочей зоны (рабочего места) при разработке проектного решения/при эксплуатации 	<p><i>Объект исследования</i> функционально-градиентная люминесцентная керамика на основе $MgAl_2O_4$ и $ZrO_2(10\% Y_2O_3)$;</p> <p><i>Область применения</i> оптическое приборостроение и оптотехника;</p> <p><i>Рабочая зона:</i> лаборатория;</p> <p><i>Размеры помещения климатическая зона*)</i> 36 м²;</p> <p><i>Количество и наименование оборудования рабочей зоны</i> Пресс для спекания нанокерамик SPS-1500A (Syntex Inc., Япония), Муфельная печь LHT 02/18 (Nabertherm, Германия), Сканирующий электронный микроскоп JSM-7500FA (JEOL), Универсальный твердомер Duravision G5-20 (EMCO TEST GmbH);</p> <p><i>Рабочие процессы, связанные с объектом исследования, осуществляющиеся в рабочей зоне</i> спекание, шлифовка, измерение твёрдости.</p>
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
<p>1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности при эксплуатации</p> <ul style="list-style-type: none"> – специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; – организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Федеральный закон от 28 декабря 2013 г. N 426-ФЗ "О специальной оценке условий труда"; 2. ПНД Ф 12.13.1-03 Методические рекомендации. Техника безопасности при работе в аналитических лабораториях (общие положения); 3. Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 27. 12.2018).
<p>2. Производственная безопасность при эксплуатации:</p> <ul style="list-style-type: none"> – Анализ выявленных вредных и опасных производственных факторов – Расчет уровня опасного или вредного производственного фактора 	<p>Опасные факторы:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Производственные факторы, связанные с электрическим током; 2. Повышенная или пониженная температура материальных объектов рабочей зоны; 3. Химически вредные вещества в воздухе рабочей зоны. <p>Вредные факторы:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Повышенным уровнем и другими неблагоприятными характеристиками шума; 2. Активное наблюдение за ходом производственного процесса, монотонность труда, перенапряжение анализаторов; 3. Недостаточная освещенность рабочей зоны. <p>Требуемые средства коллективной и индивидуальной защиты от выявленных факторов:</p>

	<p>тепловая изоляция трубопроводов, использование защитных костюмов, виброизолирующие рукавицы, перчатки, виброизолирующая обувь, беруши, наушники, защитные ограждения, маски.</p> <p>Расчет: расчет системы искусственного освещения.</p>
3. Экологическая безопасность при эксплуатации	<p>Воздействие на селитебную зону отсутствует;</p> <p>Воздействие на литосферу утилизация бумаги (отход V класса опасности);</p> <p>Воздействие на гидросферу поступление наночастиц (отходов III класса опасности) в канализацию;</p> <p>Воздействие на атмосферу выбросы из вентиляционных систем, содержащие неорганические наночастицы различной степени опасности.</p>
4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях при эксплуатации	<p>Возможные ЧС техногенные аварии (пожар, авария электроэнергетических систем); случайное высвобождение нано порошка и превышение ПДК.</p> <p>Наиболее типичная ЧС возникновение пожара.</p>
Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	
	13.03.2023

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент ООД ШБИП	Антоневич Ольга Алексеевна	к.б.н.		13.03.2023

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4БМ12	Ли Шухуэй		

Реферат

Выпускная квалификационная работа: 89 с., 21 рис., 29 табл., 78 источников, 1 прил.

Ключевые слова: функционально-градиентная оптическая керамика, электроимпульсное плазменное спекание, иттрий-стабилизированный диоксид циркония ($ZrO_2(10\% Y_2O_3)$, YSZ), алюмомагниева шпинель ($MgAl_2O_4$), механические характеристики, оптические характеристики.

Объектом исследования является керамика из иттрий-стабилизированного диоксида циркония, алюмомагниева шпинели и функционально-градиентная керамика на их основе.

Цель работы - изготовление функционально-градиентных керамик на основе $MgAl_2O_4$ и $ZrO_2(10\% Y_2O_3)$ методом электроимпульсного плазменного спекания, изучение их механических и оптических свойств.

В ходе работы выполнен анализ процессов уплотнения исследуемых материалов при спекании, проведено измерение плотности, светопропускания, твердости, изучена микроструктура керамики. Образцы изготовлены методом электроимпульсного плазменного спекания. В работе использовано следующее оборудование: пресс для спекания нанокерамик SPS-1500A (Syntex Inc., Япония), муфельная печь LHT 02/18 (Nabertherm, Германия), сканирующий электронный микроскоп JSM-7500FA (JEOL), универсальный твердомер Duravision G5-20 (EMCO TEST GmbH, Германия), рентгеновский дифрактометр XRD-7000S (Shimadzu, Япония), спектрофотометр СФ-256 БИК (ЛОМО, Россия). Обработка результатов экспериментов выполнена с использованием специального программного обеспечения и пакета программ Microsoft Office. Текст пояснительной записки набран при помощи текстового редактора Microsoft Word.

Выпускная квалификационная работа выполнена в НОИЦ «Наноматериалы и нанотехнологии» Национального исследовательского Томского политехнического университета в рамках проекта РНФ 21-73-10100

«Разработка новых люминесцентных функционально-градиентных керамик на основе оксидных систем».

СОДЕРЖАНИЕ

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	13
ВВЕДЕНИЕ.....	14
1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНО-ГРАДИЕНТНЫХ МАТЕРИАЛОВ	16
1.1 Функционально градиентные материалы и их применение.....	16
1.2. Методы получения функционально-градиентных материалов ...	17
1.3 Перспективные материалы для создания оптической функционально-градиентной керамики.....	21
Выводы по разделу	24
2. МАТЕРИАЛЫ, ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДИКИ ЭКСПЕРИМЕНТОВ.....	25
2.1 Материалы для исследования	25
2.2 Электроимпульсное плазменное спекание.....	25
2.3 Термический отжиг	26
2.4 Определение плотности.....	27
2.5 Рентгенофазовый анализ	27
2.6 Сканирующая электронная микроскопия (СЭМ)	28
2.7 Спектрофотометрия	29
2.8 Определение твердости по Виккерсу.....	29
3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ	31
4. ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ.....	37
Введение	37
4.1 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	37
4.1.1 Анализ конкурентных технических решений.....	37
4.1.2 SWOT-анализ	39
4.2 Планирование научно-исследовательских работ.....	42
4.2.1 Структура работ в рамках научного исследования.....	42

4.2.2 Определение трудоемкости выполнения работ и разработка графика проведения	43
4.3 Бюджет научно-технического исследования.....	45
4.3.1 Расчет материальных затрат научно-технического исследования	46
4.3.2 Расчет амортизации специального оборудования.....	46
4.3.3 Основная заработная плата исполнителей темы	47
4.3.4 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)	49
4.3.5 Накладные расходы	49
4.3.6 Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта	50
4.4 Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования	50
Выводы по разделу	52
5. СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ.....	54
Введение	54
5.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	55
5.1.1. Правовые нормы трудового законодательства.....	55
5.2 Производственная безопасность	57
5.3 Экологическая безопасность	65
5.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях	66
Выводы по разделу	69
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	70
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	71
СПИСОК НАУЧНЫХ ТРУДОВ.....	79
ПРИЛОЖЕНИЕ А.....	80

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

ФГМ - Функционально-градиентные материалы

ФГК - Функционально-градиентная керамика

ХОГФ - Химическое осаждение из газовой фазы

ТОТЭ - Твердооксидные топливные элементы

ЭФО - Электрофоретическое осаждение

ЭИПС - Электроимпульсное плазменное спекание

ЭТФЭ - Этилен-тетрафторэтилен

YSZ - Иттрий-стабилизированный диоксид циркония, $ZrO_2(10 \text{ мол. \% } Y_2O_3)$

MAS - Алюмомагниева шпинель, $MgAl_2O_4$

РФА - Рентгенофазовый анализ

СЭМ - Сканирующий электронный микроскоп

ЭДС - Энергодисперсионный элементный анализ

ВВЕДЕНИЕ

Композиционные материалы нового поколения, известные как функционально-градиентные материалы (ФГМ), привлекают значительное внимание исследователей в различных областях науки и техники. Закономерное пространственное изменение (градиент) эксплуатационных свойств материала вдоль заданного направления в монолитном изделии открывает широкие возможности для уменьшения габаритов и энергетических потерь. Например, концепция создания ФГМ конструкционного назначения заключается в определении совокупности физико-механических свойств, необходимых для выполнения комплекса заданных функций, а также закономерностей их пространственного распределения, и в получении такого их градиента, который позволил бы снизить концентрацию внутренних напряжений и увеличить ресурс работы материала в соответствии с предъявляемыми эксплуатационными требованиями [1].

Таким образом, под ФГМ понимают композиционный материал, функциональные свойства которого изменяются вдоль заданного направления по определённому профилю [1, 2].

Одной из специфических проблем при создании ФГМ является образование макродефектов, вызванных неоднородной усадкой при консолидации. Разница скорости и величины усадки компонентов ФГМ зависит от их температуры спекания, начальной плотности, размера частиц порошка и др. Проблема становится более серьезной в многослойных образцах, потому что искажения и дефекты одного слоя могут влиять на другие слои. Это накладывает ограничения на дизайн градиентной структуры и требует проведения большого объема исследований, направленных на решение данной проблемы.

Функционально-градиентная керамика (ФГК) представляет собой разновидность ФГМ, составленным материалом которого является керамика. Она сочетает в себе особые свойства различных керамик: термостойкость, износостойкость и биосовместимость. Она перспективна для применения в

аэрокосмической, биомедицинской и в оптическом приборостроении, источниках света и лазерной технике [2, 3].

Получение оптических функционально-градиентных керамик также связано с определенными проблемами, более актуальными, чем для ФГМ на основе «традиционной» керамики, поскольку в оптическом функционально-градиентном материале локальные или слоевые нарушения могут привести к кардинальному изменению свойств изделия.

Актуальной задачей является разработка и оптимизация методов изготовления ФГК.

Среди множества типов поликристаллических материалов, наиболее перспективной представляется керамика из алюмомагниевого шпинели ($MgAl_2O_4$) и кубического диоксида циркония, стабилизированного оксидом иттрия ($ZrO_2(Y_2O_3)$, YSZ). Выбор этих материалов обусловлен комплексом их высоких физико-механических и оптико-люминесцентных свойств, а также возможностью направленного изменения последних путём введения специальных добавок - допантов (оксидов редкоземельных элементов или переходных металлов) и/или регулирования концентрации кислородных вакансий.

Проблема образования макродефектов в процессе компрессионной и термической консолидации ФГК может быть решена при помощи метода электроимпульсного плазменного спекания (ЭИПС).

Целью выпускной-квалификационной работы является изготовление функционально-градиентной керамики на основе $MgAl_2O_4$ и $ZrO_2(10\%Y_2O_3)$ методом электроимпульсного плазменного спекания, изучение механических и оптических свойств полученного ФГК.

1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНО-ГРАДИЕНТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

В настоящем разделе рассмотрены основные характеристики функциональных градиентных материалов, методы их изготовления и области применения. Представлены перспективные материалы для создания оптической функционально-градиентной керамики.

1.1 Функционально градиентные материалы и их применение

Функционально-градиентные материалы (ФГМ) представляют собой композиционные или однофазные материалы, функциональные свойства которых равномерно или скачкообразно изменяются по predetermined и разработанному профилю. Профиль изменения свойств, в свою очередь, обусловлен неоднородностью микроструктуры, дизайн которой определяется требованиями к эксплуатационным характеристикам конечного изделия. За счёт постепенного перехода от одного материала до другого в ФГМ устраняются резкие изменения свойств, существующие в традиционном композиционном материале [4].

На рисунке 1 представлена схема структуры традиционного композитным материалом и ФГМ. В композитном материале существует четкая граница раздела между металлами и керамикой, в ФГМ-же эта граница может быть как плавно, так и скачкообразно изменяющейся [4].

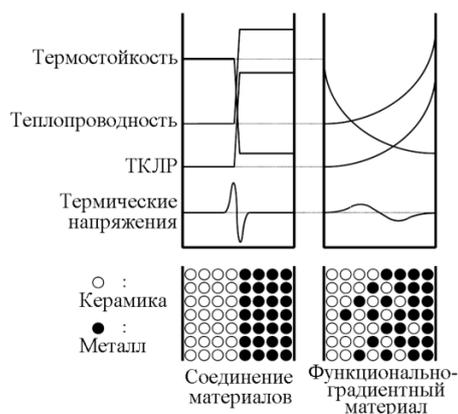


Рисунок 1– Структура материала и зависимость свойств ФГМ и обычного композитного материала [4]

Функционально-градиентные материалы применяются в медицине в качестве ортопедических имплантатов [5]. В настоящее время ведутся активные работы по оптимизации методов изготовления и разработке новых составов ФГМ [6-8].

Кроме медицины ФГМ используют в лазерной технике и оптическом приборостроении, их используют для изготовления оптоволоконных линз, антибликовых пленок и специализированных стекол [9].

ФГМ являются весьма перспективными для использования в электроэнергетике в качестве термоэлектрических материалов [10].

Еще одна область применения ФГМ – это аэрокосмическая отрасль. Некоторые ФГМ обладают высокой термостойкостью, сопротивлением тепловому удару, сопротивлением термической усталости и сопротивлением коррозии. Они могут быть использованы в качестве элементов корпуса космических челноков и элементов авиационных двигателей [11, 12].

Еще одна схема функционально-градиентного материала представлена на рисунке 2.

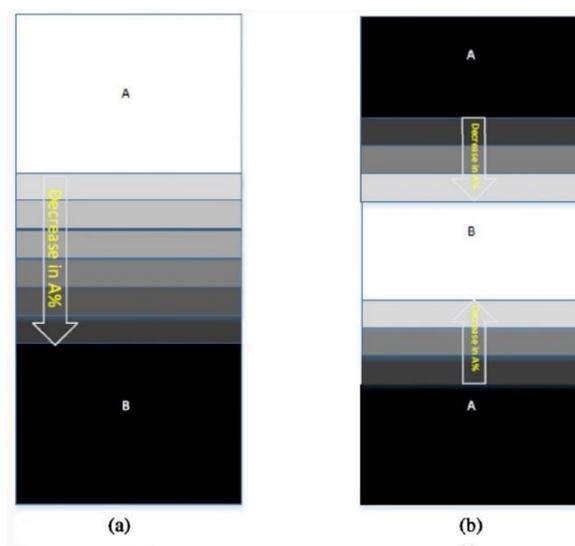


Рисунок 2 – Схема функционально-градиентной структуры [13]

1.2. Методы получения функционально-градиентных материалов

Для изготовления ФГМ используют газовые, жидкофазные и твердофазные методы. Наиболее распространенные методы получения ФГМ представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Сравнение методов получения ФГМ [13-18]

Метод / процесс	Формирование градиентной структуры	Варьируемость фазового состава	Тип ФГМ	Получение изделий сложной формы
Укладка порошков	Очень хорошо	Очень хорошо	Объёмный	Средне
Укладка слоев	Очень хорошо	Очень хорошо	Объёмный	Средне
Распылительная сушка порошков (грануляция)	Очень хорошо	Очень хорошо	Объёмный	Средне
Погружение в шликер	Очень хорошо	Очень хорошо	Покрытие	Хорошо
Аддитивные технологии	Очень хорошо	Очень хорошо	Объёмный	Очень хорошо
Шликерное литье	Очень хорошо	Очень хорошо	Объёмный	Хорошо
Лазерное спекание	Очень хорошо	Очень хорошо	Объёмный/ покрытие	Очень хорошо
Диффузионные методы	Средне	Очень хорошо	Соединение, покрытие	Хорошо
Направленное отверждение	Средне	Средне	Объёмный	Плохо
Химическое и физическое осаждение из газовой фазы	Очень хорошо	Очень хорошо	Покрытие	Средне

В начале 1970-х годов метод ХОГФ считался одним из наиболее привлекательных процессов для изготовления полупроводников. Его использовали для нанесения покрытий на электронные схемы. Позднее метод ХОГФ стал использовать для получения композиционных и функционально-градиентных материалов [19-22]. Этот метод позволяет получать ФГМ с заданным составом за счёт изменения соотношения газов, температуры осаждения, давления газа, скорости потока и типа газа [23]. Преимущества метода ХОГФ заключается в возможности непрерывного контроля, изменения состава и сохранение чистоты.

