

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

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

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
РАЗВИТИЕ МЕТОДА КВАЗИИЗОСТАТИЧЕСКОГО ПРЕССОВАНИЯ КЕРАМИЧЕСКИХ ПОРОШКОВ В ИЗДЕЛИЕ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ ПРИМЕНЕНИЕМ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

УДК 666.3.03:004.925.84

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4БМ92	Иващенко Яна Олеговна		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ОМ ИШНПТ	Двилис Э.С.	д.ф.-м.н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН ШБИП	Кашук И.В.	Канд. техн. наук		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель.	Скачкова Л.А.	—		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
22.04.01 Материаловедение и технологии материалов	Хасанов О.Л.	Д.т.н., профессор		

Планируемые результаты обучения ООП

Код компетенции	Наименование компетенции
Универсальные компетенции	
УК(У)-1	Способен осуществлять поиск, критический анализ и синтез информации, применять системный подход для решения поставленных задач
УК(У)-2	Способен 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 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 (специальность) Материаловедение и технологии материалов
 Отделение школы (НОЦ) Отделение материаловедения

УТВЕРЖДАЮ:
 Руководитель ООП
 _____ Хасанов О.Л.
 (Подпись) (Дата)

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Магистерской диссертации

Студенту:

Группа	ФИО
4БМ92	Иващенко Яне Олеговне

Тема работы:

Развитие метода квазиизостатического прессования керамических порошков в изделие сложной формы применением аддитивных технологий	
Утверждена приказом директора ИШНПТ	Приказ №57-54/с от 26.02.2021

Срок сдачи студентом выполненной работы:	14.06.21
--	----------

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе	Промышленные нанопорошки стабилизированного иттрием диоксида циркония 3YSB-E (TOSOH, Япония) и 3Y-25A-B (Treibacher Industrie AG, Австрия). Аналитические источники информации по современным методам прессования изделий сложной и/или индивидуальной формы, а также развитию КИП аддитивными технологиями
Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов	1. Провести модельное и экспериментальное изучение влияния геометрических параметров оболочки и режимов КИП на величину нелинейной деформации формообразующей поверхности внутренней полости эластичной оболочки на образцах простой геометрии. 2. Изготовить образцы простой геометрической формы в оболочках, компенсирующих искривление формообразующей поверхности внутренней полости оболочки. Дать количественную оценку отклонению формы образцов от

	<p>заданной геометрии. Провести моделирование деформации оболочек, компенсирующих искривление формообразующей поверхности внутренней полости оболочки.</p> <p>3. Изучить специфику уплотнения порошка в процессе КИП, характер распределения плотности в прессовках, сопоставить с одноосным прессованием в закрытой жёсткой пресс-форме. Выбрать уравнение наиболее точно описывающее уплотнение порошков в процессе КИП.</p> <p>4. Выявить эффекты и закономерности КИП, требующие учёта при реализации этой технологии. Оценить потенциальную возможность реализации КИП с применением аддитивных технологий. Смоделировать контртело в форме зубного штифта в САПР SolidWorks. Изготовить эластичную оболочку с формообразующей полостью при помощи распечатанного на 3D-принтере контртела.</p> <p>5. Изготовить керамический образец методом КИП в форме зубного штифта.</p>
Перечень графического материала	<p>1. Диффрактограммы исходных порошков.</p> <p>2. СЭМ-изображения поверхности керамических имплантатов.</p>
Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы	
Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Кащук И.В., доцент ОСГН ШБИП
Социальная ответственность	Скачкова Л.А., старший преподаватель ООД ШБИП
Раздел на иностранном языке	Демьяненко Н.В., старший преподаватель ОИЯ ШБИП
Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:	
Разделы на русском языке: введение, литературный обзор; материалы, техника и методики исследования; результаты модельных и экспериментальных исследования процессов КИП; финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение; социальная ответственность	
Разделы на английском языке: литературный обзор	

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	15.03.21
---	----------

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ОМ ИШНПТ	Двилис Э.С.	Д.ф.-м.н.		15.03.21

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4БМ92	Иващенко Яна Олеговна		15.03.21

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

Школа Инженерная школа новых производственных технологий
 Направление подготовки Материаловедение и технологии материалов
 Уровень образования: магистратура
 Отделение школы (НОЦ) Отделение материаловедения
 Период выполнения _____ (осенний / весенний семестр 2020 /2021 учебного года)

Форма представления работы:

Магистерская диссертация

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

КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН выполнения выпускной квалификационной работы

Срок сдачи студентом выполненной работы: _____

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
10.04.2021	Литературный обзор по теме магистерской диссертации	20
20.05.2021	Выполнение экспериментов по теме работы	30
15.06.2021	Обсуждение результатов и оформление работы	50

СОСТАВИЛ:

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ОМ ИШНПТ	Двилис Э.С.	Д.ф.-м.н.		15.03.21

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель ООП

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
22.04.01 Материаловедение и технологии материалов	Хасанов О.Л.	Д.т.н.		15.03.21

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

Студенту:

Группа	ФИО
4БМ92	Иващенко Яна Олеговна

Школа	ИШНПТ	Отделение Школа	Материаловедения
Уровень образования	Магистр	Направление/специальность	22.04.01 Материаловедение и технологии материалов

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

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

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

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

Перечень графического материала

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	01.02.21
--	----------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН ШБИП	Кашук Ирина Вадимовна	К.Т.Н доцент		08.02.21

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4БМ92	Иващенко Яна Олеговна		08.02.21

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
4БМ92	Иващенко Яна Олеговна

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

Тема ВКР:

Развитие метода квазиизостатического прессования керамических порошков в изделие сложной формы применением аддитивных технологий.	
Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:	
<p>1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения</p>	<p>Объект исследования: керамические порошки, керамические имплантаты, метод квазиизостатического прессования. Область применения: хирургическая медицина, стоматология.</p>
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
<p>1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:</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. 	<p>"Трудовой кодекс Российской Федерации" от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 09.03.2021). ГОСТ 12.2.032-78 ССБТ. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования. ГОСТ 12.2.049-80 ССБТ. Оборудование производственное. Общие эргономические требования. ГОСТ 22614-77. Система «человек-машина». Выключатели и переключатели клавишные и кнопочные. Общие эргономические требования. ГОСТ Р ИСО 9241-5-2009. Эргономические требования к проведению офисных работ с использованием видеодисплейных терминалов (VDT). Часть 5. Требования к расположению рабочей станции и осанке оператора. ГОСТ 12.1.003-2014 ССБТ. Шум. Общие требования безопасности. ГОСТ 12.1.005-88 ССБТ. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны.</p>

	ГОСТ 12.1.007-76 ССБТ. Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности. СП 52.13330.2016 Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95*. ГН 2.2.5.3532–18. Предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ в воздухе рабочей зоны.
2. Производственная безопасность: 2.1. Анализ выявленных вредных и опасных факторов 2.2. Обоснование мероприятий по снижению воздействия	Вредные факторы: -повышенная или пониженная температура воздуха рабочей зоны; -повышенный уровень шума и т.п. - опасные и вредные производственные факторы, связанные с чрезмерным загрязнением воздушной среды в зоне дыхания, то есть аэрозольным составом воздуха. Опасные факторы: -движущиеся машины и механизмы, подвижные части производственного оборудования и т.п.
3. Экологическая безопасность:	Атмосфера: появление наночастиц. Гидросфера: загрязнение воды наночастицами Литосфера: загрязнение почвы наночастицами
4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:	Возможные ЧС: пожар в лаборатории, землетрясение. Наиболее типичная ЧС: пожар в лаборатории..

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	01.02.21
--	----------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Скачкова Лариса Александровна	-		08.02.21

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4БМ92	Иващенко Яна Олеговна		08.02.21

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа: 157 страниц, 41 рисунок, 44 таблицы, 100 источников, 1 приложение.

Ключевые слова: квазиизостатическое прессование, конечноэлементное моделирование, керамические изделия сложной и/или индивидуальной формы, диоксид циркония, керамические импланты, аддитивные технологии.

Объект исследования: порошки на основе диоксида циркония, полученные из них компакты и керамика. Предмет исследования: процессы уплотнения порошков в условиях всестороннего сжатия при квазиизостатическом прессовании.

Цель работы – принципиальная и количественная оценка возможности получения методом КИП изделий сложной и/или индивидуальной формы с применением аддитивных технологий.

В процессе исследования проведена модельная и экспериментальная разработка основных элементов технологии получения изделий сложной и индивидуальной формы методом КИП при помощи аддитивных технологий: оптимизация геометрических параметров эластичных оболочек, процессов прессования и спекания.

В результате исследования был разработан способ реализации технологии КИП для производства единичных экземпляров или малых партий востребованных керамических изделий сложной и индивидуальной формы с минимальной затратой ресурсов и времени на проектирование и изготовление оснастки.

Основные конструктивные, технологические и технико-эксплуатационные характеристики разрабатываемой технологии: сокращение времени на проектирование и изготовление оснастки для производства изделия с заданной индивидуальной формой и требуемыми эксплуатационными характеристиками до одного рабочего дня.

Область применения: квазиизостатическое прессование является перспективным методом производства керамических изделий сложной и/или индивидуальной формы, которые востребованы во многих областях науки и техники, в протезировании и имплантологии. Экономическая эффективность/значимость работы заключается в удешевлении керамических изделий сложной и/индивидуальной формы за счёт сокращения стадий и продолжительности.

По результатам выполненного исследования целесообразно продолжить изучение процессов всестороннего сжатия порошковых материалов для дальнейшей оптимизации разрабатываемой технологии производства керамических изделий сложной и/или индивидуальной формы с целью получения изделий, удовлетворяющих всем требованиям, предъявляемым к керамическим имплантатам.

ABSTRACT

Final qualifying work: 157 pages, 41 figures, 44 tables, 100 sources, 1 appendix.

Key words: quasi-isostatic pressing, finite element modeling, ceramic products of complex and / or individual shape, zirconium dioxide, ceramic implants, additive technologies.

Object of research: powders based on zirconium dioxide, compacts and ceramics obtained from them. Subject of research: the processes of powder compaction under conditions of all-round compression with quasi-isostatic pressing.

The purpose of the work is a fundamental and quantitative assessment of the possibility of obtaining products of complex and / or individual shapes by the instrumentation method using additive technologies.

In the course of the study, a model and experimental development of the main elements of the technology for obtaining products of complex and individual shapes by the instrumentation method using additive technologies was carried out: optimization of the geometric parameters of elastic shells, pressing and sintering processes.

As a result of the study, a method was developed for the implementation of instrumentation technology for the production of single copies or small batches of demanded ceramic products of complex and individual shape with a minimum expenditure of resources and time for the design and manufacture of tooling.

The main design, technological and technical-operational characteristics of the developed technology: reduction of time for design and manufacture of tooling for the production of a product with a given individual shape and required performance characteristics up to one working day.

Field of application: quasi-isostatic pressing is a promising method for the production of ceramic products with complex and / or individual shapes, which are in demand in many fields of science and technology, in prosthetics and implantology. Economic efficiency / significance of the work consists in reducing the cost of ceramic products of complex and / or individual shapes by reducing the stages and duration.

Based on the results of the study, it is advisable to continue studying the processes of comprehensive compression of powder materials for further optimization of the developed technology for the production of ceramic products of complex and / or individual shapes in order to obtain products that meet all the requirements for ceramic implants.

Определения, обозначения, сокращения, нормативные ссылки

3Y-25A-B – Промышленный нанопорошок стабилизированного иттрием диоксида циркония (Treibacher Industrie AG, Австрия)

3YSB-E – Промышленный нанопорошок стабилизированного иттрием диоксида циркония (TOSOH, Япония)

CAD/CAM – Системы автоматизированного проектирования / Системы автоматизированного производства

Cub – Кубическая кристаллическая фаза

GCM – (The green ceramic machining) Механическая обработка керамических компактов

Mon – Моноклинная кристаллическая фаза

SFF – (Semi-Solid Forging) Технология изготовления твердых тел произвольной формы

SWOT-анализ – Метод стратегического планирования, заключающийся в выявлении факторов внутренней и внешней среды организации и разделении их на четыре категории: Strengths (сильные стороны), Weaknesses (слабые стороны), Opportunities (возможности), Threats (угрозы).

Tet – Тетрагональная кристаллическая фаза

Y-TZP – Частично стабилизированный оксидом иттрия тетрагональный поликристалл диоксида циркония

АП – Аддитивное производство

АТ – Аддитивные технологии

БЭТ-метод – Метод Брунауэра-Эммета-Теллера

ГИП – Горячее изостатическое прессование

ГП – Горячее прессование

КИП – Квазиизостатическое прессование

ОП – Одноосное прессование

САПР – Система автоматизированного проектирования

СЭМ – Сканирующий электронный микроскоп

УДП – Ультрадисперсный порошок

ХИП – Холодное изостатическое прессование

ЧПУ – Числовое программное управление

ЭИПС – Электроимпульсное-плазменное спекание

Содержание

Определения, обозначения, сокращения, нормативные ссылки	13
Содержание	15
Введение.....	18
1. ОБЗОР ТЕКУЩЕГО СОСТОЯНИЯ В ОБЛАСТИ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА КЕРАМИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ СЛОЖНОЙ И/ЛИ ИНДИВИДУАЛЬНОЙ ФОРМЫ	20
1.1. Технологические характеристики и свойства порошков	20
1.2. Керамические изделия из ZrO_2 для биомедицинских приложений	26
1.3. Формование порошковых материалов с равномерным распределением плотности прессовок.....	29
1.4. Шликерное литьё.....	30
1.5. Сухое или полусухое прессование	32
1.5.1. Динамические (импульсные) методы сухого прессования.....	33
1.5.2. Методы изготовления без формования.....	36
1.5.3 Статические методы сухого прессования.....	38
1.6. Развитие аддитивных технологий и их применение при производстве изделий медицинского назначения	43
1.7. Аддитивные технологии в ортопедии и протезировании	46
1.8. Выводы по разделу и постановка задач исследования.....	47
2. МАТЕРИАЛЫ, ТЕХНИКА И МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ	50
2.1. Характеристики материалов исследования	50
2.2. Модельное и экспериментальное изучение влияния величины прикладываемого давления на деформацию порошкового тела	51
2.3. Методика подготовки прессовой оснастки.....	53
2.4. Лабораторное технологическое оборудование	56
2.5. Методика исследования свойств материалов.....	59
3. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛЬНЫХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРОЦЕССОВ КИП.....	64
3.1. Характеризация порошковых материалов	64
3.2. Построение кривых уплотнения, выбор уравнения прессования	67

3.3. Исследование механических характеристик керамики из диоксида циркония	72
3.4. Применение аддитивных технологий и метода КИП для получения изделия сложной геометрической формы	74
3.5. Морфология поверхности керамики, изготовленной КИП	77
4. ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ.....	80
Введение.....	80
4.1. Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения.....	80
4.1.1. Анализ конкурентных технических решений	80
4.1.2. SWOT-анализ.....	83
4.2. Планирование научно-исследовательских работ.....	87
4.2.1. Структура работ в рамках научного исследования	87
4.2.2. Определение трудоемкости выполнения работ и разработка графика проведения.....	89
4.3. Бюджет научно-технического исследования.....	94
4.3.1. Расчет материальных затрат научно-технического исследования ..	95
4.3.2. Расчет амортизации специального оборудования	96
4.3.3. Основная заработная плата исполнителей темы.....	97
4.3.4. Дополнительная заработная плата исполнителей темы.....	99
4.3.5. Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)	99
4.3.6. Накладные расходы.....	100
4.3.7. Бюджетная стоимость НИР	100
4.4. Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования	101
4.4.1. Интегральный показатель финансовой эффективности	101
4.4.2. Интегральный показатель ресурсоэффективности.....	102
4.4.3. Интегральный показатель эффективности вариантов исполнения разработки.....	103
Выводы по разделу	104
5. СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ.....	106
5.1. Введение	106
5.2. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности.....	106

5.3. Производственная безопасность	108
5.4. Анализ вредных производственных факторов	108
5.5. Анализ опасных производственных факторов	110
5.6. Расчет искусственного освещения.....	113
5.6.1. Выбор системы освещения	114
5.6.2. Выбор источников света	114
5.6.3. Выбор светильников и их размещение	117
5.6.4. Выбор величины освещенности	122
5.6.5. Расчет общего равномерного освещения	122
5.7. Расчет освещенности помещения НИР	123
5.8. Экологическая безопасность	125
5.9. Безопасность в чрезвычайных ситуациях	125
5.10. Выводы по разделу	127
Заключение	128
Список публикаций.....	131
Список использованной литературы.....	132
ПРИЛОЖЕНИЕ А	145
1.3. Forming of powder materials with uniform distribution of compact density	146
1.4. Slip casting.....	147
1.5. Dry or semi-dry pressing	148
1.5.1. Dynamic (impulse) dry pressing methods	149
1.5.2. Manufacturing methods without molding.....	151
1.5.3. Static dry pressing methods.....	153

Введение

Количество больных травматологического и стоматологического профилей каждый год остается на высоком уровне. Для современной ортопедии и стоматологии лечение пациентов продолжает оставаться чрезвычайно важной проблемой. Для обеспечения клиентам качественной консолидации и максимально короткого реабилитационного периода используются многообразные подходы [1], и ведутся работы по созданию новых методов реконструкции костной ткани – имплантации. В настоящее время ведётся активное изучение керамических имплантатов, которые отличаются прочностью и биосовместимостью.

Получение высокоплотной керамики является одной из важнейших задач материаловедения. Существует множество методов, позволяющих получить керамику с плотностью более 99% от теоретической, однако большинство из них эффективны лишь для изготовления изделий простой геометрической формы. Получение деталей сложной формы с использованием таких методов требует дополнительной токарно-фрезерной обработки.

Для получения высокоплотных керамических изделий сложной формы, как правило, используют изостатические методы прессования, которые классифицируются в зависимости от среды, передающей давление на порошковое тело, а изделия, полученные этими методами, требуют гораздо меньшего объема последующей обработки. Данное исследование посвящено прессованию в толстостенных эластичных оболочках (квазиизостатическое прессование – КИП). Средой, подобно жидкости передающей давление на порошок в КИП, является заключённое в жёсткую пресс-форму эластичное тело, которое распределяет приложенное к пуансону усилие одинаково во всех направлениях. Уплотнение порошка происходит равномерно со всех сторон, что позволяет получать изделия с высокой равномерностью распределения плотности по объему [2]. В отличие от гидростатического прессования, КИП не требует использования сложного оборудования и более экономично [3].

При использовании КИП наблюдается искривление формообразующих поверхностей оболочки в процессе прессования, вследствие чего полученные компакты имеют форму, отличную от формы внутренней полости оболочки. Корректный учёт этого эффекта на стадии проектирования оболочки позволит минимизировать величину отклонения формы компакта от требуемой. Проектирование с помощью конечно-элементного моделирования помогает создать контртело, учитывающее нелинейную деформацию порошкового тела, а печать на 3D-принтере – создать его физическую модель.

В последние десятилетия стали востребованы технологии трехмерной печати. Данная технология позволяет при помощи принтера создавать физические объекты на основании трёхмерных изображений. Технология стала революционной в процессе прототипирования и нашла применение во множестве сфер. В медицине она применяется в ортопедии, нейрохирургии, челюстно-лицевой хирургии, кардиохирургии и других дисциплинах [4, 5].

В настоящей работе аддитивные технологии применяются для создания толстостенной эластичной оболочки с формообразующей полостью. Это очень удобный и полезный метод, так как создаёт точный контур требуемой полости без вреда для всей оболочки.

1. ОБЗОР ТЕКУЩЕГО СОСТОЯНИЯ В ОБЛАСТИ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА КЕРАМИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ СЛОЖНОЙ ИЛИ ИНДИВИДУАЛЬНОЙ ФОРМЫ

1.1. Технологические характеристики и свойства порошков

Высококачественная керамика отличается однородностью структуры и высокой прочностью. Для её производства используют порошковые материалы. *Порошки* – совокупность находящихся в соприкосновении индивидуальных твердых частиц размером до 1000 мкм. В порошковой металлургии наличествует довольно большой диапазон размеров частиц порошков. Существует несколько групп, на которые можно разделить все порошки по дисперсности частиц [6]:

- грубодисперсные – от 200 до 1000 мкм;
- среднедисперсные – от 10 до 200 мкм;
- тонкодисперсные – от 0,1 до 10 мкм;
- ультрадисперсные (УДП) или нанопорошки – до 100 нм.