В работе [24] авторы получили ФГМ состава SiC-C методом ХОГФ. Было замечено, что в условиях циклического теплового потока при температуре поверхности 877-1227 °С образцы ФГМ не имеют трещин.

Авторы [25] использовали метод ХОГФ для получения поликристаллических ФГМ-пленок из никеля и графита. Авторами был

получен материал, имеющий перспективы применения в оптоэлектронике.

В работе [26] Катаяма с коллегами для получения ФГМ состава Al_2O_3-W использовали метод шликерного литья с последующим свободным спеканием при температуре спекания $1600\text{ }^\circ\text{C}$. Авторы отмечают, что получить вольфрам в заданной фазе оказалось затруднительно из-за окисления W при спекании.

В работе [27] исследователи сосредоточились на процессе термической обработки ФГМ на основе оксида алюминия. ФГМ изготавливали методом шликерного литья с последующим спеканием. Авторами было установлено, что, если слои ФГМ содержат от 0 до 0,3 мас. % специальных порообразующих агентов, то и коэффициент термического расширения остается неизменным в широком диапазоне температур $20-1570\text{ }^\circ\text{C}$.

Еще один распространенный метод получения ФГМ – это электрофоретическое осаждение (ЭФО). Формирование ФГМ этим методом состоит из двух этапов (Рисунок 3). К преимуществам метода ЭФО относительно возможность относительно прецизионного контроля материала в процессе получения [28].

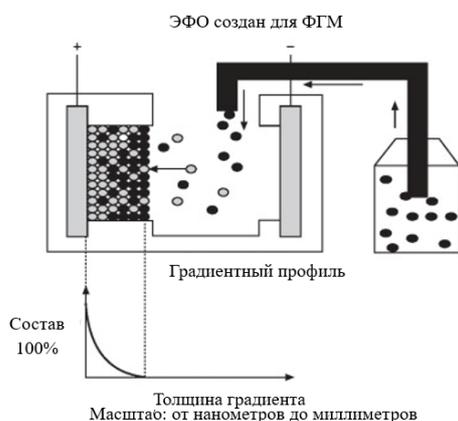


Рисунок 3 – Процесс электрофоретического осаждения материалов ФГМ [28]

Весьма перспективными для получения ФГМ являются методы порошковой металлургии [30-36]. Схема изготовления ФГМ представлена на рисунке 4. [29, 30].

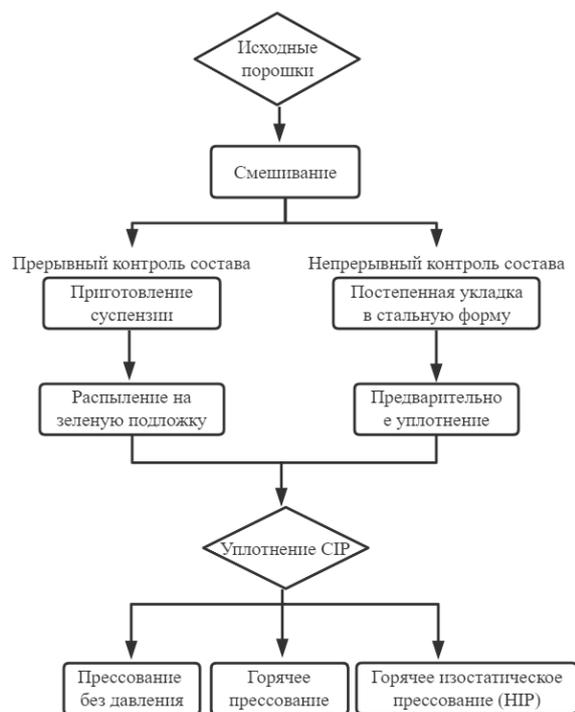


Рисунок 4 – схема процесса изготовления ФГМ методом порошковой металлургии [29]

В работе [34] авторы получили ФГМ состава ZrO_2 - NiCr состоящий из 11 слоев. При подготовке ФГМ порошки укладывали слой за слоем, затем формовали методом холодного прессования под давлением около 30 МПа в стальной пресс-форме. Затем заготовку спекали методом горячего прессования при температуре 1300 °С и давлении 5 МПа в течение 1,5 ч. Схема распределения состава ФГМ представлена на рисунке 5.

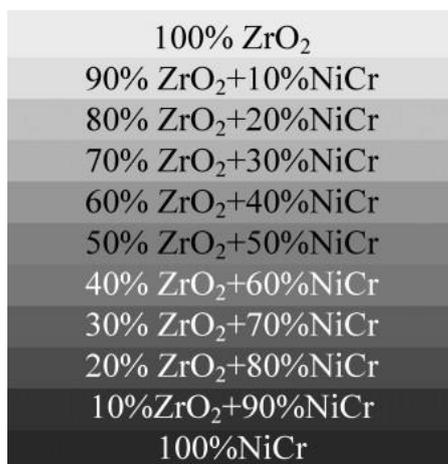


Рисунок 5 – Модель распределения состава функционально градиентного ZrO_2 – NiCr [34]

Авторы [35] получили прозрачной ФГМ состава Al-ZnO (рисунок 6),

который обладает прозрачностью до 80% в видимом диапазоне, проводит электрический ток.

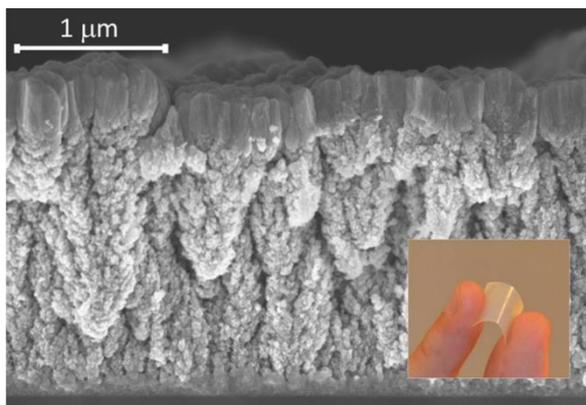


Рисунок 6 – СЭМ-изображение ФГМ состава Al-ZnO [35].

Таким образом, авторы [35] подтвердили возможность создания оптического ФГМ. Далее рассмотрим два оптических материала перспективных для изготовления оптической функциональной градиентной керамики: иттрий-стабилизированный диоксид циркония (YSZ) и алюмомагниева шпинель $MgAl_2O_4$ (АМШ).

1.3 Перспективные материалы для создания оптической функционально-градиентной керамики

Диоксида циркония (ZrO_2) обладает превосходными механическими и функциональными свойствами, включая высокую прочность, низкую теплопроводность. Для стабилизации кубической и тетрагональной кристаллических структур ZrO_2 используют оксид иттрия (Y_2O_3) [36]. Кубический диоксид циркония – перспективный оптический материал, поскольку величина его показателя преломления составляет 2,2 [37].

В работе [2, 38] авторы исследовали влияние технологических параметров электроимпульсного плазменного спекания на оптические и механические свойства прозрачной керамики YSZ. Спектры пропускания полученных образцов представлены на рисунке 7. Авторы установили, что для получения высокопрозрачной керамики на YSZ методом ЭИПС оптимальным является следующий режим: температура 1300 °С, давление – 100 МПа, скорость нагрева- 10°С / мин.

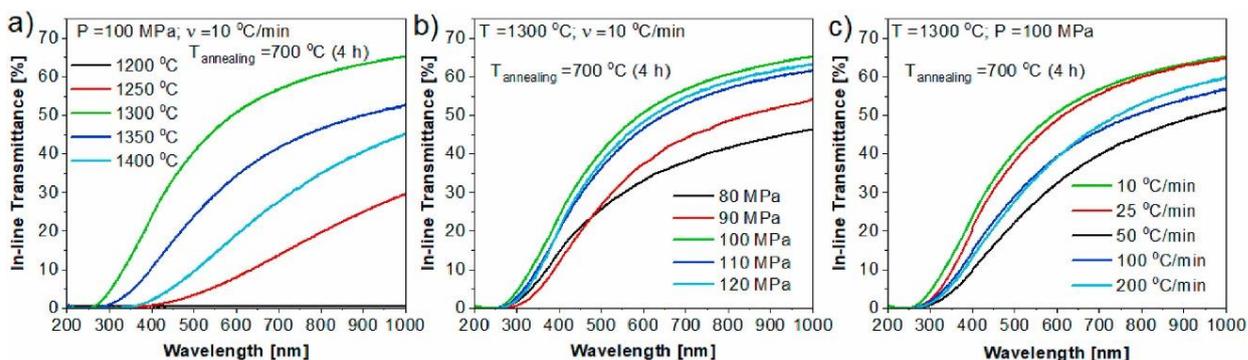


Рисунок 7 – Спектры пропускания YSZ-керамики, приготовленной при различных параметрах спекания: температуре (а); давлении (б); скорости нагрева (в) после отжига на воздухе при 700 °С [2]

Авторы работы для получения прозрачной керамики из иттрий-стабилизированного диоксида циркония использовали ЭИПС высокого давления. Приложение давления около 400 МПа позволило снизить температуру спекания до 1100 °С. Подобные результаты получили Чжан с коллегами [36].

В таблице 2 представлены технологические параметры ЭИПС (температура Т, давление Р, скорость нагрева), светопропускание на длине волны 600 нм ($T_{\lambda=600}$) прозрачной керамики из иттрий-стабилизированного диоксида циркония, полученной независимыми исследовательскими группами.

Таблица 2 – Современное состояние технологии производства оптически прозрачной керамики на основе иттрий стабилизированного диоксида циркония методом ЭИПС

Температура, °С	Давление, МПа	Скорость нагрева, °С/мин	Светопропускание на 600 нм, %	Источник
1300	100	10	50	[2]
1300	100	10	50,67	[38]
1100	400	10	42	[36]
1300	100	100	30	[39]

Касолко с коллегами использовали метод ЭИПС для изготовления ФГК из кубического диоксида циркония ($ZrO_2(8 \text{ мол. \% } Y_2O_3)$) и тетрагонального диоксида циркония ($ZrO_2(3 \text{ мол. \% } Y_2O_3)$) [40]. Полученный ФГК оказался

светопропускающим, имел средний размер зерна 55 нм.

Еще один перспективный материал для изготовления ФГК – алюмомагниева шпинель ($MgAl_2O_4$). Она имеет кубическую кристаллическую структуру, прозрачна для электромагнитного излучения в диапазоне длин волн от 0,2 мкм (УФ) до 5,5 мкм (средний ИК) [41], обладает высокими механическими свойствами, хорошей химической стабильностью [42, 45].

Как керамика из иттрий-стабилизированного диоксида циркония, так и прозрачная керамика из алюмомагниева шпинели может быть получена методом электроимпульсного плазменного спекания. В работе [43] авторы получили прозрачную $MgAl_2O_4$ методом ЭИПС, без использования спекающих добавок. Процесс проводили при температуре 1300 °С, скорость нагрева составляла <10 °С/мин. Полученные образцы демонстрировали светопропускания 47 % на длине волны 550 нм и прочность на изгиб ~500 МПа.

В другой работе [44] авторы исследовали влияние различных параметров ЭИПС на микроструктуру, прозрачность и твердость поликристаллической алюмомагниева шпинели. Образцы с наилучшими эксплуатационными характеристиками были получены температуре 1200 °С, нагрева 5 °С/мин, времени выдержки 15 мин и давлении 350-400 МПа.

В таблице 3 представлены технологические параметры ЭИПС (температура Т, давление Р, скорость нагрева), светопропускание на длине волны 550 нм ($T_{\lambda=550}$) прозрачной керамики из алюмомагниева шпинели, полученной независимыми исследовательскими группами.

Таблица 3 – Современное состояние технологии производства оптически прозрачной керамики на основе алюмомагниева шпинели методом ЭИПС

Температура, °С	Давление, МПа	Скорость нагрева, °С/мин	Светопропускание на 550 нм, %	Источник
1300	80	<10	47	[43]
1200	400	5	Более 80	[44]

1275-1350	80	10	70	[45]
1300	73	1	70	[46]

Прозрачная керамика из алюмомагниево-шпинели может быть получена методом ЭИПС при температурах от 1200 до 1350°C, давлениях от 73 до 400 МПа и скоростях нагрева от 1 до 10 °С/мин.

Выводы по разделу

Таким образом, в результате проведенного литературного обзора был выбран метод и материалы для изготовления ФГК.

На основе определённых диапазонов технологических режимов ЭИПС изготовления прозрачной керамики из $MgAl_2O_4$ и YSZ будет выбран режим для изготовления ФГК.

Сформулирована цель работы: изготовление функционально-градиентных керамик на основе $MgAl_2O_4$ и $ZrO_2(10\%Y_2O_3)$ методом электроимпульсного плазменного спекания, изучение их механических и оптических свойств.

Для достижения цели поставлены следующие экспериментальные задачи:

1. Изготовить образцы ФГК методом электроимпульсного плазменного спекания.
2. Провести анализ процессов уплотнения исследуемых материалов при электроимпульсном плазменном спекании.
3. Провести характеризацию полученных образцов методами РФА, СЭМ, спектрофотометрии и индентирования.

2. МАТЕРИАЛЫ, ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДИКИ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

2.1 Материалы для исследования

В качестве исходных материалов были использованы коммерческие нанопорошки диоксида циркония, стабилизированного оксидом иттрия (YSZ, TZ-10YS, Tosoh Corp., Япония) и алюмомагниевого шпинели (MAS, SC30R, Baikowski Malakoff Inc., США).

Смесь порошков 50 мас. % YSZ и 50 мас. % MAS готовили при помощи шаровой мельницы в течение 48 часов. Полученную порошковую смесь сушили при температуре 80 °С до полного испарения влаги.