Отдельный класс материалов составляют порошки с нанометровым размером частиц, их объединяют уникальные строение и свойства. Такие порошки называют ультрадисперсными, субмикронными *нанопорошками*. Уникальность их структуры состоит в размере частиц: при размере менее 10 нм хотя бы в одном направлении высокая относительная доля атомов на поверхности частиц приводит к большому влиянию поверхностных явлений на их кристаллическую структуру, характеризуемую несколько меньшими межатомными расстояниями, более высокой плотностью упаковки атомов и высокой нестабильностью этой упаковки.

Выбор технологии изготовления изделий из порошковых материалов во многом зависит от комплекса свойств исходных порошков, которые принято делить на три основные группы [7]: химические, физические и технологические.

К химическим свойствам относятся химический состав, температура плавления, растворимость, смачиваемость, гигроскопичность, реакционная

способность, пирофорность, токсичность и т.д. Ниже представлено описание некоторых из них.

Химический состав — это содержание основного (основных) компонента в порошке, а также различных примесей, механических загрязнений и газов. Удовлетворительной можно считать такую чистоту порошка, содержание основного компонента в котором составляет от 98 до 100%. Химический состав порошка оказывает влияние на свойства готового изделия и определяет технологию его изготовления (прессование, спекание).

Температура плавления – температура твёрдого кристаллического тела, при которой оно совершает переход в жидкое состояние.

Гигроскопичность – способность вещества поглощать пары воды из воздуха.






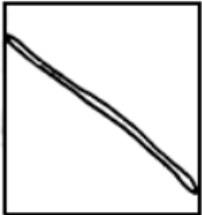
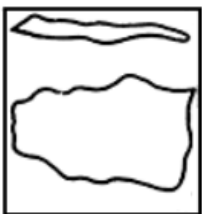

Пирофорность — это способность порошков самопроизвольно воспламеняться на воздухе [7].



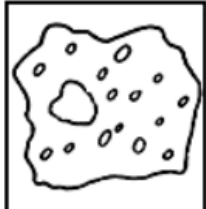

Токсичность – способность вещества нарушать физиологические функции организма [7].

К физическим свойствам относятся форма частиц, размер, гранулометрический состав и удельная поверхность [7].

Форма частиц (таблица 1) зависит от метода получения порошков и оказывает существенное влияние на их технологические свойства: насыпную плотность, текучесть, прессуемость, а также на прочность, плотность и однородность прессовок.

Таблица 1 – Типичные формы частиц (ГОСТ 25849-83)

Сферическая			I_{\max}/I_{\min} от 1,0 до 1,2
Округлая			I_{\max}/I_{\min} от 1,2 до 2,0
Угловатая	С криволинейными поверхностями		I_{\max}/I_{\min} от 2,0 до 5,0
	С острыми углами и плоскими гранями		
Стержневая			I_{\max}/I_{\min} от 5,0 до 25,0
Игольчатая			I_{\max}/I_{\min} СВЫШЕ 25,0
Пластинчатая / чешуйчатая	Сферической округлой или угловатой формы		
	Брызгообразной формы		

Дендритная			
Частицы с внутренними пустотами	Губчатая (с наличием сквозных пор)		
	Пористая (с наличием закрытых пор)		
	Полая (с наличием единичных пустот с площадью более 25% площади проекции частицы)		

Размер частиц и гранулометрический состав порошка. Часто в условиях реального производства разработчики имеют дело с шихтой (порошковой смесью), состоящей из частиц различного размера. Такая ситуация возникает в силу того, что все существующие методы получения порошков позволяют получать частицы, размеры которых колеблются в довольно широких пределах. По мнению авторов [7], для получения прессовки с постоянными размерами и свойствами требуется, чтобы исходные порошки обладали определенным размером частиц. Существует пять категорий размеров частиц порошков (таблица 2). Каждая из указанных категорий может быть дифференцирована по крупности на фракции. Смешивая порошки различных фракций в определенных пропорциях, добиваются необходимых свойств готовых изделий. Относительное содержание фракций частиц различной крупности называется гранулометрическим составом порошка.

Таблица 2 – Категории размеров частиц порошков [7]

Категория размера частиц порошка	Размер частиц, мкм
Грубая	150-500
Средняя	40-150
Тонкая	10-40
Весьма тонкая	0,5-10
Ультратонкая	Менее 0,5

Удельная поверхность частиц — усреднённая характеристика размеров внутренних полостей (каналов, пор) пористого тела или частиц раздробленной фазы дисперсной системы. Она зависит от формы и размеров частиц и является характеристикой развитости поверхности порошка. Увеличение удельной поверхности частиц означает увеличение количества контактов между частицами в единице объема. Поэтому знание этого свойства важно для разработки технологии прессования и особенно спекания. Величина удельной поверхности колеблется от долей квадратного метра до десятков квадратных метров на 1 г порошка.

К технологическим свойствам относятся: насыпная плотность, текучесть, прессуемость, формуемость и уплотняемость.

Насыпная плотность – это отношение веса сыпучего материала к его объему, полученному при свободной засыпке в ёмкость. Эта характеристика определяется плотностью порошка, размером (формой) его частиц, плотностью укладки частиц и состоянием их поверхности [8]. Она определяется удельной плотностью порошка и фактическим заполнением единицы объема (рисунок 1). Количество пустот зависит от формы и размера частиц порошка и от того, насколько свободно они располагаются друг относительно друга. Частицы порошка никогда не бывают одинаковых размеров, поэтому более мелкие, располагаясь между крупными, способствуют увеличению насыпной плотности. Зная насыпную плотность вещества можно рассчитать размеры формообразующей полости пресс-формы.

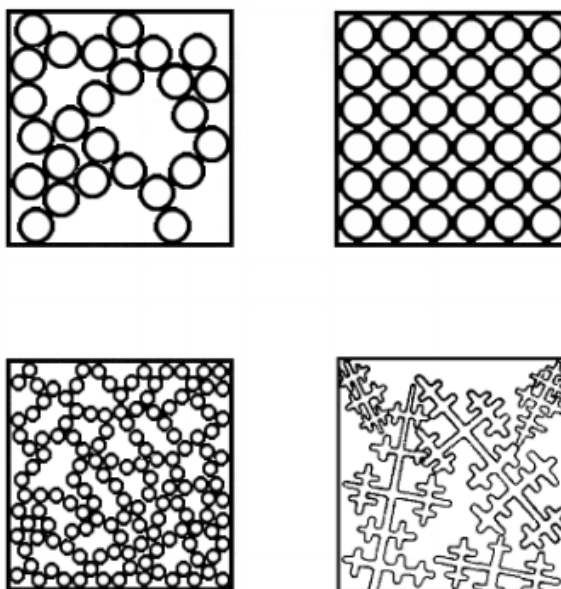


Рисунок 1 – Схемы расположения частиц порошка в единице объёма [8]

Текучесть – свойство, характеризующее скорость прохождения порошка через отверстие определённого диаметра [7]. От текучности зависит быстрота и равномерность заполнения пресс-формы, однородность по плотности прессовок и производительность процесса при автоматическом прессовании. Текучесть зависит от многих факторов и связана с трением и зацеплением частиц друг с другом. Текучесть порошков уменьшается при снижении плотности порошка и размеров частиц; при усложнении формы частиц или повышении шероховатости их поверхности; при наличии влаги, адсорбированной на поверхности частиц.

Уплотняемость порошков – характеристика интенсивности уплотнения порошкового материала или скорости изменения плотности с повышением давления прессования количественным показателем интенсивности уплотнения является первая производная плотности порошкового тела по абсолютному давлению его прессования [9].

Прессуемость – это характеристика затрат усилия прессования на его уплотнение [9].

Формуемость – это способность порошка сохранять заданную форму после прессования [9]. Формуемость порошка зависит в основном от формы, размера и состояния поверхности частиц, а также от их твёрдости [10].

Форма частиц существенно влияет на их упаковку при компактировании, а также на количество и размеры пор в полученной из них прессовке. Размер частиц в основном влияет на установку скорости и температуры спекания [11]. Для примера зависимость плотности спеченных порошков оксида алюминия различного гранулометрического состава от температуры спекания представлена на рисунке 2.

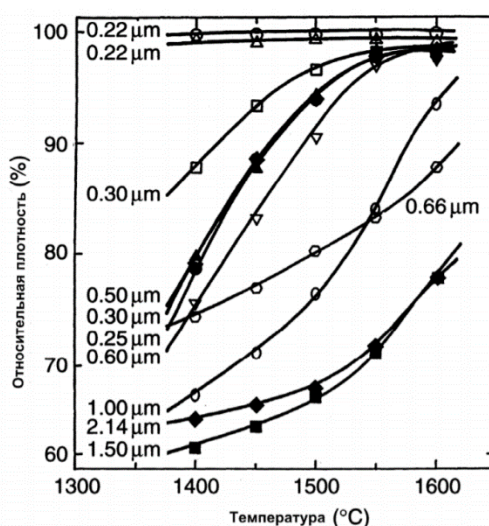


Рисунок 2 – Зависимость плотности спеченных порошков оксида алюминия различного гранулометрического состава от температуры спекания [11]

Поскольку частицы порошка в компакте являются центрами роста зёрен при последующем спекании, можно утверждать, что наличие в порошке крупных частиц может привести к формированию керамики с крупными зёрнами при спекании, что может плохо отразиться на её различных свойствах. Таким образом, распределение частиц по размерам важно, как для высокой плотности упаковки частиц, так и для получения наноструктурного состояния [10].

1.2. Керамические изделия из ZrO_2 для биомедицинских приложений

Применение оксидной керамики в биомедицине основано на нескольких специфических характеристиках этих материалов, которые можно описать следующим образом [12]:

- химическая стабильность (отсутствие деградации и выделения ионов);
- устойчивость к износу и царапинам за счёт высокой твёрдости;

- стабильность размеров зёрен в физиологической среде;
- биосовместимость порошков и продуктов износа.

Низкие коррозия и выделение ионов, характеризующие оксидную керамику, работающую в наиболее агрессивных условиях, обусловлены высокой теплотой образования их молекул.

Оксидная керамика, используемая в качестве биоматериалов, может быть изготовлена из оксида алюминия и стабилизированного диоксид циркония, соответствующих международным эталонному стандарту (ИСО 6474-1-2017) (оксид алюминия) и стандарту (ISO 13356-2016) (диоксид циркония).

Керамики из оксида алюминия и диоксида циркония доказали свою пригодность для имплантации человеку в течение многолетнего опыта в протезировании. Оба материала классифицируются как «почти инертные» биоматериалы, так как ни один материал не может считаться полностью инертным при помещении в живые ткани. Из-за стабильности оксидом алюминий и циркония, твёрдости и износостойкости оксидная керамика в основном используется в области стоматологии [13].

Помимо имплантируемых медицинских конструкций, оксид алюминия и диоксид циркония используются в производстве компонентов для медицинских устройств, которые требуют механической обработки с допусками, близкими к микрометрическому, высокой износостойкости и стабильности.

В области медицины вызвал интерес частично стабилизированный тетрагональный диоксид циркония (Y-TZP), который стал стандартным материалом для клинического применения, характеристики которого определены стандартом ISO 13356.

Диоксид циркония – это хорошо известный полиморф, который встречается в трёх модификациях: моноклинной (mon), кубической (cub) и тетрагональной (tet). При комнатной температуре диоксид циркония имеет моноклинную модификацию и стабилен до 1170 °С. Выше этой температуры он переходит в тетрагональную, а затем в кубическую фазу при 2370 °С. При охлаждении превращение из тетрагональной фазы в моноклинную (tet-mon)

происходит в диапазоне температур примерно от 100 °С до 1070 °С, это связано с объёмным расширением примерно на 3–4%. Напряжения, возникающие при расширении, вызывают трещины в керамике из чистого диоксида циркония, которые после спекания в диапазоне 1500–1700 °С разрушаются при охлаждении до комнатной температуры [14]. В результате tet-mon трансформации образуются сдвиговые напряжения и происходит существенное увеличение объёма, что приводит к разрушению кристаллов диоксида циркония. Поэтому, с точки зрения практического использования, наибольший интерес представляют твёрдые растворы на основе ZrO_2 с кубической, либо тетрагональной кристаллическими структурами [15].

Основной интерес к использованию оксида иттрия в качестве стабилизирующего оксида связан с тем, что в этой системе также можно получить керамику, образованную тетрагональными зёрнами при комнатной температуре. Материалы Y-TZP, содержащие около 2–3 мол.% Y_2O_3 , практически полностью состоят из тетрагональных зёрен, имеющих размер в несколько сотен нанометров, остальное составляет кубическая фаза. Доля тетрагональной фазы, остающейся при комнатной температуре, зависит от размера зёрен и от содержания оксида иттрия. От этих параметров также зависят механические свойства керамики Y-TZP [14].

В материалах Y-TZP очень важно учитывать метастабильную природу тетрагональных зёрен. Существует критический размер зерна, зависящий от концентрации оксида иттрия, выше которого происходит самопроизвольное tet-mon превращение зёрен, тогда как в слишком мелкозернистой структуре это превращение будет подавлено.

Во влажных средах циркониевая керамика претерпевает самопроизвольное превращение метастабильной тетрагональной фазы в моноклинную. Превращение, которое начинается на поверхности и продолжается в объёме материала, снижает плотность материала и вызывает микро- и макротрещины. По мере прогрессирования фазового превращения можно наблюдать снижение прочности и ударной вязкости керамики. Модели,

предложенные для объяснения спонтанного tet-mon превращения в Y-TZP, основаны на образовании гидроксидов циркония или гидроксидов иттрия на границах зёрен [16-18].

Стоит отметить, что скорость деградации керамики со снижением прочности не одинакова для всей керамики Y-TZP. Уменьшение размера зерна и/или увеличение концентрации стабилизирующего оксида снижает скорость превращения. Также важную роль играют пополнение и распространение дефектов. Поскольку степень деградации керамики со снижением прочности Y-TZP во влажной среде зависит от микроструктуры материала, ею можно управлять путем выбора процесса производства материала и прекурсоров, выбранных для производства керамики. Это делает стабильность Y-TZP характеристикой, присущей каждому материалу и технологии его производства [19].

1.3. Формование порошковых материалов с равномерным распределением плотности прессовок

В данном разделе рассматриваются наиболее удобные современные методы уплотнения порошковых масс. Этот этап, предшествующий удалению связующего и спеканию, играет ключевую роль в получении беспористой керамики с равномерным распределением плотности в массовом производстве. Также анализируются возможности бесформовых подходов к производству керамических тел точной формы, включая механическую обработку керамических прессовок и технологии аддитивного производства.

Компактирование – важный технологический этап в массовом производстве технической керамики. Этот этап обычно начинается со смеси порошков или шликера (обычно называемого формовочной массой) и заканчивается уплотнённой прессовкой – компактом. За этим следует удаление связующего и высокотемпературное спекание для получения целевого керамического изделия. Этот этап играет решающую роль в производстве

беспористой керамики с равномерным распределением плотности как на лабораторном, так и на промышленном уровне [20].

Материалы с максимальной плотностью и минимальным размером зёрен проявляют лучшие механические свойства, которые часто требуются для современных приложений. Такая керамика может быть изготовлена из высокодисперсных или наноразмерных порошков с использованием специальных методов уплотнения и спекания, препятствующих неконтролируемому росту зёрен.

Мелкозернистую и высокоплотную керамику можно получать спеканием при высоком давлении или высокой скорости нагрева, что позволяет минимизировать время удерживания материала при самой высокой температуре. Эти требования могут быть выполнены с помощью горячего прессования (ГП), горячего изостатического прессования (ГИП) или электроимпульсного плазменного спекания (ЭИПС). Эти методы широко используются для изготовления керамических образцов в лабораторных и промышленных условиях. Между тем, данные методы требуют дорогостоящего инструментария (оборудования и оснастки) [20].

Количественные характеристики процесса прессования сильно зависят от содержания связующего и применяемого метода уплотнения [21]. Также важны геометрические размеры пресс-формы и процессы, происходящие на границе раздела между порошковым телом и пресс-формой. Чем сложнее геометрические характеристики пресс-формы, тем более неоднородным является поле сил трения и скоростей перемещения порошковых компонентов при заполнении пресс-формы или при прохождении через формовочную установку.

1.4. Шликерное литьё

Шликер – устойчивая суспензия металлического или неметаллического порошка в жидкой среде. Шликерное формование является способом изготовления изделий путём заливки шликера, представляющего собой

однородную концентрированную взвесь порошка в жидкости, в пористую форму с последующей сушкой. Шликерное литьё позволяет получать изделия сложных форм, мало- и крупногабаритные, полые с равномерной толщиной стенок, с высокой чистотой поверхности и точных размеров. Существенными недостатками шликерного формования являются высокая суммарная длительность процесса получения заготовок, необходимость изготовления и хранения больших количеств адсорбирующих форм, потребность в мощном сушильном оборудовании. К основным свойствам шликера, определяющим качество получаемых из него заготовок, относят: текучесть; седиментационную и агрегативную устойчивость при высоком содержании твердой фазы; способность заполнять форму. Дисперсность частиц твердой фазы, распределенных в шликере, определяет его устойчивость, вязкость и влияет на плотность получаемых заготовок [22].

Кроме традиционного шликерного литья так же используют его модификацию, заключающуюся в заливке термопластичного шликера в форму под давлением, которая позволяет получать керамику более высокого качества.

Шликерное литьё активно применяется для изготовления изделий сложной и/или индивидуальной формы, в том числе различных протезов. Например, в работе [23] авторами была разработана технология получения пористой керамики на основе частично стабилизированного диоксида циркония. Свойства керамики, в частности пористость, обеспечивали двумя способами. Первый заключался в варьировании режимов прессования и спекания, второй - в введении в состав керамики различного количества легковыгорающих добавок с разной геометрией частиц. Авторам удалось получить керамику, пригодную для культивирования и жизни живых клеток, что делает её перспективной для использования в эндопротезировании костной ткани. Авторами [23] опубликовано множество работ, посвящённых керамическим материалам медицинского назначения и изготовлению протезов методом шликерного литья [24]. Фотография лицевого имплантата, полученного авторами [23] методом шликерного литья, представлена на рисунке 3.



Рисунок 3 – Имплантат из биоактивной керамики для реконструкции верхней челюсти и скулоорбитального комплекса [24]

Существенным недостатком технологии шликерного литья являются необходимость использования специальной подготовки сырья (фидсток), высокая сложность проектирования, существенная дороговизна и продолжительность изготовления пресс-форм, что может быть оправдано при производстве только весьма крупных партий идентичных изделий, имеющих продолжительный спрос у потребителя. Костные имплантаты индивидуальной формы таковыми не являются и требуют существенно более короткого цикла «разработка-проектирование-изготовление».

1.5. Сухое или полусухое прессование

Способ формования порошков сухим или полусухим прессованием применим к системам, не содержащим связующего или включающим его с низкой долей. Метод приводит к образованию плотных и механически прочных прессовок. Следует подчеркнуть, что этот метод наиболее часто применяется в промышленном производстве многих типов металлов, керамики и композитов. Сухое прессование также является наиболее экономичным методом, поэтому рекомендуется его использовать всякий раз, когда это возможно. Тем не менее, при данном методе прессования могут наблюдаться градиентные перепады плотности в изделиях сложной геометрической формы.

Все методы сухого прессования можно разделить на статические и динамические (импульсные). Термин «статический» означает, что внешнее давление на формовочную массу постепенно увеличивается с относительно низкой скоростью [20]. Статические методы сухого прессования включают одностороннее прессование в закрытых жестких формах, холодное изостатическое прессование и квазиизостатическое прессование, которые более подробно описаны ниже. В динамических методах, напротив, внешнее давление применяется в виде импульсов или ударных волн, и, таким образом, скорость повышения давления очень высока.