2.2 Электроимпульсное плазменное спекание

В работе консолидацию керамики и ФГК проводили на установке SPS-515S (Syntex Inc., Япония) при температуре 1450°С под давлением статической подпрессовки 100 МПа со скоростью 10 °С/мин, время выдержки 180 минут. Продолжительность процесса спекания составляла 30 минут. Температуру электроимпульсного плазменного спекания процесса контролировали с помощью оптического пирометра, сфокусированного на специальном технологическом отверстии в пресс-форме, которое расположено на внешней стенке пресс-формы.

Засыпку порошка в пресс-форму проводили послойно, чередуя слои YSZ и MAS. Всего образец состоял из 4 слоев.

Техническая реализация метода ЭИПС основана на прямом нагреве графитовой пресс-формы с порошковым материалом путем пропускания последовательностей импульсов постоянного тока с одновременным приложением нагрузки. Для этого спекаемый порошок засыпают в графитовую (токопроводящую) пресс-форму и помещают между плунжерами пресса, которые также являются электродами [47, 48]. Схематическое изображение установки для ЭИПС приведено на рисунке 8.

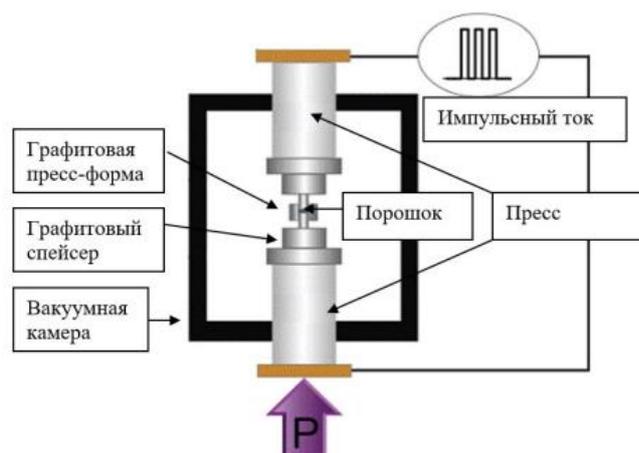


Рисунок 8 – Схематическое изображение установки для ЭИПС [48]

Фотография установки электроимпульсного плазменного спекания схематически представлена на рисунке 9.



Рисунок 9 – Установка электроимпульсного плазменного спекания (SPS-515S SYNTEX INC., Япония)

2.3 Термический отжиг

После спекания образцов проводили их термический отжиг в муфельной печи ЛНТ 02/18 (Nabertherm, Германия) (Рисунок 10). Рабочий режим отжига: температура – 1300°C, изотермическая выдержка на заданной температуре – 4 часа, скорость нагрева и остывания 200°C/ч.



Рисунок 10 – Установка муфельной печи LHT 02/18 (Nabertherm, Германия)

Термический отжиг — это технологический процесс, при котором материал подвергается нагреванию до определенной температуры, а затем медленно охлаждается. Этот процесс может использоваться для изменения свойств материала, таких как механическая прочность, твердость, устойчивость к коррозии и т.д. [49].

2.4 Определение плотности

Плотность определяли геометрическим методом, путём прямого измерения линейных размеров образцов цифровым толщиномером ID F-150 (Mitutoyo, Япония) с точностью 0,001 мм и массы образца на цифровых весах ВЛТЭ-150 (Россия) с точностью 0,001 г. Плотность рассчитывали по формуле (1):

$$\rho = \frac{4 \cdot m}{\pi \cdot d^2 \cdot h} \quad (1)$$

где ρ – плотность образца, г/см³; m – масса образца, г; d – диаметр образца, см²; h – высота образца, см.

Относительная плотность ($\rho_{\text{отн.}}$), в настоящей работе, определяется как отношение плотности образца (ρ) к его теоретической плотности ($\rho_{\text{теор.}}$).

2.5 Рентгенофазовый анализ

Рентгенофазовый анализ (РФА) - метод, позволяющий определить качественный и количественный состав исследуемого материала [50].

РФА проводили на рентгеновском дифрактометре XRD-7000 (Shimadzu, Япония), с медным анодом ($\lambda=1,5405 \text{ \AA}$). Изображение рентгеновского дифрактометра представлено на рисунке 11.



Рисунок 11 – Рентгеновский дифрактометр XRD-7000 (Shimadzu, Япония)

2.6 Сканирующая электронная микроскопия (СЭМ)

Сканирующий электронный микроскоп - это прибор для анализа и тестирования морфологии поверхности образца. В сканирующем электронном микроскопе используется узкий пучок высокоэнергетических электронов, сфокусированный электромагнитной линзой. Электроны отклоняются сканирующей катушкой, которая быстро сканирует образец, и электронный пучок взаимодействует с образцом, создавая сигналы, такие как вторичные электроны, обратно рассеянные электроны и пропущенные электроны, которые обрабатываются для формирования изображения сканирующего электронного микроскопа, отражающего состояние образца в различных точках. Изображения сканирующего электронного микроскопа широко используются в научных исследованиях благодаря большой глубине резкости, большому увеличению и хорошим стереоскопическим свойствам. Сканирующий электронный микроскоп, используемый в данной диссертации, представляет собой Сканирующий электронный микроскоп JSM-7500FA (JEOL) с комплектом аналитических приставок энергодисперсионного спектрометра (ЭДС) и дифракции электронов обратного рассеяния (EBSD) (Bruker Nano GmbH) [51]. Оборудование представлено на рисунке 12.



Рисунок 12 – Сканирующий электронный микроскоп JSM-7500FA (JEOL)

2.7 Спектрофотометрия

Спектрофотометрия – аналитический метод, позволяющий определить прозрачность материала в ультрафиолетовом (10-400 нм), видимом (400-700 нм) и инфракрасном (700-1100 нм) диапазонах длин волн [52].

В данной работе для исследования оптических свойств образцов на основе $MgAl_2O_4$ и $ZrO_2(10\% Y_2O_3)$ был использован спектрофотометр СФ-56 БИК (ОКБ Спектр, Россия), представлен на рисунке 13.

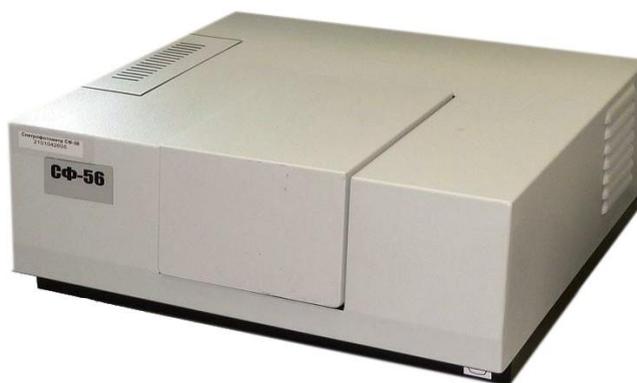


Рисунок 13 – Спектрофотометр СФ-56 БИК (ОКБ Спектр, Россия)

2.8 Определение твердости по Виккерсу

Твердость — это способность материала частично сопротивляться вдавливанию твердого предмета в его поверхность. Для получения различных твердостей можно использовать различные методы измерения твердости, такие как твердость по Моосу, твердость по Бринеллю, твердость по Виккерсу, твердость по Шору и т.д. В научных исследованиях часто используется микротвердость по Виккерсу. Сущность метода определения твердости по

Виккерсу заключается в том, что алмазная пирамидка с углом 136° между двумя противоположными сторонами вдавливается вертикально в горизонтальную поверхность тестируемого объекта с определенной нагрузкой, выдерживается в течение 10-20 с и убирается (рисунок 14). Затем измеряется длина диагонали вдавливания d_1 , d_2 и рассчитывается твердость по Виккерсу по уравнению (2) [52].

$$H_v = \frac{F}{S} = \frac{2F \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)}{d^2} = 1854 \frac{F}{d^2} \quad (2)$$

где H_v – твердости по Виккерсу; F – приложенная нагрузка, Н; S – поверхность отпечатка, мм^2 ; d – средняя длина диагоналей, мм; α – угол при вершине.

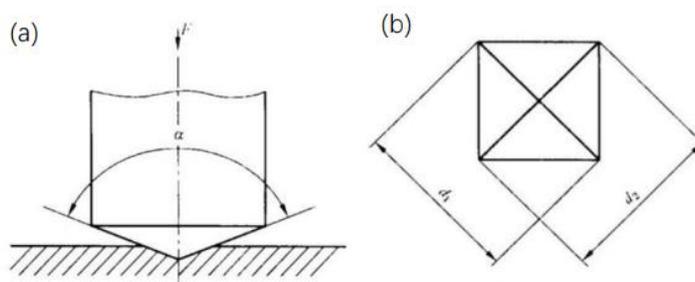


Рисунок 14 – Схема испытания на твердость по Виккерсу, (а) индентор, (б) вдавливание [52]

В настоящей работе твердость измерялась с помощью универсального твердомера Duravision G5-20 (Рисунок 15).



Рисунок 15 – Универсальный твердомер Duravision G5-20

4. ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ

Введение

Основная цель данного раздела – оценить перспективность развития и планировать финансовую и коммерческую ценность конечного продукта, представленного в рамках исследовательской программы. Коммерческая ценность определяется не только наличием более высоких технических характеристик над конкурентными разработками, но и тем, насколько быстро разработчик сможет ответить на следующие вопросы – будет ли продукт востребован на рынке, какова будет его цена, каков бюджет научного исследования, какое время будет необходимо для продвижения разработанного продукта на рынок.

Данный раздел, предусматривает рассмотрение следующих задач:

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

Целью данной НИ (ВКР) является создание функционально-градиентных люминесцентных керамик различных составов на основе $MgAl_2O_4$ и $ZrO_2(10\% Y_2O_3)$ методом электроимпульсного плазменного спекания и анализ изменений в процессе спекания и оценка их оптических и механических свойств.

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

4.1.1 Анализ конкурентных технических решений

С помощью анализа конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения, возможно провести оценку эффективности научной разработки и определить ее направление для

будущего развития. В процесс исследования рассматривались две конкурирующие разработки:

- 1) метод шликерного литья;
- 2) способ аддитивных технологий (3D печать).

Сравнение разработок-конкурентов и разработки данного НИ с точки зрения технических и экономических критериев оценки эффективности приведено в таблице 6.

Таблица 6 – Оценочная карта сравнения конкурентных технических решений

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		Б _ф	Б _{к1}	Б _{к2}	К _ф	К ₁	К ₂
1	2	3	4	5	6	7	8
Технические критерии оценки ресурсоэффективности							
Энергоэкономичность	0,05	5	3	4	0,75	0,15	0,20
Простота	0,10	5	3	4	0,50	0,30	0,40
Прозрачность	0,15	5	2	2	0,75	0,30	0,30
Надежность	0,05	5	4	3	0,25	0,20	0,15
Уровень шума	0,10	5	2	3	0,50	0,20	0,30
Функциональность	0,15	5	3	3	0,75	0,45	0,45
Продолжительность	0,09	4	1	3	0,36	0,09	0,27
Ресурсоёмкость	0,10	4	2	2	0,40	0,2	0,20
Экономические критерии оценки эффективности							
Конкурентоспособность продукта	0,01	5	3	3	0,05	0,03	0,03
Уровень проникновения на рынок	0,04	1	5	3	0,04	0,20	0,12
Стоимость	0,10	5	2	3	0,50	0,20	0,30
Финансирование научной разработки	0,05	2	5	3	0,10	0,25	0,15
Срок выхода на рынок	0,01	2	5	2	0,02	0,05	0,02
Итого	1	53	40	38	4,97	2,65	2,89

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

$$K = \sum V_i \cdot B_i \quad (3)$$

Где: K – конкурентоспособность научной разработки или конкурента,
 V_i – вес показателя (в долях единицы), B_i – балл i -го показателя.

$$K_{\phi} = \sum V_i \cdot B_i = 4,97$$

$$K_1 = \sum V_i \cdot B_i = 2,65$$

$$K_2 = \sum V_i \cdot B_i = 2,89$$

Рассчитав конкурентоспособность двух используемых методов для изготовления керамики, можно сказать, что конкурентоспособность системы K_{ϕ} составляет 5,06, K_1 - 2,65, K_2 - 2,89. В результате проведенного анализа можно сделать вывод, что предлагаемое решение обладает конкурентоспособностью. Предлагаемые решения характеризуется коротким производственным циклом, простыми операционными процессами, низким уровнем шума и хорошими эксплуатационными характеристиками производимой продукции.

4.1.2 SWOT-анализ

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

Первый этап, составляется матрица SWOT, в которую описаны слабые и сильные стороны проекта и выявленные возможности и угрозы для реализации проекта, которые проявились или могут появиться в его внешней среде, приведены в таблице 7.

Таблица 7 - Матрица SWOT-анализа

Сильные стороны	Слабые стороны
С1. Низкая стоимость исходного сырья; С2. Высокий уровень физико- и термомеханических, и оптических свойств продукции; С3. Получение высококачественных продуктов; С4. Экологичность технологии; С5. Методика является перспективной	Сл1. Отсутствие прототипа научной разработки; Сл2. Невысокие объемы производства; Сл3. Риск нарушения правил безопасности и возникновения различных непредвиденных ситуаций; Сл4. Сложность подбора режима; Сл5. Нет возможности поставить обеспечить крупносерийное производство.
Возможности	Угрозы
В1. Использование оборудования ИШНПТ ТПУ В2. Появление Дополнительного спроса на новый продукт В3. Внедрение технологии в производство В4. Участие в грантах В5. Выход на зарубежные рынки	У1. Появление зарубежных аналогов и более ранний их выход на рынок У2. Разработка новых технологий конкурентами и снижение цен

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 8-11.

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

Сильные стороны проекта						
Возможности проекта		C1	C2	C3	C4	C5
	B1	-	-	-	-	-
	B2	-	+	-	-	-
	B3	-	+	-	+	-
	B4	-	+	-	+	-
	B5	+	+	-	-	-

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

Слабые стороны проекта						
Возможности проекта		Сл1	Сл2	Сл3	Сл4	Сл5
	B1	-	-	+	+	+
	B2	-	-	-	-	-
	B3	-	-	-	-	-
	B4	-	-	-	-	-
	B5	-	-	-	-	-

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

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

Таблица 11 – Интерактивная матрица проекта «Угрозы проекта и слабые стороны»

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

Результаты анализа представлены в итоговую таблицу 13.