1.5.1. Динамические (импульсные) методы сухого прессования

В эту группу методов входят процессы уплотнения под действием импульсных внешних воздействий или ударных волн, генерируемых различными источниками [25, 26]. Ударные волны могут возникать при взрыве сжатого горючего газа или жидкости. В качестве альтернативы можно использовать электрогидравлический разряд высоковольтного конденсатора через водяной зазор между двумя электродами или энергию, накопленную в импульсном магнитном поле. Эти энергетические всплески могут быть использованы для формования изделий методами ударно-волнового уплотнения, ударного прессования, электроуплотнения, а также гидродинамического и магнитно-импульсного прессования. Вибрационное и ультразвуковое прессование также можно отнести к динамическим методам из-за периодичности внешнего воздействия.

Принято считать [20], что главным преимуществом методов динамического формования является отсутствие внешнего и внутреннего трения. Дело в том, что процесс идёт слишком быстро, чтобы развивались силы трения. Кроме того, динамические методы часто позволяют получить компакты с более высокой средней плотностью и однородностью по сравнению с их статическими аналогами. Формы для динамической консолидации, прежде всего, должны отличаться повышенной механической прочностью, чтобы

выдерживать ударную волну более 1 ГПа. Чтобы выполнить такое требование, эти методы обычно применяются для формования тел небольших размеров (менее 100 мм).

Магнитно-импульсное прессование сухих наноразмерных порошков

Магнитно-импульсное уплотнение, являющееся одним из простейших динамических методов, изначально было разработано для наноразмерных порошков [27, 28]. Порошок загружается в форму и прессуется под действием слабых импульсных волн длительностью 10–500 мкс и ударной волной до 5 ГПа (при многократном использовании). В этом режиме существенно снижаются как внешние, так и внутренние силы трения, что позволяет получать компакты с очень высокой плотностью.

Энергия, в основном хранящаяся в конденсаторе, преобразуется в кинетическую энергию пуансона электромеханическим преобразователем. Механический импульс генерируется за счет взаимодействия импульсного магнитного поля с проводящей поверхностью концентратора. Концентратор, соединенный с пуансоном, приводится в действие диамагнитным эффектом, который стремится вытолкнуть проводник из магнитного поля. Концентратор приводит в действие верхний пуансон, сжимающий формовочную массу. Такая схема соответствует одноосному уплотнению. Могут быть два концентратора как сверху, так и снизу, чтобы удвоить давление уплотнения и, таким образом, реализовать режим двухосного уплотнения.

В местах соприкосновения и взаимного скольжения наноразмерных частиц выделяется тепло. Благодаря этому горячий режим динамического уплотнения может быть реализован за счет определённой оптимизации внешних ударных волн. Этот режим возможен для наноразмерных порошков из-за их высокой избыточной поверхностной энергии.

Для уплотнения магнитным импульсом характерно то, что формуемый материал накапливает значительную избыточную энергию в виде структурных дефектов. Эта запасённая энергия снижает температуру, необходимую для

последующего спекания, на 200–300 °С, что является чрезвычайно полезным, поскольку подавляет рост зёрен в целевых керамических частицах [29].

Вибрационное уплотнение

Вибрационное прессование часто применяется как промежуточный этап уплотнения керамических и металлических порошков [30, 31]. Вибрация значительно снижает как внутреннее, так и внешнее трение внутри формовочной массы при уплотнении. Формовочная масса может как не содержать, так и содержать определенное количество связующего. В случае формования масс со связующим один цикл виброуплотнения обычно приводит к увеличению плотности на 6–12%. Вибрация может быть применена к одному или обоим пуансонам или к матрице.

Вибрационное уплотнение особенно эффективно для порошков твердых материалов, устойчивых к традиционным методам статического прессования, таких как карбиды, нитриды или бориды металлов. Относительно прочные прессовки с низкими внутренними напряжениями и относительной плотностью до 75–85% обычно могут быть получены путём виброуплотнения.

Вибрационное уплотнение позволяет получать компакты сложной формы с высокой однородностью плотности, что является очевидным преимуществом метода. Кроме того, оборудование, необходимое для его реализации, относительно простое и доступное. Тем не менее, вибрация вредна для персонала из-за повторяющихся вибрационных воздействий.

Ультразвуковое прессование

Ультразвуковое прессование является предпочтительным методом изготовления однородно структурированных прессовок высокой плотности, главным образом из наноразмерных порошков [32, 33]. Как и в описанных выше методах, ультразвуковое воздействие снижает как внутреннее, так и внешнее трение. Обычно связующее не требуется, что устраняет проблемы, относящиеся к удалению. Относительная плотность образующихся сырых тел может достигать 50%, что является относительно высоким показателем для режима

уплотнения без связующего в применении к нанопорошкам. Важно отметить, что плотность прессовок слабо зависит от характеристик ультразвука и определяется в первую очередь прикладываемым статическим давлением. Ультразвуковая обработка заставляет наноразмерные частицы порошка или их агрегаты вибрировать, и поэтому интенсивность ультразвуковой обработки должна быть такой, чтобы амплитуда вынужденных колебаний была того же порядка, что и размер частицы (агрегата) [10].

1.5.2. Методы изготовления без формования

Производство твердых тел произвольной формы

Технология изготовления твердых тел произвольной формы (Semi – Solid Forging) (SFF) за последнее десятилетие пережила огромный прогресс. Этот метод может быть модифицирован, например, 3D-печатью [34], стереолитографией [35], роботизированным литьем [36], прямой струйной печатью [37], наплавленным моделированием [38] и т. д. Адаптация технологии SFF к керамике оказалась сложной задачей из-за хрупкости, твердости и высоких температур плавления наиболее распространённых керамических материалов.

Созданная в цифровом САПР модель объекта, который будет изготовлен, сначала разрезается на тонкие изображения слоёв в поперечном сечении. Чтобы получить окончательную геометрию компакта, слои последовательно складываются, соединяясь с предыдущими. Эта технология позволяет получать керамические тела предельно сложной формы.

Следует отметить, что в настоящее время эти методы нерентабельны для массового производства. Однако они обладают весьма конкурентоспособным потенциалом в производстве единичных изделий уникальной формы. И в настоящее время это довольно актуальное требование.

Потребность в отдельных керамических изделиях уникальной формы постоянно возникает при производстве ортопедических или дентальных имплантатов в практической медицине [39]. В этом случае керамическое изделие должно быть точно адаптировано к конкретному пациенту и типу патологии.

Плохая отделка поверхности керамических компактов – главный недостаток современных технологий изготовления тел произвольной формы. Это сильно влияет на функциональные свойства керамических изделий. Дополнительный этап механической обработки, применяемый как к компактам, так и к спеченной керамике, трудоёмок и дорог. Поэтому улучшение качества поверхности керамических компактов, изготовленных по технологиям SFF, является одной из самых актуальных технологических проблем.

Механическая обработка керамических компактов (The green ceramic machining) (GCM)

Обработку ещё не спечённой керамики (GCM), как технологическую операцию, можно формально классифицировать как модификацию производства безформенного тела. Более того, он основан на подходе «сверху вниз», в отличие от рассмотренной выше технологии SFF, поскольку готовое изделие доводится до требуемой формы и размера с помощью механической обработки.

Применение GCM в технологии изготовления керамики имеет давнюю историю. Однако за последнее десятилетие технология GCM поднялась до следующего уровня [40, 41]. В частности, инструменты автоматизированного проектирования и автоматизированного производства (CAD / CAM) вошли в повседневную практику. Благодаря недавнему развитию станков с ЧПУ, GCM превратилась в настоящую альтернативу литью. В первую очередь GCM применяется для изготовления уникальных керамических изделий, таких как зубные имплантаты [42, 43].

Обработка спечённых керамических изделий, как правило, не рекомендуется из-за высокой вероятности появления поверхностных микротрещин, снижающих их механическую прочность [44]. В то время как обработка прессовок требует гораздо меньших усилий, и поверхностные дефекты, если они появляются, будут успешно устранены на последующей стадии спекания [46, 47].

Можно сказать, что GCM уже стал отраслевым стандартом обработки керамики [47]. Типы обработки включают сверление, токарную обработку и фрезерование [48].

При механической обработке сырого компакта обычно образуется много пыли, поэтому рядом с режущим инструментом обычно устанавливается вытяжной вентилятор. Желательно собрать пыль для дальнейшей переработки.

Хотя алмазные инструменты предпочтительнее для GCM, многие операции обычно можно выполнять с помощью инструментов, изготовленных из быстрорежущей стали [49]. Однако инструменты из быстрорежущей стали подвержены быстрому износу из-за абразивных свойств керамических порошков. Это отрицательно сказывается на качестве поверхности прессовок. Но качество поверхности имеет тенденцию улучшаться при последующем спекании, сопровождающемся массопереносом и отверждением дефектов.

Бесконтактный GCM с лазерами – перспективное направление развития технологий [50]. Лазерная обработка применима для компактов с содержанием твердой фазы менее 40 об.% [51]. Материал постепенно послойно испаряется с помощью CO₂-лазера. Эффективная температура процесса составляла 600 °С, что намного ниже, чем температура, необходимая для обработки спеченной керамики, и, следовательно, дешевле.

Описанные выше методы являются актуальными для формования керамики из перспективных неорганических материалов, которые получают широкое распространение в ближайшем будущем [52-54].

1.5.3 Статические методы сухого прессования

Одноосное сухое прессование в закрытых жёстких пресс-формах

Одностороннее прессование в закрытых жёстких пресс-формах – самая распространённая разновидность сухого прессования. Метод легко автоматизируется и отличается высокой производительностью. Удаление связующего не представляет проблемы из-за его полного отсутствия или низкого содержания. Тем не менее, механические напряжения, возникающие в сыром

теле, являются основным недостатком сухого прессования. Проблема обостряется по мере увеличения давления уплотнения. Упругое последствие в условиях неравномерного распределения плотности по объёму может переходить в дефекты и появление трещин при извлечении сырого тела из формы.

Понимая происхождение процессов, можно скомпенсировать их негативные последствия. Например, предварительное вакуумирование объёма порошкового тела удаляет абсорбированный воздух. Однако эта процедура предварительной обработки довольно дорога и применяется редко [20].

Прессуемый порошок испытывает внутреннее и внешнее трение. Внутреннее касается трения между частицами порошка, тогда как второе включает трение между порошком и стенками формы. Эффекты внешнего трения можно уменьшить, добавив специальные смазки в связующее или на поверхность раздела порошковое тело – стенки формы. Использование форм с керамическими поверхностями вместо металлических также снижает внешнее трение, поскольку коэффициенты трения керамика-керамика обычно намного ниже, чем у металлокерамики [20]. Однако такие формы существенно дороже.

Для улучшения однородности плотности прессовок может применяться двухстороннее прессование. В этом случае силы внешнего трения действуют в направлении друг к другу.

Этот метод является одним из наиболее экономически эффективных для массового производства керамических тел простой формы, особенно когда требования к механическим свойствам не слишком высоки.

Коллекторное прессование

Изобретение коллекторного способа прессования, впервые предложенное сотрудниками НОИЦ "Наноматериалы и нанотехнологии" Томского политехнического университета [55], стало одним из серьезных достижений в технологии одноосного сухого прессования. На рисунке 4 сравнивается стандартная форма (а) и две формы для коллекторного прессования (б, в).

Устройства (пресс-формы), реализующие коллекторный способ, состоят из двух встречно движущихся в процессе прессования сплошных или составных формообразующих элементов (1, 2), поверхность каждого из которых содержит часть пассивной (5, 6) и часть активной (7, 8) формообразующей поверхности. Уплотнение порошка осуществляется путем их взаимного встречного перемещения формообразующих элементов при скольжении друг по другу вдоль оси прессования [56].

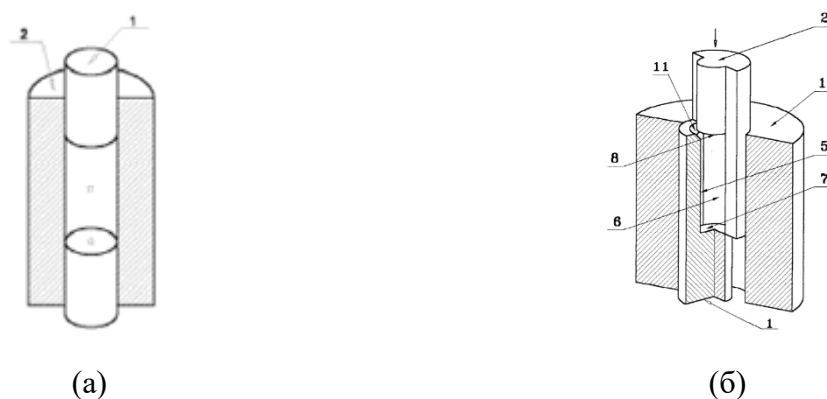


Рисунок 4 – Цилиндрические формы для сухого прессования: (а) – стандартная форма (1 - пуансон, 2 - матрица); (б) – форма для коллекторного прессования: 1, 2 – формообразующие элементы; 5, 6 – части пассивной формообразующей поверхности первого и второго элементов пресс-формы; 7, 8 – часть активной формообразующей поверхности первого и второго элемента пресс-формы; 10 – конструктивный элемент, удерживающий элементы 1 и 2 от неосевых перемещений; 11 – технологическая проточка на элементе пресс-формы для облегчения загрузки порошка [56]

На этапе прессования к разным частям пассивной формообразующей поверхности прикладываются внешние силы трения, имеющие противоположные направления, хотя они равны по абсолютным значениям. Это способствует выравниванию плотности по всей уплотняемой массе.

Количество элементов матрицы, движущихся в противоположных направлениях, можно увеличить для удовлетворения требований конкретных технологических задач, связанных с однородностью высокой плотности компакта и низкой пластической деформацией сдвига в нём. Были предложены специальные конструкции пресс-форм для коллекторного прессования для различных форм прессовок и потенциальных областей применения, включая

конические шестерни, мельницы, рабочие колёса и гидронасосы турбин, компоненты тороидальной, сферической и винтовой формы [57].

Однако увеличение количества независимых компонентов имеет ограниченный потенциал из-за сложности технологии их изготовления [58].

Холодное изостатическое прессование

Холодное изостатическое прессование, или ХИП, является распространённым методом прессования, применяемым для формования порошковых масс сложной формы. Порошковое тело помещают в оболочку из соответствующего эластомера (резина, полиуретан и др.) и переносят в камеру изостатического пресса [59]. Пресс создает высокое давление и сжимает эластичную мембрану и формовочную массу в ней со всех сторон через жидкую среду, служащую средством передачи давления. Плотность в центре прессовки всегда ниже, чем во внешних частях, даже когда сжимается идеальный шар. Но необходимый уровень плотности обычно достигается при более низком внешнем давлении по сравнению со случаем одноосного прессования. ХИП позволяет получать компакты с достаточно однородной плотностью [60, 61]. Использование ХИП практически исключает эффекты, связанные с внешним трением, хотя внутреннее трение остается во внимании. Также становится важной правильная конструкция эластичных пресс-форм [62]. Примечательно, что как размер, так и форма эластичной пресс-формы всегда отличаются от целевого компакта.

ХИП хорошо подходит для уплотнения порошковых формовочных масс сложной формы. Среди основных недостатков метода можно отметить высокую стоимость изостатических прессов и необходимость изготовления и замены одноразовых эластичных пресс-форм. Тем не менее, этот метод довольно часто используется в качестве вспомогательного этапа уплотнения для улучшения качества компактов, полученных другими методами.

Квазиизостатическое прессование

Также к статическим методам сухого прессования относится квазиизостатическое прессование. КИП позволяет реализовать режим изостатического прессования с использованием стандартного одноосного пресса без использования жидкости, как в случае ХИП [63-66]. Изотропная передача давления достигается за счёт деформации толстостенной эластичной оболочки при одноосном сжатии. Идея, лежащая в основе этого метода, схематично показана на рисунке 5. Когда к эластичной оболочке прилагается давление, она деформируется и, таким образом, передаёт давление во всех направлениях. Компакты, изготовленные этим методом, имеют перепады плотности при переходе от поверхности пуансона к периферийным частям компакта, как в случае ХИП.

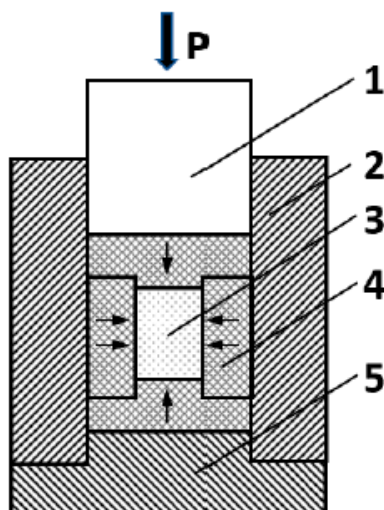


Рисунок 5 – Схема цилиндрического пресса для квазиизостатического прессования: 1 - пуансон; 2 - матрица; 3 - порошок цилиндрической формы; 4 - эластомер; 5 – основание

Квазиизостатическое прессование может быть реализовано на стандартных одноосных прессах, и это главное преимущество этого метода. Сложность конструирования и изготовления эластичных оболочек, трудности с получением сырых тел точных размеров (особенно в случае сложных форм) – недостатки метода. Тем не менее, квазиизостатическое прессование может найти применение для уплотнения тел сложной формы в случае, если удастся изготовить эластичную оболочку с необходимой формообразующей полостью.

При изготовлении таких оболочек можно найти помощь в быстроразвивающихся аддитивных технологиях.

1.6. Развитие аддитивных технологий и их применение при производстве изделий медицинского назначения

Аддитивное производство (АП), известное также как 3D-печать, воспринимается многими как революция в производстве. Вдобавок АП стало ключом к быстрому развитию биопроизводства. Последние достижения в этой области обусловили разработку индивидуальных решений в здравоохранении. Без технологий АП была бы невозможной (или как минимум была бы чрезвычайно трудной) индивидуальная адаптация многих медицинских изделий и услуг: эндопротезов, устройств доставки лекарственных средств, инструментов, анатомических моделей *in vitro* [67, 68].

АП стало в последние годы гибкой и мощной технологией производства в сфере здравоохранения. Несмотря на то, что технология развивается около двадцати лет, необходимой для применения в реальных условиях зрелости она достигла лишь недавно. Идея применения трёхмерных медицинских изображений, а именно данных компьютерной томографии, для воссоздания физической модели впервые была предложена в 1979 г. В то время еще не существовало систем быстрого прототипирования, однако присутствовала возможность обработки материалов фрезеровкой. До появления 3D-принтеров основным способом изготовления уникальных деталей для прототипирования была обработка заготовок на станках с числовым программным управлением. На таком станке компьютер управляет инструментами, необходимыми для изготовления детали: токарным, фрезерным и шлифующим инструментами. Процесс изготовления начинается с заготовки, которой постепенно придается требуемая форма; однако окончательная доводка детали выполнялась вручную.

Первая анатомическая модель, изготовленная с применением медицинской визуализации, была изготовлена в том же 1979 г.: это была модель таза, изготовленная из полистирола. По мере того как в конце 1980-х стали появляться

коммерческие образцы 3D-принтеров и все чаще стали использоваться технологии трехмерной визуализации, всерьез стал рассматриваться вопрос о применении 3D-печати в медицине [69-71].

Быстрое прототипирование – технология АП, подразумевающая создание требуемой детали послойно «снизу вверх». С её помощью точность и функциональность систем автоматизированного проектирования внедрялись в производство. Технология позволяла в сжатые сроки изготовить прототип, точно воспроизводящий инженерный чертёж. При необходимости внесения изменений в прототип инженер изменял цифровой чертёж, после чего изготавливалась модифицированная деталь.

АП является быстроразвивающейся технологией, которая находит множество разнообразных применений не только в биомедицине, но и в авиакосмической, автомобильной, военной и производственной отраслях, а также во многих других областях [71]. АП обеспечивает инновации, легко изготавливая чрезвычайно сложные конструкции, создавая детали послойно, что даёт ему гибкость в производстве отдельных или сложных деталей [72]. В медицинской области с помощью аддитивных технологий были напечатаны индивидуальные имплантаты для различных частей тела пациента и различные хирургические инструменты и медицинские инструменты [72]. Другие биомедицинские приложения включают трехмерную биопечать живых тканей и клеток [73], персонализацию медицинских устройств для сложных деформаций и т.д.