Таблица 12 – Итоговая таблица SWOT-анализа

	Сильные стороны научно-исследовательского проекта	Слабые стороны научно-исследовательского проекта
	С1. Низкая стоимость исходного сырья; С2. Высокий уровень физико- и термомеханических, и	Сл1. Отсутствие прототипа научной разработки; Сл2. Невысокие объемы производства; Сл3. Риск нарушения правил безопасности и

	<p>оптических свойств продукции; С3. Получение высококачественных продуктов; С4. Экологичность технологии; С5. Методика является перспективной.</p>	<p>возникновения различных непредвиденных ситуаций; Сл4. Сложность подбора режима; Сл5. Нет возможности поставить обеспечить крупносерийное производство.</p>
<p>Возможности В1. Использование оборудования ИШНПТ ТПУ; В2. Появление Дополнительного спроса на новый продукт; В3. Внедрение технологии в производство; В4. Участие в грантах В5. Выход на зарубежные рынки.</p>	<p>Направления развития В2С2. Высокий уровень физико- и термомеханических свойств продукции позволит расширить спрос; В3С2С4. Высокий уровень физико- и термомеханических свойств продукции и экологичность технологии являются основанием для внедрения технологии в производство; В4С2С4. Высокий уровень физико- и термомеханических свойств продукции и экологичность технологии позволит участвовать в грантах; В5С1С2. Низкая стоимость исходного сырья и высокий уровень физико-механических свойств продукции является хорошим основанием для выхода на зарубежные рынки</p>	<p>Сдерживающие факторы В1Сл4. Новейшее оборудование позволит на ранних стадиях исследование выявить и предотвратить появление брака</p>
<p>Угрозы У1. Появление зарубежных аналогов и более ранний их выход на рынок; У2. Разработка новых технологий конкурентами и снижение цен.</p>	<p>Угрозы развития У1С1С2. Более ускоренные темпы разработки и производства и поиск технологического решения для ускорения технологического процесса.</p>	<p>Уязвимости: У2Сл2. Разработка новых технологий для увеличения объема производства; У1Сл4. Введение систем совершенствования производственных процессов для снижения брака.</p>

В результате SWOT-анализа показано, что на преимущества разрабатываемой технологии преобладают над ее недостатками. Данные недостатки, которые на данный момент на практике не устранены, но в теории уже есть возможности для их устранения. 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 13.

Таблица 13 – Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

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

документации по ОКР)			
-------------------------	--	--	--

Таким образом, выделили основные этапы работ и их содержание, а также исполнителей, выполняющие данные работы.

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:

$$t_{ожі} = \frac{3t_{mini} + 2t_{maxi}}{5} \quad (4)$$

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

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

t_{maxi} – 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.

$$T_{pi} = \frac{t_{ожі}}{ч_i} \quad (5)$$

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

$t_{ожі}$ – 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 (6):

$$T_{ki.инж} = T_{pi} \cdot k_{кал} \quad (6)$$

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

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

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

Календарный коэффициент определяется по формуле:

$$K_{\text{кал. инж}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}}} = \frac{365}{365 - 104 - 14} = 1,48 \quad (7)$$

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 (2023 год).

Расчеты временных показателей проведения научного исследования обобщены в таблице 14.

Таблица 14 – 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		$t_{\text{ож}}$, 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	2	-	4	-	2,8	-	2,8	4
2. Календарное планирование выполнения работ	1	3	3	4	1,8	3,4	2,6	4
3. Обзор научной литературы	-	6	-	10	-	7,6	7,6	11
4. Выбор методов исследования	-	3	-	5	-	3,8	3,8	6
5. Планирование эксперимента	2	6	4	8	2,8	6,8	4,8	7
6. Подготовка образцов для эксперимента	-	5	-	7	-	5,8	5,8	9
7. Проведение эксперимента	-	15	-	20	-	17	17	25
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:	7	59	15	84	13,5	68,5	68,5	102

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

На основе таблицы составлен календарный план-график выполнения проекта с использованием диаграммы Ганта (таблица 15).

Таблица 15 – 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	4													
2	Календарное планирование выполнения ВКР	Исп1 Исп2	4	■												
3	Обзор научной литературы	Исп2	11		■											
4	Выбор методов исследования	Исп2	6			■										
5	Планирование эксперимента	Исп1 Исп2	7			■										
6	Подготовка образцов для эксперимента	Исп2	9				■									
7	Проведение эксперимента	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 образца на основе YSZ и MgAl₂O₄. Результаты расчета затрат представлены в таблице 16.

Таблица 16— Затраты на получение образца на основе YSZ и MgAl₂O₄

Наименование	Количество	Цена за ед., руб.	Итого затраты, руб.
Нанопорошок TZ-10YS, кг	0,03	11250	337,5
Нанопорошок MgAl ₂ O ₄ , кг	0,06	12243	734,58
Графитовая бумага, шт.	1	383	383
Шлифовальная бумага, шт.	40	20	800
Итого:			2255,08

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:

$$H_A = \frac{1}{n} \quad (8)$$

где n — срок полезного использования в количестве лет.

Амортизация оборудования рассчитывается по формуле:

$$A = \frac{H_A I}{12} \cdot m \quad (9)$$

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

Таблица 17 – 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 «SPS-515S»	1	20	0,2	5	15880000	13233
2	Муфельная печь LHT 08/18 (Nabertherm)	1	10	0,5	10	2590696	10794
3	XRD-7000S (Shimadzu, Япония)	1	20	0,2	5	13000000	10833
4	Сканирующий электронный микроскоп JEOL 7500FA	1	10	0,2	10	18000000	30000
5	Ультразвуковая ванна ГРАД-40	1	5	0,5	20	20500	170
6	Спектрофотометр СФ-56 БИК	1	5	0,3	20	235200	1176
7	Универсальный твердомер Duravision G5-20	1	8	0,3	12,5	208000	650
Итого:						66856 руб.	

4.3.3 Основная заработная плата исполнителей темы

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

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

$$Z_{осн} = Z_{дн} \cdot T_p \quad (10)$$

где $Z_{дн}$ – среднедневная заработная плата, руб.; T_p – продолжительность работ, выполняемых работником, раб. дн. (таблица 14).

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

Для шестидневной рабочей недели (рабочая неделя руководителя):

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_{\text{м}} \cdot M}{F_{\text{д}}} = \frac{51285 \cdot 10,3}{246} = 2147,3 \text{ руб.} \quad (11)$$

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:

- при отпуске в 28 раб. дня – $M=11,2$ месяца, 5-дневная рабочая неделя;
- при отпуске в 56 раб. дней – $M=10,3$ месяца, 6-дневная рабочая неделя.

Для пятидневной рабочей недели (рабочая неделя инженера):

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_{\text{м}} \cdot M}{F_{\text{д}}} = \frac{33150 \cdot 11,2}{213} = 1743,1 \text{ руб.} \quad (12)$$

Должностной оклад работника за месяц:

- для руководителя:

$$Z_{\text{м}} = Z_{\text{тс}} \cdot (1 + k_{\text{пр}} + k_{\text{д}}) \cdot k_{\text{р}} = 26300 \cdot (1 + 0,3 + 0,2) \cdot 1,3 = 51285 \text{ руб.} \quad (13)$$

- для инженера:

$$Z_{\text{м}} = Z_{\text{тс}} \cdot (1 + k_{\text{пр}} + k_{\text{д}}) \cdot k_{\text{р}} = 17000 \cdot (1 + 0,3 + 0,2) \cdot 1,3 = 33150 \text{ руб.} \quad (14)$$

где $Z_{\text{тс}}$ – 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 18 – Баланс рабочего времени исполнителей

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

Таблица 19 – Расчет основной заработной платы исполнителей

Исполнители НИ	$Z_{\text{тс}}, \text{руб}$	$k_{\text{пр}}$	$k_{\text{д}}$	$k_{\text{р}}$	$Z_{\text{м}}, \text{руб}$	$Z_{\text{дн}}, \text{руб}$	$T_{\text{р}}, \text{раб.дн.}$	$Z_{\text{осн}}, \text{руб}$
Руководитель	26300	0,3	0,2	1,3	51285	2147,3	13,5	28988,6
Инженер	17000	0,3	0,2	1,3	33150	1743,1	68,5	119402,4
Итого:								148391

Дополнительная заработная плата определяется по формуле:

– для руководителя:

$$Z_{\text{доп}} = K_{\text{доп}} \cdot Z_{\text{осн}} = 0.15 \cdot 28988,6 = 4348,3 \text{ руб.} \quad (15)$$

– для инженера:

$$Z_{\text{доп}} = K_{\text{доп}} \cdot Z_{\text{осн}} = 0.15 \cdot 119402,4 = 17910,4 \text{ руб.} \quad (16)$$

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

4.3.4 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)

Отчисления во внебюджетные фонды определяется по формуле:

– для руководителя:

$$Z_{\text{внеб}} = K_{\text{внеб}} \times (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}) = 0.3 \times (28988,6 + 4348,3) = 10001,1 \text{ руб.} \quad (17)$$

– для инженера:

$$Z_{\text{внеб}} = K_{\text{внеб}} \times (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}) = 0.3 \times (119402,4 + 17910,4) = 41193,8 \text{ руб.} \quad (18)$$

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%.

4.3.5 Накладные расходы

Накладные расходы включают в себя следующие расходы: печать и ксерокопирование материалов исследования, оплата услуг связи и т.д. Сумма 5 статьи затрат, рассчитанных выше, приведена в таблице ниже и используются для расчета накладных расходов.

Таблица 20 – Группировка затрат по статьям

Статьи					
1	2	3	4	5	6
Амортизация	Сырье, материалы	Основная заработная плата	Дополнительная заработная плата	Отчисления на социальные нужды	Итого без накладных расходов
66856	2255,08	148391	22258,7	51194,9	290955,68

Величина накладных расходов определяется по формуле (19):

$$Z_{\text{нак}} = (\text{сумма статей } 1 \div 5) \cdot k_{\text{нр}} \quad (19)$$

где k_{np} – коэффициент, учитывающий накладные расходы. Величина коэффициента принимается равной 0,2.

$$Z_{\text{нак}} = (Z_{\text{м}} + Z_{\text{з}} + Z_{\text{внеб}}) \cdot 0.2 \quad (20)$$

$$Z_{\text{нак}} = 290955,68 \cdot 0.2 = 58191,1 \text{ руб.}$$

4.3.6 Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта

Определение бюджета на проект приведено в таблице 21.

Таблица 21 – Бюджет затрат на проектирование закалочной установки

Наименование	Текущий Проект	Аналог 1	Аналог 2
1. Материальные затраты проекта	2255,08	1986,3	3136,5
2. Специальное оборудование	66856	72305	70987
3. Затраты по основной зарплате	148391	156963	160325
4. Затраты по дополнительной зарплате	22258,7	15985,2	16765,12
5. Отчисления во внебюджетные фонды	51194,9	69238,49	58238,49
6. Накладные расходы	58191,1	63432,9	51025,3
Бюджет затрат на проектирование, руб.	349146,8	379910,9	360477,4

Бюджет всех затрат проекта равен 349146,8 рублей. Наибольший процент бюджета составляют затраты по основной зарплате (42,5 %).

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

Для определения эффективности исследования рассчитан интегральный показатель эффективности научного исследования путем определения интегральных показателей финансовой эффективности и ресурсоэффективности.

Интегральный финансовый показатель разработки рассчитывается как:

$$I_{\text{финр}}^{\text{Ана.}i} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{\text{max}}} \quad (21)$$

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

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

Φ_{max} – максимальная стоимость исполнения.

$\Phi_{\text{текущ.проект}} = 349146,8$ руб, $\Phi_{\text{исп.1}} = 379910,9$ руб, $\Phi_{\text{исп.2}} = 321677,4$ руб.

$$I_{\text{финр}}^{\text{тек.пр.}} = \frac{\Phi_{\text{тек.пр.}}}{\Phi_{\text{max}}} = \frac{349146,8}{379910,9} = 0,92$$

$$I_{\text{финр}}^{\text{Ана.1}} = \frac{\Phi_{\text{Ана.1}}}{\Phi_{\text{max}}} = \frac{379910,9}{379910,9} = 1$$

$$I_{\text{финр}}^{\text{Ана.2}} = \frac{\Phi_{\text{Ана.2}}}{\Phi_{\text{max}}} = \frac{350477,4}{379910,9} = 0,95$$

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

Интегральный показатель ресурсоэффективности вариантов выполнения НИР (I_{pi}) определен путем сравнительной оценки их характеристик, распределенных с учетом весового коэффициента каждого параметра (таблица 22).

Таблица 22 – Сравнительная оценка характеристик вариантов НИР

Объект исследования / Критерии	Весовой коэффициент параметра	Текущий проект	Исп.2	Исп.3
1. Ремонтпригодность	0,1	5	4	4
2. Стабильность работы	0,1	5	4	5
3. Долговечность	0,15	5	3	4
4. Безопасность при использовании установки	0,2	5	4	4
5. Помехоустойчивость	0,15	5	4	3
6. Потребность в ресурсах памяти	0,15	5	4	5
7. Простота эксплуатации	0,15	5	4	3

Расчет интегрального показателя для разрабатываемого проекта:

$$I_{p1} = 0,1 * 5 + 0,1 * 5 + 0,15 * 5 + 0,2 * 5 + 0,15 * 5 + 0,15 * 5 + 0,15 * 5 = 4,1$$

$$I_{p2} = 0,1 * 4 + 0,1 * 4 + 0,15 * 3 + 0,2 * 4 + 0,15 * 4 + 0,15 * 4 + 0,15 * 4 = 3,85$$

$$I_{p3} = 0,1 * 4 + 0,1 * 5 + 0,15 * 4 + 0,2 * 4 + 0,15 * 3 + 0,15 * 5 + 0,15 * 3 = 3,95$$

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

$$I_{\text{Ана.}i} = \frac{I_{\text{р}i}}{I_{\text{финр.}i}} \quad (22)$$

$$I_{\text{тек.пр.}} = \frac{4,1}{0,92} = 4,46 ; I_{\text{Ана.1}} = \frac{3,85}{1} = 3,85 ; I_{\text{Ана.2}} = \frac{3,95}{0,95} = 4,16$$

Далее интегральные показатели эффективности каждого варианта НИР сравнивались с интегральными показателями эффективности других вариантов с целью определения сравнительной эффективности проекта (таблица 23).

Таблица 23 – Сравнительная эффективность разработки

№ п/п	Показатели	Текущий проект	Исп.2	Исп.3
1	Интегральный финансовый показатель разработки	0,63	1	0,95
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	4,1	3,85	3,95
3	Интегральный показатель эффективности	4,46	3,85	4,16
4	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	1	0,86	0,93

Сравнение среднего интегрального показателя сопоставляемых вариантов позволило сделать вывод о том, что наиболее финансово- и ресурсоэффективным является вариант 1 (текущий проект). Наш проект является более эффективным по сравнению с конкурентами.

Выводы по разделу

В результате выполнения целей раздела можно сделать следующие выводы:

1. Результатом анализа конкурентных технических решений является выбор одного из вариантов реализации НИР как наиболее подходящего и оптимального по сравнению с другими;

2. В ходе планирования для руководителя и инженера был разработан график реализации этапа работ, который позволяет оценивать и планировать рабочее время исполнителей. Определено следующее: общее количество календарных дней для выполнения работ составляет 102 дней; общее количество дней, в течение которых работал инженер, составляет 98 дней;

общее количество дней, в течение которых работал руководитель, составляет 20 дней;

3. Для оценки затрат на реализацию проекта разработан проектный бюджет, который составляет 349146,8 руб;

4. Результат оценки эффективности ИР показывает следующие выводы:

1) значение интегрального показателя ресурсоэффективности ИР составляет 4,1, по сравнению с 3,85 и 3,95;

2) значение интегрального показателя эффективности ИР составляет 4,46, по сравнению с 3,85 и 4,16, и является наиболее высоким, что означает, что техническое решение, рассматриваемое в ИР, является наиболее эффективным вариантом исполнения.

5. СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ

Введение

Научно-исследовательская работа была выполнена в Научно-образовательном инновационном центре «Наноматериалы и нанотехнологии», кафедра НМНТ, ТПУ. Рабочее место, где была выполнена основная работа, находится в 021 аудитории 10 корпуса ТПУ.

Данная диссертация посвящена приготовление функционально-градиентной оптической керамики с кубической структурой на основе диоксида циркония, стабилизированного оксидом иттрия и алюмомагниевого шпинели. В качестве исходных материалов были использованы диоксид циркония, стабилизированный оксидом иттрия (TZ-10YS, Tosoh Corp., Япония) и коммерческие нанопорошки алюмомагниевого шпинели (SC30R, Baikowski Malakoff Inc., США).

После подготовки порошка спеченный образец проходит методом электроимпульсного плазменного спекания. Полученные образцы подвергаются термическому отжигу, далее шлифуются и полируются. Изучены его оптическо - люминесцентные и физико-механические характеристик, а основными областями его применения являются оптические устройства медицинской техники, изделия для оптоэлектроники, сцинтилляционных детекторах и другие оптические устройства.

Используемое в работе оборудование и материалы, при несоблюдении техники безопасности, несут потенциальную опасность для здоровья работника, кроме того, на рабочем месте возможны различные чрезвычайные ситуации, например пожар, поэтому обнаружение вредных и опасных факторов и минимизация их воздействия на работника является важной задачей.

Данный раздел настоящей диссертации посвящен выявлению вредных и опасных факторов и поиску способов предотвращения их влияния на работника в процессе промышленности производства.

5.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

5.1.1. Правовые нормы трудового законодательства

Правовая норма трудового законодательства, а именно Трудовой кодекс Российской Федерации от 30 декабря 2001 г. N 197-ФЗ [53], регулирует трудовую деятельность лаборантов, выполняющих научно-исследовательскую работу.

Режим рабочего времени. Начало, окончание или общая продолжительность рабочего дня определяется соглашением работников лаборатории и работодателя. Реализуется в режимах: нормированного рабочего времени (пятидневная с двумя выходными днями (ТК РФ ст. 100)) и гибкого рабочего времени (ТК РФ ст. 102).

Трудовое законодательство Российской Федерации регулирует трудовую деятельность работников лабораторий применительно к вредным и опасным условиям труда. Для предотвращения вредного и опасного воздействия химических веществ работники бесплатно обеспечиваются средствами индивидуальной защиты (ст. 221 ТК РФ).

Оплата труда работников лабораторий, работающих во вредных и (или) опасных условиях труда, повышена и устанавливается работодателем в размере не менее 4% от заработной платы (ст. 147 ТК РФ).

Виды компенсаций при работе во вредных условиях труда, и т.д. В лаборатории вредные условия труда 2 класса (допустимые условиями труда) согласно [54]),

Отчего: работникам предоставляется ежегодный дополнительный оплачиваемый семидневный отпуск (ст.117 ТК РФ), работники должны проходить обязательные предварительные и периодические медицинские осмотры для пригодности и предупреждения проф. заболеваний (ст.213 ТК РФ).

Согласно ПНД Ф 12.13.1-03 [55], в химико-аналитических лабораториях могут работать лица старше 18 лет, прошедшие медицинский осмотр. Допускается после прохождения вступительного инструктажа по соблюдению

техники безопасности. Через регулярные (два раза в год) и разовые брифинги. В студии определены ответственные за соблюдение техники безопасности, хранение материалов, обеспечение средствами индивидуальной защиты (СИЗ) и аптечками. Помещение рабочего доступа является помещением для анализа и должно быть оборудовано вытяжной вентиляцией, водопроводом, раковинами и канализацией. Стены оклеены, на полу линолеум.

5.1.2 Эргономические требования к правильному расположению и компоновке рабочей зоны

Компоновка рабочего места. Характер основной работы при выполнении ВКР предполагал оборудование рабочего места для проведения работ стоя. Согласно ГОСТ 12.2.033-78 [56] рабочее место для выполнения работ стоя организуется в случае, когда выполняемая физическая работа является средней тяжести или тяжелой, а также в случае превышения величины рабочей зоны для сидячего рабочего места. Конструкция и взаимное расположение элементов на рабочем месте должны соответствовать характеру выполняемой работы, физиологическим и психологическим требованиям, а также обеспечивать удобство при работе (соответствовать антропометрии работника).

В ГОСТ 12.2.033-78 [56] установлены следующие требования для рабочего места стоя:

- рабочее место должно обеспечивать выполнение всех операций в пределах зоны досягаемости моторного поля;
- при проектировании рабочего места следует учитывать антропометрические показатели работников в зависимости от их пола или устанавливать средние показатели при работе на этом месте персонала обоих полов;
- организация рабочего места и конструкция оборудования должны обеспечивать прямое и свободное положение корпуса тела, работающего или его наклон вперед не более чем на 15°;

- конструкция рабочего места должно обеспечивать оптимальное положение рабочего относительно рабочей поверхности, за счет регулируемой высоты рабочей поверхности или подставок для ног.

Так же ГОСТ 12.2.033-78 [56] установлены требования к расположению на рабочем месте органов управления и средств отображения информации для более продуктивного выполнения операций, снижения травмоопасности и комфортной работы. Оборудование, используемое на рабочем месте, должно быть максимально эргономичным.

5.2 Производственная безопасность

Работа в данной лаборатории и оборудованием на ее базе связана с некоторыми вредными и опасными производственными факторами, подробное описание которых представлено далее. Вредные и опасные производственные факторы были определены из ГОСТ 12.0.003-2015 [57].

Перечень опасных и вредных факторов, характерных для проектируемой производственной среды, представлен в таблице 24.

Таблица 24 – Возможные опасные и вредные факторы

Факторы (ГОСТ 12.0.003-2015)	Нормативные документы
Производственные факторы, связанные с электрическим током, вызываемым разницей электрических потенциалов, под действие которого попадает работающий	ГОСТ 12.1.038 Электробезопасность. Допустимые 82 ССБТ. Предельно уровни прикосновения и токов; ГОСТ 12.1.0192017 напряжений ССБТ. Электробезопасност. Общие требования и номенклатура видов защиты
Повышенная или пониженная температура материальных объектов рабочей зоны	ГОСТ 12.2.00391 ССБТ. Оборудование производственное. Общие требования безопасности
Химически вредные вещества в воздухе рабочей зоны	ГОСТ 12.1.007-76 Система стандартов безопасности труда. Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности ГОСТ 12.1.000-88 ССБТ. Общие санитарно -гигиенические требования к воздуху рабочей зоны
Производственные факторы, связанные с акустическими колебаниями в производственной среде (повышенным уровнем и другими неблагоприятными характеристиками шума)	ГОСТ 12.1.029-80 ССБТ. Средства и методы защиты от шума. Классификация; ГОСТ 12.1.003-2014 ССБТ. Шум. Общие требования безопасности;

	СП 51.13330.2011. Защита от шума. Актуализированная редакция СНиП 2303-2003
Производственные факторы, обладающие свойствами психофизиологического воздействия на организм человека (активное наблюдение за ходом производственного процесса, монотонность труда, перенапряжение анализаторов)	МР 2.2.9.2311 – 07 «Профилактика стрессового состояния работников при различных видах профессиональной деятельности»
Производственные факторы, связанные с отсутствием или недостатком необходимого искусственного освещения	ГОСТ Р 55710-2013 Освещение рабочих мест внутри зданий нормы и методы измерений

Производственные факторы, связанные с электрическим током, вызываемым разницей электрических потенциалов, под действие которого попадает работающий. При изготовлении образцов керамики из YSZ и $MgAl_2O_4$ возникает необходимость работы на электрооборудовании, таком как, испытательная установка SPS-1500A, низкоскоростная пила IsoMet (BUENLER), шлифовально-полировочная полуавтоматическая система EcoMet 300/AutoMet 300 (BUENLER), высокотемпературная муфельная печь LHT 08/18 (Nabertherm), вследствие чего возникает вероятность прохождения электрического тока через тело человека. Опасное и вредное воздействия на людей электрического тока проявляются в виде электротравм (судороги, остановка сердца, остановка дыхания, ожоги и др.) и заболеваний. Результат воздействия тока на человека зависит от величины силы тока, его рода и частоты, продолжительности воздействия и множества других факторов. Причиной поражения электрическим током в условиях лаборатории могут стать случайное прикосновение к токоведущим частям или появление напряжения на металлических частях оборудования.

Напряжение прикосновения и токи при нормальном (неаварийном) режиме электроустановки, не должны превышать 8В и 1мА, соответственно (постоянный ток) или 2В, 0.3мА (переменный ток частотой 50 Гц) согласно 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов [58].

Для обеспечения защиты от прямого прикосновения необходимо применение таких технических способов и средств основной защиты, как:

основная изоляция, защитное отключение, безопасное расположение токоведущих частей, средства индивидуальной защиты по ГОСТ 12.1.0192017 ССБТ. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты [59].

Повышенная или пониженная температура материальных объектов рабочей зоны. При возникновении неисправностей в работе оборудования высокотемпературная муфельная печь LHT 08/18 (Nabertherm), а также системы подачи воды шлифовально-полировочной полуавтоматической системы EcoMet 300/AutoMet 300 (BUENLER) возможно термическое поражение тканей организма человека.

Конструкция производственного оборудования и (или) его размещение должны исключать контакт его горючих частей с пожар взрывоопасными веществами, если такой контакт может явиться причиной пожара или взрыва, а также исключать возможность со прикасания работающего с горячими частями или нахождение в непосредственной близости от таких частей, если это может повлечь за собой травмирование, перегрев работающего. Если назначение производственного оборудования и условия его эксплуатации (например, использование вне производственных помещений) не могут полностью исключить контакт работающего с горячими его частями, то эксплуатационная документация должна содержать требование об использовании средств индивидуальной защиты по ГОСТ 12.2.003-91 ССБТ. Оборудование производственное. Общие требования безопасности [60].

Конструкция производственного оборудования должна исключать опасность, вызываемую разбрызгиванием горячих обрабатываемых и (или) используемых при эксплуатации материалов и веществ. Если конструкция не может полностью обеспечить исключение такой опасности, то эксплуатационная документация должна содержать требования об использовании средств защиты, не входящих в конструкцию [60].

Химически вредные вещества в воздухе рабочей зоны. Химически опасным производственным фактором является микродисперсный порошок

$ZrO_2(Y_2O_3)$ и $MgAl_2O_4$. Металлический цирконий и двуокись циркония нерастворимы в биосредах, в опыте не дают острого токсического эффекта, их аэрозоли при длительном воздействии оказывают слабо выраженное фиброгенное действие. Кроме токсического действия микродисперсные порошки способны оказывать раздражающий эффект на органы дыхания.

Предельно допустимая концентрация (ПДК) двуокиси циркония в воздухе рабочей зоны по ГОСТ 12.1.005-88 составляет 6 мг/м³. По степени воздействия на организм человека двуокись циркония относится по ГОСТ 12.1.007-76 к 3-му классу опасности [61].

Для обеспечения безопасности персонала на производствах по получению ультрадисперсных порошков и пудр, а также в местах исследования таких порошков, для создания чистого помещения осуществляются технический контроль, очистка воздуха и воды, а персонал пользуется средствами индивидуальной защиты (респираторы, халаты, перчатки) согласно ГОСТ 12.4.132-83 [62], ГОСТ 12.4.299-2015 [63].

Повышенным уровнем и другими неблагоприятными характеристиками шума. При работе в лаборатории с электрооборудованием и работе вентиляционных систем помещения, возникают звуковые колебания в диапазоне слышимых частот, которые способны оказать вредное воздействие на безопасность и здоровья работника.

Шум на рабочем месте оказывает раздражающее влияние на работника, повышает его утомляемость, а при выполнении задач, требующих внимания и сосредоточенности, способен привести к росту ошибок и увеличению продолжительности выполнения задания. Длительное воздействие шума влечет тугоухость работника вплоть до его полной глухоты, увеличению риска артериальной гипертензии, болезней сердечно-сосудистой, нервной системы и др. ГОСТ 12.1.003-2014. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Шум. Общие требования безопасности (Переиздание) [64].

Таблица 25 – Предельно допустимые и допустимые уровни звукового давления, уровни звука, эквивалентные и максимальные скорректированные

по А уровни звука в помещениях производственных, жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки СП 51.13330.2011. Защита от шума. Актуализированная редакция СНиП 23-03-2003 [65].

Назначение помещений или территорий	Для источников постоянного шума									Для источников непостоянного шума		
	Уровни звукового давления дБ, в октавных полосах частот со среднегеометрическими частотами, Гц									Уровень звука корректированный по А, LA, дБ	Эквивалентный корректированный по А уровень звуча L _{Аэкв} , дБ	Максимальный корректированный по А уровень звуча L _{Аmax} , дБ
	31.5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000			
Помещения лабораторий для проведения экспериментальных работ, помещения для измерительных и аналитических работ	103	91	83	77	73	70	68	66	64	75	75	90

Для защиты от воздействия шума на организм человека возможно применение архитектурно-планировочных методов, которые включают в себя: рациональное размещение технологического оборудования, машин и механизмов, рациональное размещение рабочих мест, создание шумозащитных зон в различных местах нахождения человека согласно ГОСТ 12.1.029-80 ССБТ. Средства и методы защиты от шума. Классификация [66].

Активное наблюдение за ходом производственного процесса, монотонность труда, перенапряжение анализаторов. При изготовлении образцов ФГК необходим контроль процессов прессования, спекания и обработки поверхности, который вызывает зрительную и умственную нагрузку на организм человека.

При умственной нагрузке необходима длительность сосредоточенного внимания, выраженная ответственность, плотность сигналов и сообщений в единицу времени по МР 2.2.9.2311 – 07 «Профилактика стрессового состояния работников при различных видах профессиональной деятельности» [67]. Оказывает угнетающее влияние на психическую деятельность ухудшаются функции внимания (объем, концентрация, переключение), памяти (кратковременной и долговременной), восприятия (появляется большое число ошибок).

При зрительной нагрузке необходима высокая координация сенсорных и моторных элементов зрительной системы. Вызывает головную боль, ухудшение зрения, астенопию – патологического состояния, связанного с быстрым переутомлением глаз.

Для устранения накопленной усталости и нагрузки на организм человека необходимо выполнять комплекс физических упражнений на координацию движений, концентрацию внимания, комплекс упражнений на глаз, использовать методику психической саморегуляции.

Нормы освещения научно-технических лабораторий, в том числе физических, стилометрических, спектрографических и т. п., по [68] представлены в таблице 26.