Самая важная способность 3D печати заключается в том, что она позволяет нам изготавливать только за один цикл детали, которые чрезвычайно сложно или невозможно изготовить с использованием любой другой технологии производства. Полые детали, детали с внутренней структурой, детали из пористой или ячеистой структуры, такие как ткани или клетки, детали с решётчатой конструкцией, такие как каркасы, детали с плотной внутренней сетью, такие как кости, детали со сложной геометрией, такие как зубные протезы

и печать органов и т. д. Именно это разнообразие позволило 3D печати найти огромное применение в области медицины.

3D печать может удовлетворить конкретные и индивидуальные требования потребителей. Например, протезы или имплантаты зависят от потребностей и индивидуальности клиента и различаются для разных людей [74], поэтому они не могут быть изготовлены с использованием каких-либо методов массового производства, при которых производятся определённые стандартные продукты, и, кроме этих стандартных продуктов, производство индивидуальных деталей не может быть выполнено. Таким образом, аддитивные технологии (АТ) для производства имплантатов и протезов по индивидуальному заказу является весьма актуальной задачей.

Существует множество видов печатных материалов для 3D -принтеров: от пластиковых нитей до металлического порошка, керамики, гидрогелей, углеродного волокна, композитов и т.д. Эта гибкость метода 3D-печати и разнообразие материалов для печати является одной из причин, по которой 3D-печать, несмотря на то, что она является нетрадиционной и относительно новой производственной технологией, находит множество применений в области медицины, здравоохранения, автомобилестроения, обороны и авиастроения.

Текущие биомедицинские приложения радикально меняются. Например, в области стоматологии 3D-сканер используется для получения 3D-модели зубов или зубных протезов пациента в САПР, которые затем изучаются и, наконец, изготавливаются путем АП. Такие напечатанные на заказ протезы используются для исследовательских целей или создания искусственных протезов для пациента [74]. Также АТ полезны в виртуальном хирургическом планировании, в котором операции выполняются на напечатанных жизненно важных органах в масштабе 1:1, что позволяет врачам отточить мастерство на 3D-модели органа перед самой операцией.

Помимо этого, 3D-печать используется для изготовления каркасов *in vivo* (внутри живого тела), а также каркасов *in vitro* (вне живого тела) [75], моделей органов для тестирования и моделирования заболеваний, а также выбора ткани

какой-либо части тела и печать на ней, приводящая к образованию хряща [76], кожи [77] и костей [78].

1.7. Аддитивные технологии в ортопедии и протезировании

Ортопедические травмы нарушают выравнивание, движение и общую целостность человека. Эти проблемы можно решить при помощи медицинских имплантатов. Хотя ортопедические имплантаты доступны в стандартных размерах, из-за вариабельности анатомии необязательно, чтобы каждый пациент подходил к одному из стандартных размеров. Следовательно, чтобы удовлетворить эту вариативность, используется 3D-печать для изготовления индивидуальных ортопедических имплантатов для конкретных пациентов [79].

Например, форма и размер зубных протезов индивидуальны для каждого человека, эта анатомическая изменчивость в области зубных протезов подтолкнула к использованию индивидуального производства для каждого пациента с использованием 3D-печати. Зубные протезы пациента сканируются с использованием методов сканирования и визуализации. Достижения в этой области способствовали дальнейшему продвижению 3D-печати в стоматологии, обеспечивая высокоточную реконструкцию 3D CAD. АТ в стоматологии нашли применение в реконструкции зубных полостей, печати индивидуальных зубных имплантатов и протезов для конкретного пациента [80].

При изготовлении керамических изделий, применение АТ по сравнению с традиционными способами формования обеспечивает «геометрическую гибкость» сложных деталей. Однако аддитивные технологии, применяемые для непосредственного производства самих изделий, имеют существенные ограничения по материалам, особенно, керамическим. Преимуществами керамики является устойчивость к высоким температурам и механическим воздействиям, а также их прочность. Но использование этих преимуществ вызывают проблемы, возникающие при 3D печати керамическими порошками: пористость, неоднородность структуры, образующаяся в процессе печати, появление трещин [81].

Использование аддитивных технологий ограничено следующими факторами [82, 83]:

- Ограничение размеров отформованного изделия рабочей зоной оборудования;
- Отсутствием универсальности, узким спектром материалов: конкретный метод формования связан со строго индивидуальным набором веществ;
- Низкой скоростью формования: от нескольких часов до нескольких дней;
- Высокими требованиями к характеристикам материалов (структура, морфология поверхности частиц, химический и фазовый состав, кристалличность, реология).

Не менее перспективным представляется вариант эффективного применения АТ в изготовлении прессовой оснастки для производства имплантатов сложной и индивидуальной формы. При помощи одной 3D-модели можно изготовить множество эластичных прессоформ, не нанеся вреда напечатанному контртелу. К тому же эта процедура в разы дешевле и быстрее 3D-печати керамики. Главная проблема такой технологии – правильно смоделированное контртело, в котором будет учитываться нелинейная деформация порошкового тела внутри оснастки во время прессования.

1.8. Выводы по разделу и постановка задач исследования

На основании анализа литературных источников провели сравнение основных методов получения керамических изделий. Оно показало, что КИП является одним из самых перспективных методов, позволяющих быстро и с минимальными затратами получать керамические изделия широкой номенклатуры форм из широкого спектра порошковых материалов.

Отмеченные недостатки КИП подлежат устранению путём поиска аппарата количественного описания этого процесса, разработки методик прогнозирования и компенсации нелинейной деформации и изготовления

эластичных оболочек КИП с применением аддитивных технологий, упрощения и удешевления методик их изготовления, оптимизации геометрии, условий и режимов КИП для производства порошковых изделий сложной и индивидуальной формы.

В данной работе мы использовали 3D-печать в качестве метода изготовления контртела, которое в дальнейшем применялось для создания прессовой оснастки, применяемой в КИП керамического зубного штифта. Контртело было смоделировано в САПР SolidWorks с учётом нелинейной деформации, последовавшей из-за прессования.

Таким образом, целью работы является принципиальная и количественная оценка возможности получения методом КИП изделий сложной и/или индивидуальной формы с применением аддитивных технологий, выявление общих проблем реализации КИП и отыскание путей их решения.

Для достижения цели в работе поставлены и решены следующие задачи.

1. Провести модельное и экспериментальное изучение влияния геометрических параметров оболочки и режимов КИП на величину нелинейной деформации формообразующей поверхности внутренней полости эластичной оболочки на образцах простой геометрии.

2. Изготовить образцы простой геометрической формы в оболочках, компенсирующих искривление формообразующей поверхности внутренней полости оболочки. Дать количественную оценку отклонению формы образцов от заданной геометрии. Провести моделирование деформации оболочек, компенсирующих искривление формообразующей поверхности внутренней полости оболочки.

3. Изучить специфику уплотнения порошка в процессе КИП, характер распределения плотности в прессовках, сопоставить с одноосным прессованием в закрытой жёсткой пресс-форме. Выбрать уравнение наиболее точно описывающее уплотнение порошков в процессе КИП.

4. Выявить эффекты и закономерности КИП, требующие учёта при реализации этой технологии. Оценить потенциальную возможность реализации

КИП с применением аддитивных технологий. Смоделировать контртело в форме зубного штифта в САПР SolidWorks. Изготовить эластичную оболочку с формообразующей полостью при помощи распечатанного на 3D-принтере контртела.

5. Изготовить керамический образец методом КИП в форме зубного штифта.

2. МАТЕРИАЛЫ, ТЕХНИКА И МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1. Характеристики материалов исследования

В качестве исходных материалов для изготовления керамических изделий были использованы промышленные нанопорошки стабилизированного иттрием диоксида циркония **3YSB-E** (TOSOH, Япония) и **3Y-25A-B** (Treibacher Industrie AG, Австрия), которые чаще всего используются в производстве медицинских имплантатов. Выбранные порошки представляют собой сыпучие сферические гранулы размером до 0,1 мкм, состоящие из равноосных кристаллитов размером до 100 нм.

При реализации КИП для изготовления толстостенной эластичной оболочки был использован полиуретановый компаунд «Силагерм 5045», обладающий достаточной жёсткостью и высокой скоростью полимеризации. Характеристики используемого компаунда представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Характеристики полиуретанов «Силагерм 5045» и «Силагерм 6050»

Марка	Силагерм 5045	Силагерм 6050
Твёрдость по Шору А	40±5	48-55
Соотношение (по весу)	2А:1В	1А:1В
Продолжительность пребывания в жидком состоянии при 20°С, мин.	45-100	30-60
Время отверждения, час	24-36	24
Плотность, г/см ³	1,03±0,03	1,01±0,02
Вязкость основной пасты по визкозиметру ВЗ-246, сек	40-140	60-150
Удлинение перед разрывом, %	350	600-1000
Предел прочности на разрыв, МПа	2,4-4,5	5,0-8,0
Усадка, % менее	0,1	0,1

Для изготовления керамического зубного штифта, который имеет сложную геометрическую форму, потребовался полиуретановый компаунд

более высокой жёсткости. Для этих целей был использован «Силагерм 6050», характеристики которого приведены в таблице 4.

Для обоих компаундов значения показателей, указанные в таблицах 2.1, получены на образцах без воздушных пор после 5 дней выдержки при комнатной температуре (20°C) и влажности 55%.

2.2. Модельное и экспериментальное изучение влияния величины прикладываемого давления на деформацию порошкового тела

В рамках поставленных задач для количественной оценки нелинейной деформации порошкового тела прессование порошка проводили в параллелепипедной полости толстостенной оболочки КИП, помещённой в жесткую цилиндрическую пресс-форму диаметром 50 мм для одностороннего прессования. Продольный разрез оболочки (вдоль оси приложения нагрузки) представлен на рисунке 6, геометрические параметры оболочки приведены в таблице 5.

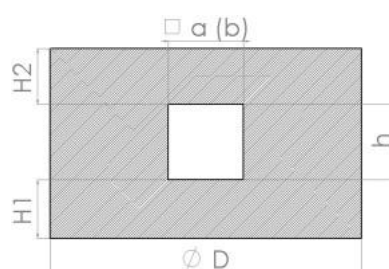


Рисунок 6 – Продольный разрез эластичной оболочки

Таблица 5 – Геометрические параметры эластичной оболочки

D, мм	H1, мм	H2, мм	a, мм	b, мм	h, мм
50	9,54	9,88	12,95	12,95	11,9

Измерение размеров компактов, полученных после прессования, с точностью 10 мкм проводили с помощью электронных толщинометра и штангенциркуля. На рисунке 7 представлена упрощённая модель образца, полученного КИП, и его поперечное сечение с обозначением определяемых размеров.