Получение светопропускающей керамики предполагает зрительные работы, относящиеся к VI разряду (грубая точность). Нормы разных видов освещения для промышленных помещений со зрительными работами шестого разряда [69] представлены в таблице 28.

Таблица 26 – Нормируемые показатели естественного, искусственного и совмещенного освещения научно-технических лабораторий

Рабочая поверхность и плоскость нормиро	Естественное освещение КЕО е н, %		Совмещенное освещение КЕО е н, %		Искусственное освещение		
	в	и	в	и	освещенность, лк		
	ц	п	ц	п			

вания КЕО и освещенн ости (Г – горизонт льная, В - вертикал ьная) и высота плоскост и над полом, м					при комбинирован ом освещении		при обьем освещении	показа тель диско мфорт а, М, не более	коэффициен т пульсации освещеннос ти, КЕО е н, %, не более
					всег о	От общег о			
Г-0,8	3,5	1,2	2,1	0,7	500	300	400	40	10

Таблица 27 – Требования к освещению помещений промышленных предприятий (для категории VI)

Искусственное освещение					
Освещенность, лк			Сочетание нормируемых величин объединенного показателя дискомфорта UGR и коэффициента пульсации		
при системе комбинированного освещения		при системе общего освещения	UGR, не более	Кп, %, не более	
Всего	В том числе от общего				
-	-		200	25	20

В результате недостатка освещения ухудшается сон, увеличивается зрительная нагрузка, развиваются офтальмологические заболевания.

В рабочем месте применяется совмещенное освещение. Основным источником света являются 6 люминесцентных ламп с зеркальными решетками, расположенных в 3 ряда. В каждом ряду можно установили 3 светильников типа ЛТБ-40 с мощностью 40 Вт (с длиной 1,2м, шириной 0,4м).

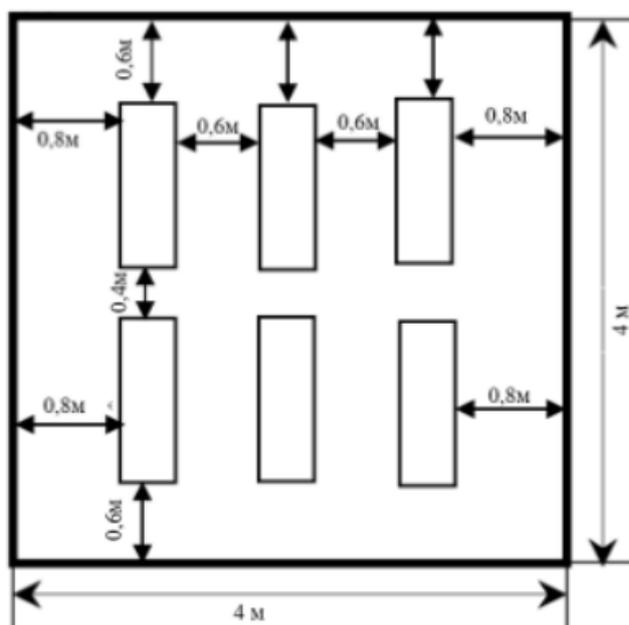


Рисунок 8 – План расположения светильников в рабочем помещении

Таблица 28 – Параметры для расчета освещенности помещения на рабочих местах

Высота помещения Н, м	2,5
Длина помещения А, м	4
Ширина помещения В, м	4
Коэффициент отражения стен R _с , %	50
Коэффициент отражения потолка R _п , %	70
Коэффициент запаса, к	1,5
Коэффициент размерности Z	1,2
Высота рабочей поверхности h _р , м	0,9
Мощность, Вт	40
Световой поток одной лампы Φ, лм	2850

Произведем расчет искусственного освещения помещения:

Определяем индекс помещения i по формуле:

$$i = \frac{S}{H * (A + B)} = \frac{4 * 4}{2,5 * (4 + 4)} = 0,8$$

Коэффициент использования светового потока: $\eta = 41\%$.

Определяем потребный световой поток ламп в каждом из рядов по формуле 1:

$$\Phi = \frac{E_H \cdot S \cdot K_3 \cdot Z}{N \cdot \eta} \quad (1)$$

где E_H – нормируемая минимальная освещенность, (СНиП 23-05-95)

$E_H = 400$ лк,

k – коэффициент запаса,

n – число ламп в помещении,

η – коэффициент использования,

Z – коэффициент равномерности.

$$\Phi = \frac{400 \cdot 16 \cdot 1,2 \cdot 100\%}{2 \cdot 41\%} = 14049 \text{ лм}$$

В каждом светильнике 2 лампы со световым потоком 2850 лм.

Необходимое число светильников в ряду:

$$N = \frac{14049}{2 \cdot 2850} \approx 2$$

Фактическая освещённость определяется E_ϕ :

$$E_\phi = 2850 \cdot 2 \cdot 2 = 11400 \text{ лм}$$

Рассчитываем фактическое значение освещения в помещении по формуле:

$$E_{\text{фактич.}} = \frac{\Phi \cdot N \cdot \eta}{S \cdot K_3 \cdot Z \cdot 100\%} = \frac{14049 \cdot 2 \cdot 41\%}{16 \cdot 1,5 \cdot 1,1 \cdot 100\%} = 436 \text{ лк}$$

Согласно стандарту, рекомендуемое освещение разрядной камеры, составляет равен 400 лк. В рассматриваемом рабочем помещении состоится 436лк приходится на искусственное освещение без учета естественного освещения. Таким образом, такое рабочее место соответствует требованию освещения рабочих мест в производственных помещениях, указанные в СНИП 23-05 [68].

5.3 Экологическая безопасность

При выполнении исследования лаборатория на базе «Нано-Центра» ТПУ не представляет собой промышленное предприятие, все продукты

производятся в лабораторных количествах, следовательно, создание защиты селитебной зоны, как санитарно-защитная зона, не является необходимым.

Одним из возможных опасных факторов для атмосферы в ходе получения ФГК на основе $MgAl_2O_4$ и $ZrO_2(10\% Y_2O_3)$ методом ЭИПС возможно распространение порошка иттрий-стабилизированного диоксида циркония и алюмомагниевого шпинели в воздушной среде. Защита атмосферного воздуха от выбросов представлена очисткой вредных выбросов в специальных аппаратах (циклоны, фильтры и т.п.) и рассеиванием очищенных выбросов в воздухе. Выбросы порошка, появляющиеся при проведении исследования, не превышают ПДК [70].

Изготовленные образцы ФГК подвергаются очистке с помощью воды. Остатки порошка через водопроводную систему могут попадать в почву и в воду. Чтобы очистить загрязнённую воду, применяются методы экстракции, обратного осмоса, ректификации и ультрафильтрации и др.

Избыточное количество вредных веществ в воде вредно для людей, животных и растений. Количество отходов, попадающие в процессе исследования в воду, не превышает ПДК [71].

Во время проведения опытов образуются вредные твердые отходы: бумага для пресс-формы. При попадании порошковых материалов в почву возможно изменение её состава, что негативно влияет на находящиеся там живые организмы. Законодательство требует соблюдения правил утилизации вредных твердых отходов.

Таким образом, проведение исследования безопасно для атмосферы, гидросферы и литосферы.

5.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях

К чрезвычайным ситуациям относят опасные события или явления, которые являются причиной нарушения безопасности жизнедеятельности.

В рабочем месте есть вероятность возникновения чрезвычайных ситуаций техногенного (разрыв, пожар) и природного (наводнение, землетрясение и т.д.) характера.

Сильный мороз зимой является минимальной температурой, опасной для определенной лаборатории. Сильные морозы является причиной увеличения числа техногенных пожаров. В случае сильных мороз зимой в лаборатории оборудования требуют специальных изоляционных и морозильных устройств.

Для обертывания частей оборудования, которые легко замерзают, необходимо использовать теплоизоляционные материалы. Когда наступает зима, необходимо проверять, чтобы предотвратить повреждение упакованных теплоизоляционных материалов.

В лаборатории наиболее вероятно возникновение чрезвычайных ситуаций техногенного характера. На случай возникновения чрезвычайной ситуации в лаборатории должен быть предусмотрен следующий комплекс мероприятий:

- 1) необходимо эвакуировать людей или укрыть их в защитных сооружениях;
- 2) обеспечить людей индивидуальными средствами защиты;
- 3) организовать медицинскую помощь пострадавшим.

Рассмотрим наиболее типичную ЧС, такую как пожар в лаборатории.

Анализ пожарной безопасности.

В лаборатории может произойти авария, взрыв или пожар. Наиболее распространенная вероятная чрезвычайная ситуация – это пожар. Помещение лаборатории по степени пожароопасности относится к классу Б, т.к. в нем присутствует выделение горючей пыли или волокон [72].

Причинами пожара могут быть: оставление без присмотра нагревательных приборов; перегрузки по току; искрение; статическое электричество, нарушение правил пожарной безопасности при проведении работ и т.п.

Во избежание пожара в лаборатории должно быть обеспечено соблюдение теплового и электрического режима работы оборудования; все сотрудники лаборатории должны пройти противопожарный инструктаж.

Пожарный инвентарь и первичные средства пожаротушения должны содержаться в исправном состоянии и находиться на видном и легко доступном месте.

Если в лаборатории возник пожар, то после ликвидации пожара формируют комиссию, определяющую возможность дальнейшего использования лабораторного оборудования, которое проверяют на соответствие требованиям пожарной безопасности. При отсутствии повреждений возможно продолжение работ [73].

Выводы по разделу

Значение всех производственных факторов на изучаемом рабочем месте соответствует нормам, которые также были продемонстрированы в данном разделе.

Категория рабочей зоны по электробезопасности по Правила устройства электроустановок. Издание 7 [74]: помещение с повышенной опасностью; Группа персонала по электробезопасности согласно Приказу № 903н. «Об утверждении Правил по охране труда при эксплуатации электроустановок: I-ая». Присвоение группы I по электробезопасности производится путем проведения инструктажа, который должен завершаться проверкой знаний в форме устного опроса и (при необходимости) проверкой приобретенных навыков безопасных способов работы или оказания первой помощи при поражении электрическим током [75].

Категория тяжести труда в лаборатории по СанПиН 1.2.3685-21 "Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания" относится к категории Ib (работы, производимые сидя, стоя или связанные с ходьбой и сопровождающиеся физическим напряжением) [76].

Категория помещения по взрывопожарной и пожарной опасности согласно СП 12.13130.2009 «Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности» [77]: A, возможный класс пожара – B;

Категория объекта, оказывающего значительное негативное воздействие на окружающую среду согласно Постановление № 2398. Об утверждении критериев отнесения объектов, оказывающих негативное воздействие на окружающую среду, к объектам I, II, III и IV категорий [78]: III-ая.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изготовлена функционально-градиентная керамика на основе иттрий-стабилизированного диоксида циркония и алюмомагниевого шпинели, изучены закономерности протекания процесса спекания, определена плотность, измерена микротвердость и светопропускания и исследуемых материалов. Рассмотрены вопросы «финансового менеджмента, ресурсоэффективности и ресурсосбережения» и «социальной ответственности».

Показано, что оптическая функционально-градиентная керамика может быть изготовлены методом ЭИПС.

Получены образцы функционально-градиентной керамики состава MAS-YSZ с относительной плотностью 97%, светопропусканием 10 % и микротвердостью 14,08 ГПа.

Для повышения плотности, светопропускания и минимизации остаточной пористости ЭИПС следует проводить в диапазоне температур от 1300 до 1450 °С под давлением 100 МПа при относительно низких скоростях нагрева (<10 °С/мин) и увеличенной изотермической выдержке (продолжительность более 30 мин).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Минько, Д. В. Теория и практика получения функциональноградиентных материалов импульсными электрофизическими методами / Д. В. Минько, К. Е. Белявин, В. К. Шелег. – Минск: БНТУ, – 2020. – 450.
2. Paygin V. Effect of technological parameters on optical and mechanical properties of Spark Plasma Sintered transparent YSZ ceramics / V. Paygin, S. Stepanov, E. Dvilis, O. Khasanov, T. Alishin, D. Valiev // *Ceramics International*. – 2021 –Vol. 47. – Issue 8. –P. 11169-11175.
3. Xiao Zhuohao. Materials development and potential applications of transparent ceramics: A review / Zhuohao Xiao, Shijin Yu, Yueming Li, etc // *Materials Science and Engineering: R: Reports*. – 2020. – Vol. 139. – 100518.
4. Качаев А. А. Керамические функционально-градиентные материалы (обзор) / А. А. Качаев, М. Л. Ваганова, Д. В. Гращенко, Ю. Е. Лебедева // *Перспективные материалы*. – 2016. – № 9. – С. 51-58.
5. Özlem. Canpolat. SS316L/Al₂O₃ functionally graded material for potential biomedical applications / Özlem Canpolat, Aykut Çanakçı, Fatih Erdemir // *Materials Chemistry and Physics*. – 2023. – Vol. 293. – 126958.
6. Hussain, M. A. Improved sinterability of hydroxyapatite functionally graded materials strengthened with SS316L and CNTs fabricated by pressureless sintering / M.A. Hussain, A. Maqbool, F.A. Khalid, et al. // *Ceramics International*. – 2015 – Vol. 41. – №. 8. – P. 10125–10132.
7. Mishina, H. Fabrication of ZrO₂/AISI316L functionally graded materials for joint prostheses / H. Mishina, Y. Inumaru, K. Kaitoku // *Materials Science and Engineering: A*. – 2008 – Vol. 475 – P. 141–147.
8. Akmal, M. Interfacial diffusion reaction and mechanical characterization of 316L stainless steel-hydroxyapatite functionally graded materials for joint prostheses / M. Akmal, F.A. Khalid, M.A. Hussain // *Ceramics International*. – 2015. –Vol. 41. – №. 10 – P. 14458-14467.
9. Wu Botao. Optical properties of Ni²⁺ doped transparent ZnO.Al₂O₃.SiO₂ glass ceramics / Wu Botao, Qiao Yanbo, Ren Jin // *Journal of Wuhan University of*

- Technology. – 2007. –Vol. 29. – P. 251-253
10. Huang Rukai. Optimization design and research progress of functionally graded thermoelectric materials / Huang Rukai // Journal of Chifeng University (NATURAL SCIENCE EDITION). – 2016. –Vol. 32. –P. 33-34.
 11. Zhang Wei. Nonlinear dynamics analysis of aero engine blades / Zhang Wei, Feng Zhiqing, Cao Dongxing // Journal of Dynamics and Control. – 2012. – Vol. 10. – №. 3. – P. 213 – 221.
 12. Li, W. Han. Research and Application of Functionally Gradient Materials. / W. Li, & B. Han // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2018.394. 022065.
 13. Kawasaki, A. Concept and P/M fabrication of functionally gradient materials / A. Kawasaki, R. Watanabe // Ceramics International. – 1997. – Vol. 23. – №. 1. – P. 73–83
 14. Minoo Naebe. Functionally graded materials: A review of fabrication and properties / Minoo Naebe, Kamyar Shirvanimoghaddam // Applied Materials Today. – 2016. –Vol. 5. –P. 223-245. ISSN 2352-9407.
 15. T.H. Makoto Sasaki. Fabrication and properties of functionally gradient materials / T.H. Makoto Sasaki // Journal of the Ceramic Society of Japan. – 1991. – Vol. 99 –P. 1002–1013.
 16. X. Ding, X. Guo, B. Ilschner, N. Merk. DC- and pulse-plating of CuNi and CuZn gradient foils: evaluation by SEM/TEM, in: 2nd Int Symp. on FGMs, San Francisco, 1993.
 17. Cherradi, N. Worldwide trends in functional gradient materials research and development / N. Cherradi, A. Kawasaki, M. Gasik // Composites Engineering. – 1994. – Vol. 4. – №. 8. – P. 883-894.
 18. Gururaja Udupa, S. Gangadharan Functionally graded Composite materials: An overview / S. Gururaja Udupa, K.V. Shrikantha Rao // Procedia Materials Science, – 2014. – Vol. 5. – P. 1291 – 1299.
 19. Fukui, Y. C.B. Ponton. Measurement of Young's modulus and internal friction of an in-situ Al-Al₃Ni functionally gradient material / Y. Fukui, K. Takashima //

- Journal of Materials Science. – 1994. – Vol. 29. – №. 8. – P. 2281-2288.
20. Naga, S.M. Effect of $\text{La}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ coat on the hot corrosion of multi-layer thermal barrier coatings / S.M. Naga, et al. // *Materials & Design*. – 2016. – vol. 102. – P. 1-7.
 21. Ghosh, K.B. Functionally graded doped lanthanum cobalt ferrite and ceria-based composite interlayers for advancing the performance stability in solid oxide fuel cell / K.B. Ghosh, J. Mukhopadhyay, R.N. Basu // *Journal of Power Sources*. – 2016. –Vol. 328. – P. 15-27.
 22. Choy, K.L. Chemical vapour deposition of coatings / K.L. Choy // *Progress in Materials Science*. – 2003. –Vol. 48. – №. 2. – P. 57-170.
 23. Hirai, T. CVD processing / T. Hirai // *MRS Bull*. – 1995. –Vol. 20. – №. 1. – P. 45-47.
 24. Sasaki, M. Thermal fatigue resistance of CVD SiC/C functionally gradient material / M. Sasaki, T. Hirai // *Journal of the European Ceramic Society*. – 1994. –Vol. 14. – №. 3. – P. 257-260.
 25. Reina, A. Large area, few-layer graphene films on arbitrary substrates by chemical vapor deposition / A. Reina, et al. // *Nano Letters*. – 2009. –Vol. 9. – №. 1. – P. 30-35.
 26. Katayama, T. Fabrication of Al_2O_3 -W functionally graded materials by slipcasting method / T. Katayama, S. Sukenaga, N. Saito et al. // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2011. –Vol. 18. – №. 20.
 27. Andertová, J. Functional gradient alumina ceramic materials – heat treatment of bodies prepared by slip casting method / J. Andertová, et al. // *Journal of the European Ceramic Society*. – 2007. –Vol. 27. – №. 2-3. – P. 1325-1331.
 28. Van der Biest, O. Electrophoretic deposition of materials / O. Van der Biest, L. Vandeperre // *Annual Review of Material Science*. – 1999. –Vol. 29. – P. 327-352.
 29. Mahamood, R.M. Functionally Graded Material: An Overview / R.M. Mahamood, E.T. Akinlabi, M. Shukla et al. // *Proceedings of the World Congress on Engineering*. – 2012, – vol. III.

30. Kawasaki, A.W. R microstructural designing and fabrication of disk shaped functionally gradient material by powder metallurgy / A.W. Kawasaki. // Japan Society of Powder and Powder Metallurgy. – 1990, – vol.37.
31. Jin, G. Properties of multilayered mullite/Mo functionally graded materials fabricated by powder metallurgy processing / G. Jin, et al. // Materials Chemistry and Physics. – 2005. – Vol. 89. – №. 2-3.– P. 238-243.
32. Chenglin, C. Hydroxyapatite – Ti functionally graded biomaterial fabricated by powder metallurgy / C. Chenglin, et al. // Materials Science and Engineering A. – 1999. – Vol. 271. – №. 1-2.– P. 95-100.
33. Übeyli, M. The ballistic performance of SiC–AA7075 functionally graded composite produced by powder metallurgy / M. Übeyli, et al. // Materials & Design. – 2014. – Vol. 56. – P. 31-36.
34. Xin Jin. Microstructure and mechanical properties of ZrO₂/NiCr functionally graded materials / Xin Jin, Linzhi Wu, Yuguo Sun, Licheng Guo // Materials Science and Engineering: A. – 2009. – Vol. 509. – P. 63-68.
35. Paolo Gondoni. Enhancing light harvesting by hierarchical functionally graded transparent conducting Al-doped ZnO nano- and mesoarchitectures / Paolo Gondoni, Piero Mazzolini, Valeria Russo et al. // Solar Energy Materials and Solar Cells. – 2014. – Vol. 128. – P. 248-253.
36. Zhang, H. Optimization of high-pressure sintering of transparent zirconia with nano-sized grains / H. Zhang, B.N. Kim, K. Morita et al. // Journal of Alloys and Compounds. – 2010. – Vol. 508. – P. 196-199.
37. Tsukuma, K. Transparent 8 mol% Y₂O₃–ZrO₂ (8Y) Ceramics / K. Tsukuma, I. Yamashita, T. Kusunose // Journal of the American Ceramic Society. – 2008. – Vol. 91. – P. 813-818.
38. Двилис, Э. С. Закономерности влияния температуры электроимпульсного плазменного спекания на свойства прозрачной YSZ-керамики / Э. С. Двилис, В. Д. Пайгин, С. А. Степанов, О. Л. Хасанов // Новые Огнеупоры. – 2019. – №. 3.
39. Lei, L.W. Niihara, Transparent yttria stabilized zirconia from glycine-nitrate

- process by spark plasma sintering / L.W. Lei, Z.Y. Fu, H. Wang, S.W. Lee, K. Niihara // *Ceramics International*. – 2012. – Vol. 38. – P. 23-28.
40. Casolco, S.R. Transparent/translucent polycrystalline nanostructured yttria stabilized zirconia with varying colors / S.R. Casolco, J. Xu, J.E. Garay. // *Scripta Materialia*. – 2008. – Vol. 58. – P. 516-519.
41. du Merac, M.R. Unraveling the Complex Interactions during Processing of Transparent Magnesium Aluminate ($MgAl_2O_4$) Spinel / M.R. du Merac, H.J. Kleebe, M.M. Muller, I.E. Reimanis // *Journal of the American Ceramic Society*. – 2013. – Vol. 96. – P. 3341-3365.
42. Sepulveda, J.L. High-performance spinel ceramics for IR windows and domes / J.L. Sepulveda, R.O. Loutfy, S.Y. Chang, S. Ibrahim // *Window and Dome Technologies and Materials XII*. SPIE. – 2011. p. 801604.
43. Morita, K. Fabrication of transparent $MgAl_2O_4$ spinel polycrystal by spark plasma sintering processing / K. Morita, B.-N. Kim, K. Hiraga, & H. Yoshida // *Scripta Materialia*. – 2008. – Vol. 58. (12), – №. 12. – P. 1114-1117.
44. Sokol, M. High-pressure spark plasma sintering (SPS) of transparent polycrystalline magnesium aluminate spinel (PMAS) / M. Sokol, S. Kalabukhov, M. P. Dariel, et al // *Journal of the European Ceramic Society*. – 2014. – Vol. 34. – №. 46. – P. 4305-4310.
45. Fu, P. Transparent polycrystalline $MgAl_2O_4$ ceramic fabricated by spark plasma sintering: Microwave dielectric and optical properties / P. Fu, W. Lu, W. Lei, et al. // *Ceramics International*. – 2013. – Vol. 39. – №. 3. – P. 2481-2487.
46. Bonnefont, G. Fine-grained transparent $MgAl_2O_4$ spinel obtained by spark plasma sintering of commercially available nanopowders / G. Bonnefont, G. Fantozzi, S. Trombert, L. Bonneau // *Ceramics International*. – 2012. – Vol. 38. – №. 1. – P. 131-140.
47. Tokita M. Progress of Spark Plasma Sintering (SPS) method, systems, ceramics applications and industrialization / Tokita M. // *Ceramics*. – 2021 – Vol. .4. – Iss.2 – P.160-198.
48. Munir Z.A. Electric current activation of sintering: a review of the pulsed electric

- current sintering process / Z.A. Munir, D.V. Quach // Journal of the American Ceramic Society. – 2011. – Vol. 94. – Iss.1. – P. 1-19
49. [Электронный ресурс]: – URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/отжиг>.
50. [Электронный ресурс]: – URL: [https://portal.tpu.ru/SHARED/s/SUDAREV/2/Tab/Tab4/Рентгенофазовый анализ.pdf](https://portal.tpu.ru/SHARED/s/SUDAREV/2/Tab/Tab4/Рентгенофазовый_анализ.pdf)
51. [Электронный ресурс]: <https://vistaros.ru/stati/analizatory/vozmozhnosti-spektrofotometricheskogo-titrovaniya.html> (дата обращения: 28.04.2023)
52. Jing Y. Preparation and Properties of Transition Metal Boride-based Ultra-high Temperature Ceramic Materials / Y. Jing // China Academic Journal Electronic Publishing House.
53. Российская Федерация. Трудовой кодекс Российской Федерации: Трудовой кодекс РФ № 197-ФЗ (ред. от 01.03.2022): [принят Государственной думой 21 декабря 2001 года]. – Москва, 2001. – 290 с.
54. Российская Федерация. Законы. О специальной оценке условий труда: Федеральный закон N 426-ФЗ (ред. от 30.12.2020): [принят Государственной думой 23 декабря 2013 года]. – Москва, 2013. – 28 с.
55. ПНД Ф 12.13.1-03. Методические рекомендации. Техника безопасности при работе в аналитических лабораториях (общие положения): Утверждены Федеральным государственным агентством «Центр экологического контроля и анализа» 4 сентября 2003 г. - Москва: Минприроды РФ, 2003. - 30 с.
56. ГОСТ 12.2.033-78. Система стандартов безопасности труда. Рабочее место при выполнении работ стоя. Общие эргономические требования (утв. Постановлением Госстандарта СССР от 26.04.1978 N 1100).
57. ГОСТ 12.0.003-2015. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Опасные и вредные производственные факторы. Классификация: дата введения 2017-03-01. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200136071> (дата обращения: 1.04.2022). – Текст: электронный.

58. ГОСТ 12.1.038 Электробезопасность. Допустимые 82 ССБТ. Предельно уровни прикосновения и токов.
59. ГОСТ 12.1.0192017 напряжений ССБТ. Электробезопасност. Общие требования и номенклатура видов защиты.
60. ГОСТ 12.2.00391 ССБТ. Оборудование производственное. Общие требования безопасности.
61. ГОСТ 12.1.007-76 Система стандартов безопасности труда. Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности.
62. ГОСТ 12.4.132-83. Государственный стандарт Союза ССР. Халаты мужские. Технические условия (утв. и введен в действие Постановлением Госстандарта СССР от 10.10.1983 N 4894) (ред. от 01.03.1989).
63. ГОСТ 12.4.299-2015. Межгосударственный стандарт. Система стандартов безопасности труда. Средства индивидуальной защиты органов дыхания. Рекомендации по выбору, применению и техническому обслуживанию (введен в действие Приказом Росстандарта от 24.06.2015 N 792-ст).
64. ГОСТ 12.1.003-2014 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Шум. Общие требования безопасности.
65. СП 51.13330.2011 Защита от шума. Актуализированная редакция СНиП 23-03-2003.
66. ГОСТ 12.1.029-80 ССБТ. Средства и методы защиты от шума. Классификация.
67. МР 2.2.9.2311-07 Профилактика стрессового состояния работников при различных видах профессиональной деятельности».
68. СП 52.13330.2016. Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95* (дата введения: 08.05.2017).
69. СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03. Гигиенические требования к естественному, искусственному и совмещенному освещению жилых и общественных зданий (дата введения: 15.06.2003)

70. ГН 2.1.6.3492-17. Предельно-допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе городских и сельских поселений (утв. 22.12.2017, с изменениями на 31.05.2018).
71. ГН 2.1.5.1315-03. Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно- бытового водопользования (утв. 30.04.2003, с изменениями на 13.07.2017).
72. Федеральный закон «О внесении изменений в Федеральный закон "Технический регламент о требованиях пожарной безопасности"» от 10.07.2012. -№ 117-ФЗ.
73. ВНЭ 5-79. Правила пожарной безопасности при эксплуатации предприятий химической промышленности (утв. Министерством химической промышленности 25 июля 1979 г.).
74. Правила устройства электроустановок. Издание 7. Утверждено Министерством энергетики РФ, приказ от 8 июля 2002 г. № 204
75. Приказ № 903н об утверждении Правил по охране труда при эксплуатации электроустановок.
76. ГОСТ Р 53692-2009 Ресурсосбережение. Обращение с отходами. Этапы технологического цикла отходов.
77. СП 12.13130.2009 «Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности».
78. Постановление № 2398. Об утверждении критериев отнесения объектов, оказывающих негативное воздействие на окружающую среду, к объектам I, II, III и IV категорий.

СПИСОК НАУЧНЫХ ТРУДОВ

1. Ли Шухуэй. Влияние фторида лития на светопропускание циркониевой керамики / Ли Шухуэй, В. Д. Пайгин; науч. рук. О. Л. Хасанов // Научная инициатива иностранных студентов и аспирантов: сборник докладов II Международной научно-практической конференции, Томск, 26-28 апреля 2022 г. — Томск: Изд-во ТПУ, 2022. — [С. 709-713].
2. Ли Шухуэй. Получение функционально-градиентного керамического материала на основе ZrO_2 и $MgAl_2O_4$ / Ли Шухуэй, Д. Е. Деулина, В. Д. Пайгин; науч. рук. О. Л. Хасанов // Химия и химическая технология в XXIV веке: материалы XXIV Международной научно-практической конференции студентов и молодых ученых имени выдающихся химиков Л. П. Кулёва и Н. М. Кижнера, посвященной 85-летию со дня рождения профессора А.В. Кравцова. В 2 томах. Том 2 (г. Томск, 15–19 мая 2023 г.) / Томский политехнический университет. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2023. – 530 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Functional-gradient optical ceramics with cubic structure

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4БМ12	Ли Шухуэй		24.05.2023

Консультант школы ИШНПТ:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
инженер ОМ ИШНПТ	Пайгин В. Д.	к.т.н		

Консультант-лингвист ОИЯ ШБИП:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
старший преподаватель ОИЯ	Демьяненко Н.В.	-		

1. Current condition of the technology for manufacturing of functionally graded materials

In this section, we discussed the main characteristics of functional gradient materials. The known methods of their manufacturing and areas of application are considered. Promising materials for the creation of optical functional gradient ceramics are presented.

1.1 Functionally graded materials and its applications

Functionally graded materials (FGMs) are composite or single-phase materials with functional properties changing uniformly or discontinuously according to a predetermined and developed profile. The profile of change in properties, in turn, is due to the heterogeneity of the microstructure, the design of which is determined by the requirements for the performance characteristics of the final product. Through a gradual transition from one material to another in FGM, the abrupt changes in properties existing in the composite material are eliminated [4].

Figure 1 shows the difference in composition and properties between conventional composite material and FGM. In a conventional composite, there is a clear interface between metals and ceramics, but not in an FGM. This distinction corresponds to the distribution of properties such as thermal expansion coefficient, thermal conductivity and thermal resistance. A conventional composite material contains an abrupt change in properties at the interface, whereas an FGM represents a gradual change within it. The difference in thermal expansion coefficients at the interface causes internal thermal stress at elevated temperatures, which sometimes leads to interface failure. As shown in Figure 1, FGM reduces thermal stress by nearly 30% and can prevent interface failure [4].

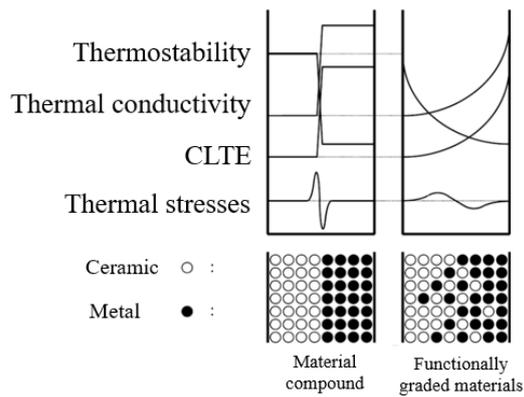


Figure 1 - Material structure and dependence of properties of FGM and conventional composite material

Materials play a crucial role in industrial production. As productivity increases in society, the demands on materials increase accordingly. As a pioneering trend in the field of materials, functionally graded materials meet the challenge of creating materials with improved characteristics. Functionally graded materials are used in many fields such as aerospace, nuclear power, biology, electromagnetism, optics, energy, and other fields due to the inventive combination of inorganic and organic materials such as metals, ceramics, and plastics.

The hardness of ordinary glass is high, but its brittleness is large. Because of the uncertainty of the external environment, the service life of the glass is greatly reduced. At the same time, the transmittance of common glass cannot be changed with the change of environment, which will bring certain impact on production and living and work. Therefore, improving the mechanical and optical properties of glass has become an important direction in the field of development. By adding rare earth elements and materials with different refractive indices to the functionally graded material, the optical properties of the glass can be changed according to the environment. The relevant scholars have successfully prepared materials such as glass lasers, optical fiber lenses, anti-reflection films, and discolored glass.

Functionally graded materials also have special properties based on heat resistance, corrosion resistance and thermal shock resistance. In particular, the development of various special function graded materials has made FGM play an important role in the energy field. For example, in the aspect of power generation

system, the application of gradient thermoelectric energy conversion material makes the emitter not cracked in the high temperature working environment of 1860 o C and greatly reduces the thermal stress of the system. Meanwhile, the application of the heat release substrate at the low temperature electrode of the system also shows high thermal conductivity and radiation exothermic rate [7].

The gradient material is common in nature, such as the shell of layered structure, the hard and tough animal skeleton, and the layered human skin. The medical development of FGM makes medical assistance to patients timelier and more effective. The functionally graded material has the characteristics of high specific strength, high specific modulus, abrasion resistance and biocompatibility. Based on this, the artificial joint developed makes the artificial prosthesis and the patient's own skeleton have strong binding force and reliable Durable, showing good biocompatibility [8], but also has good self-healing and repair of regenerative properties. With its superior properties, FGM has a good application prospect in the biomedical fields, such as artificial bones, teeth, and heart.

1.2 Methods of producing functionally graded materials

FGMs are typically fabricated with a specific spatial distribution of constituent phases, such as metals, ceramics and polymers, with a constant and subtle change in composition. Achieving individual morphology and structural properties, such as a physical-mechanical gradient in a particular direction, is a major advantage of FGMs over other composites. A schematic of the functional-gradient structure is shown in figure 2 [13].

In case of FGM preparation, the main objective is focused on to the appropriate means to achieve the composition of FGM. The microstructure should be distributed as designed to achieve the design performance of FGM. It can be divided into powder densification method: such as powder metallurgy (PM), self-propagating high-temperature synthesis (SHS); coating method: such as plasma spray, laser cladding method, electro-deposition method, vapor deposition with physical vapor deposition (PVD) and chemical deposition (CVD); Deformation and martensitic phase transformation as listed in table 1.

Table 1 - overview of processing methods for FGM [13-18]

№	Process	Variability of transition function	Versatility in phase content	Type of FGM	Versatility in component geometry
1	Powder stacking	Very good	Very good	Bulk	Moderate
2	Sheet lamination	Very good	Very good	Bulk	Moderate
3	Wet powder spraying	Very good	Very good	Bulk	Moderate
4	Slurry dipping	Very good	Very good	Coating	Good
5	Jet solidification	Very good	Very good	Bulk	Very good
6	Filtration / slip casting	Very good	Very good	Bulk	Good
7	Laser cladding	Very good	Very good	Bulk, Coating	Very good
8	Diffusion	Moderate	Very good	Joint, Coating	Good
9	Directed solidification	Moderate	Moderate	Bulk	Poor
10	PVD, CVD	Very good	Very good	Coating	Moderate

In the early 1970s, the CVD method was considered one of the most attractive processes for semiconductor fabrication. It was used for coating electronic circuits. Later CVD method was used for obtaining composite and functionally graded materials [19-22]. This method makes it possible to obtain FGM with a given composition by changing the gas ratio, deposition temperature, gas pressure, flow rate, and gas type [23]. The advantages of the CVD method is the possibility of continuous control, changes in composition and preservation of purity.

In [24] the authors obtained FGM of SiC-C composition by CVD method. It was observed that under cyclic heat flow conditions at a surface temperature of 877-1227 °C the FGM samples are not cracked.

The authors [25] used the CVD method to obtain polycrystalline FGM films from nickel and graphite. The authors obtained a material that has prospects for

application in optoelectronics.

In [26] Katayama and colleagues used a slip casting method followed by free sintering at a sintering temperature of 1600 °C to obtain FGM of Al₂O₃-W composition. The authors note that it was difficult to obtain tungsten in a given phase due to the oxidation of W during sintering.

In [27] the researchers focused on the heat treatment process of aluminum oxide-based FGM. PGMs were made by slick casting followed by sintering. The authors found that if the FGM layers contain from 0 to 0.3 wt % of special porogenic agents the thermal expansion coefficient remains unchanged over a wide temperature range of 20-1570 °C.

Another common method for producing FGMs is electrophoretic deposition (EPD). The formation of PGMs by this method consists of two steps (Figure 3). The advantage of the ESP method is the possibility of relatively precise control of the material in the production process [28].

In [34] the authors obtained ZrO₂- NiCr FGM consisting of 11 layers. During the preparation of the FGM powders were placed layer by layer, then molded by cold pressing at a pressure of about 30 MPa in a steel mold. Then the blank was sintered by hot pressing at 1300 °C and pressure of 5 MPa for 1.5 h. The distribution scheme of the FGM composition is shown in Figure 5.

The authors [35] obtained a transparent FGM of Al-ZnO composition (Figure 6), which has transparency up to 80% in the visible range, conducts electricity and current.

Thus, the authors [35] confirmed the possibility of creating an optical FGM. Next we will consider two optical materials promising for the manufacture of optical functional gradient ceramics: yttrium-stabilized zirconium dioxide (YSZ) and aluminomagnesium spinel MgAl₂O₄ (MAS).

1.3 Promising materials for creating optical functionally graded ceramics

Ceramics based on zirconia (ZrO₂) has excellent mechanical and functional properties, including high strength, low thermal conductivity and high oxygen conductivity; Therefore, ZrO₂ transparent ceramics are of great interest to the

research community. Yttrium (Y_2O_3) is often used to stabilize the cubic and tetragonal crystal structures of ZrO_2 , resulting in the formation of oxygen vacancies, and transparent ZrO_2 ceramics with a stabilized high-temperature cubic modification. To stabilize the cubic phase of zirconium dioxide, yttrium oxide (Y_2O_3) is used in an amount of 8 mol. % (8 mol% $\text{Y}_2\text{O}_3\text{:ZrO}_2$, c-YSZ for short) has a high mechanical strength and good optical characteristics. Cubic ZrO_2 has a refractive index of 2.2 and is therefore of more interest than optical glasses and other oxides. Therefore, YSZ transparent ceramics with high optical transparency, high refractive index, and high dielectric constant have potential applications as optical components [37].

Another promising material, aluminum-magnesium spinel (MgAl_2O_4), has a spinel crystal structure and is transparent to electromagnetic radiation in the range from 0.2 (UV) to 5.5 (mid-IR) μm [41]. Spinel has outstanding optical properties and high mechanical strength; thus, MgAl_2O_4 is one of the most important transparent ceramics. Due to its hardness, high chemical resistance, and high transparency in the UV-visible and mid-IR ranges, MgAl_2O_4 transparent ceramics are a promising candidate for optical components and defense applications such as optical lenses, aircraft/vehicle windows, underwater IR sensors, and anti-missile domes [42].

2. Materials, equipment and experimental techniques

2.1 Research materials

Yttria-stabilized zirconia (YSZ, TZ-10YS, Tosoh Corp., Japan) and commercial aluminum-magnesium spinel nanopowders (MAS, SC30R, Baikowski Malakoff Inc., USA) were used as starting materials.

A mixture of powders 50 wt. % YSZ and 50 wt. % MAS was prepared using a ball mill for 48 hours. The resulting powder mixture was dried at a temperature of 80°C until the moisture completely evaporated.

2.2 Spark plasma sintering

The technical implementation of the SPS method is based on direct heating of a graphite mold with a powder material by passing sequences of direct current pulses with simultaneous application of a load. To do this, the sintered powder is poured

into a graphite (conductive) mold and placed between the press plungers, which are also electrodes [49, 50].

Compared to traditional methods of powder material consolidation, SPS sintering produces high-density products at lower temperatures and in less time. However, the physical processes in the contact zones are characterized by high spatial heterogeneity and non-stationarity in time, which leads to the need to search for optimal combinations of SPS-consolidation modes for each specific material.

Despite the advantages of the method of electropulse plasma sintering over other methods of consolidation of powder materials, it has some disadvantages: limited-service life of molds; uneven formation of discharges over the volume of the powder body that create plasma (temperature); transfer of the material of the press tool into the bulk of the powder body (important for products requiring high purity).

In the work, ceramics were consolidated on an SPS-515S unit (Syntex Inc., Japan) at a temperature of 1450°C under a static prepress pressure of 100 MPa, holding time 180 minutes. The duration of the sintering process was 30 minutes. The temperature of the electropulse plasma sintering process was controlled using an optical pyrometer focused on a special technological hole in the mold, which is located on the outer wall of the mold.

2.3 Thermal annealing

In the work, after sintering, the samples were thermally annealed in a muffle furnace LHT 02/18 (Nabertherm, Germany). Annealing operating mode: temperature - 1300°C, isothermal exposure at a given temperature - 4 hours, heating and cooling rate 200°C/h.

2.4 Density determination

The density was determined geometrically by direct measurement of the linear dimensions of the samples with an ID F-150 digital thickness gauge (Mitutoyo, Japan) with an accuracy of 0.001 mm and the sample mass on a VLTE-150 digital balance (Russia) with an accuracy of 0.001 g. Density was calculated by formula (1):

$$\rho = \frac{4 \cdot m}{\pi \cdot d^2 \cdot h} \quad (1)$$

where ρ is the sample density, g/cm^3 ; m is the mass of the sample, g ; d is the sample diameter, cm^2 ; h is the sample height, cm .

Relative density (prel.), in this work, is defined as the ratio of sample density (ρ) to its theoretical density ($\rho_{\text{theor.}}$). The density measurement error in the dissertation work is $\pm 0.5\%$, except for those places where the density measurement error is given separately.

2.5 X-ray diffraction

X-ray diffraction (XRD) is a method that allows you to determine the qualitative and quantity of phases contained in the material under study.

XRD is one of the main methods for determining the crystal structure of a material; the wavelength of X-rays is similar to the distance between crystal planes in a crystal, so X-rays are introduced into a crystal, which is equivalent to a lattice, and X-rays are scattered by atoms; the scattered waves of these rays are coherently amplified in some directions and coherently attenuated in others, so that a diffraction pattern can be obtained. The diffraction pattern depends on the type of atom, the number of atoms, and the arrangement of atoms in the crystal, so different materials have different diffraction patterns. X-ray diffraction in crystals can be used as a method for analyzing crystal structure, lattice constants, lattice defects, etc. material [54].

To determine the characteristics in this work, we used an XRD-7000 X-ray diffractometer (Shimadzu, Japan), both with copper targets and X-ray wavelength $\lambda=1.5405 \text{ \AA}$.

2.6 Scanning electron microscope

The scanning electron microscope is an instrument for analyzing and testing the surface morphology of a sample. A scanning electron microscope uses a narrow beam of high-energy electrons focused by an electromagnetic lens. The electrons are deflected by the scanning coil, which quickly scans the sample, and the electron beam interacts with the sample, producing signals such as secondary electrons, backscattered electrons, and transmitted electrons, which are processed to form a scanning electron microscope image that reflects the state of the sample at various

points. Scanning electron microscope images are widely used in scientific research due to their large depth of field, high magnification, and good stereoscopic properties. The scanning electron microscope used in this dissertation is a JSM-7500FA Scanning Electron Microscope (JEOL) with a set of analytical attachments for energy dispersive elemental analysis (EDS) and electron backscatter diffraction (EBSD) (Bruker Nano GmbH) [56].

2.7 Spectrophotometry

Spectrophotometry is an analytical method used in a wide range of industries that provides a quantitative measurement of the interaction of a test material with electromagnetic radiation. The most commonly used spectrophotometers operate in the ultraviolet (10–400 nm), visible (450–760 nm), and infrared (780–1500 nm) wavelength ranges [55].

2.8 Vickers hardness determination

Hardness is the ability of a material to partially resist the indentation of a solid object into its surface. To obtain different hardness, different hardness measurement methods such as Mohs hardness, Brinell hardness, Vickers hardness, Shore hardness, etc. can be used. Vickers microhardness is often used in experiments. As shown in Figure 18, the principle of micro-Vickers hardness testing is that a diamond quadrilateral with an angle of 136° between two opposite sides is pressed into the horizontal surface of the test object with a certain load vertically, held for 10-20 s, the length of the diagonal is measured indentations d_1 , d_2 and the Vickers hardness is calculated by equation (2)[56].

$$H_v = \frac{F}{S} = \frac{2F \sin(\frac{\alpha}{2})}{d^2} = 1854 \frac{F}{d^2} \quad (2)$$

where H_v is the Vickers hardness; F is the applied load, N; S is the imprint surface, mm^2 ; d is the average length of the diagonals, mm; α is the angle at the vertex.