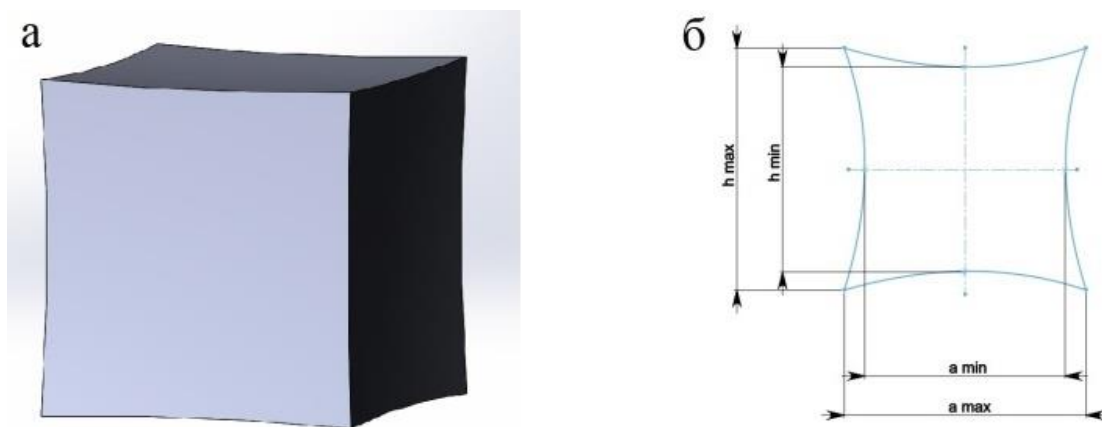


Рисунок 7 – Модель образца, полученного КИП (а); контур поперечного сечения образца (б)

За величину, характеризующую неравномерность деформации формообразующих поверхностей внутренней полости эластичной оболочки в процессе прессования, приняли относительное отклонение размеров компакта от заданного, найденное для трёх ортогональных направлений как разность максимального x_{\max} и минимального x_{\min} размеров спрессованного образца, выраженную в процентах от соответствующего исходного размера x внутренней полости оболочки.

На рисунке 8 представлена зависимость параметра $\frac{x_{\max} - x_{\min}}{x}$ от давления прессования.

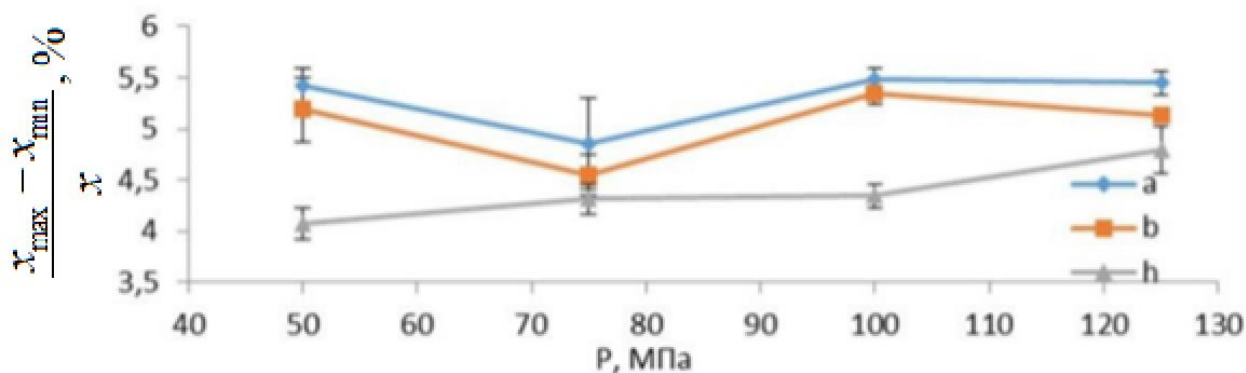


Рисунок 8 – Зависимость величины $\frac{x_{\max} - x_{\min}}{x}$ от давления прессования [84]

Исследование [84], проведенное в НОИЦ "Наноматериалы и нанотехнологии", показало, что относительное отклонение, определённое для

трёх ортогональных размеров образца во всем изученном диапазоне давлений прессования, находится в диапазоне от 4 до 4,5 % и меняется для каждого из размеров в пределах, не более $\pm 0,8\%$. Это позволяет принять указанное отклонение за постоянную величину для выбранной геометрии КИП с достаточной для практики точностью.

Результат работы [84] позволяет сделать выводы о незначительном влиянии величины давления на величину нелинейной деформации формообразующей поверхности в процессе КИП.

2.3. Методика подготовки прессовой оснастки

В ходе работы создали модели контртел и толстостенных эластичных оболочек с формообразующей полостью внутри. Этот этап был осуществлён в САПР SolidWorks. Поводом выбора данной программы послужило наличие модуля Simulation, в котором используется метод конечных элементов. Такой анализ позволяет прогнозировать поведение изделия в реальной среде путем виртуального тестирования САД-моделей.

Для изготовления оболочки с цилиндрической полостью спроектировали контртело с диаметром 14 мм и высотой 16 мм (рисунок 9).

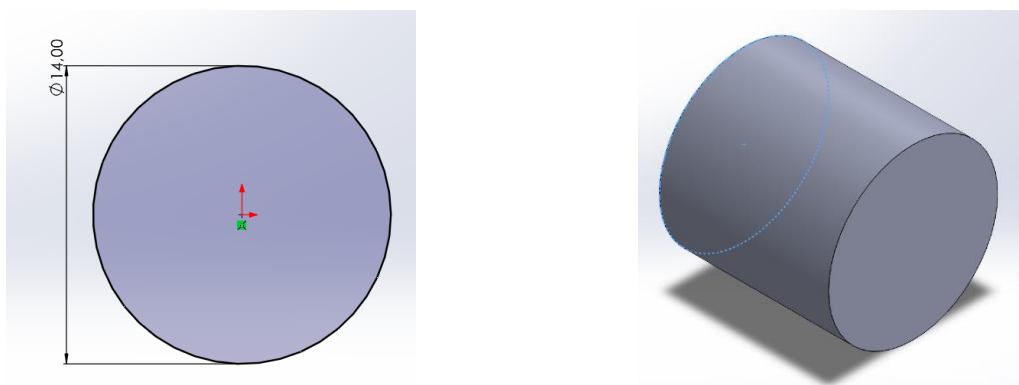


Рисунок 9 – правильное геометрическое тело без учета нелинейной деформации, выполненное в САПР SolidWorks

Далее в САПР полученное контртело вырезали из модели оболочки, образуя в ней формообразующую полость.

Таким образом, технологию проектирования толстостенных эластичных оболочек для прессования можно разделить на 3 этапа:

1. Проектирование контртел методом конечно-элементного моделирования, учитывая нелинейную деформацию формообразующей полости в последствии приложения давления;
2. 3D-печать контртела;
3. Изготовление толстостенной эластичной оболочки: готовое контртело помещали в сосуд, в который также заливали полиуретан «Силагерм 5045». После застывания компаунда контртело удаляли, в результате чего получали толстостенную оболочку с формообразующей полостью (рисунок 10).

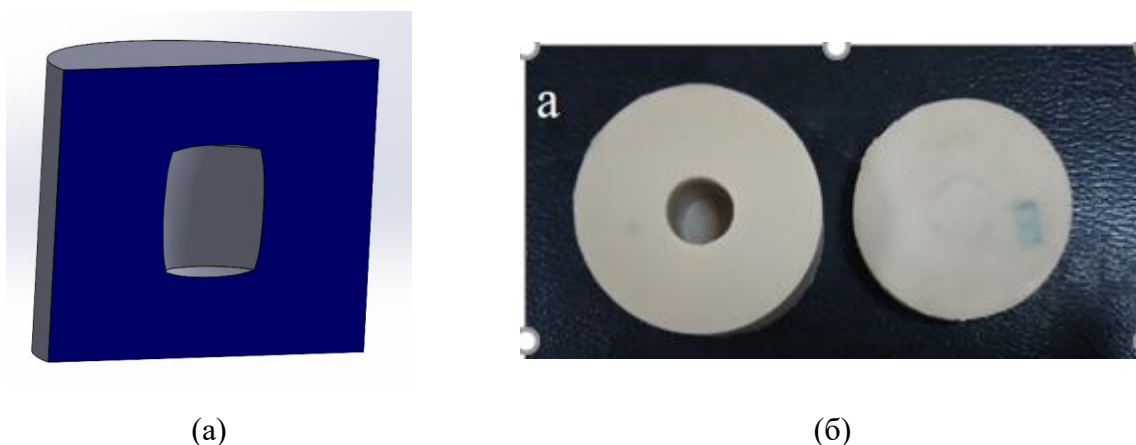


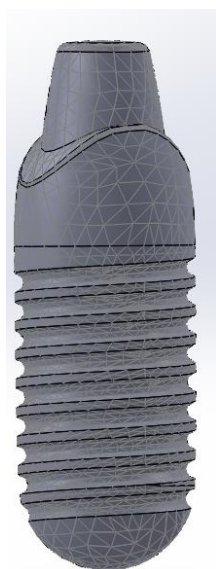
Рисунок 10 – толстостенная оболочка для КИП: (а) конечно-элементная модель; (б) реальная оболочка, изготовленная из полиуретана «Силагерм 5045»

В эксперименте мы использовали данную оболочку для получения первоначальных данных о размерах и деформациях компактов, полученных при давлении прессования 125 МПа.

Для сравнительного сопоставления процессов КИП и ОП использовали количественные критерии, найденные в рамках механистической модели прессования [9]. Наряду с плотностью порошковых тел, в рамках этой модели определяли величины их уплотняемости, прессуемости и механических характеристик.

Для изготовления оболочки с формообразующей полостью сложной геометрической конфигурацией мы использовали полиуретановый компаунд марки «Силагерм 6050», технические характеристики которого уже были приведены выше (таблица 2.1). Процесс создания оболочки такого типа

включает в себя все те же этапы, что и для создания простой оболочки (рисунок 11, 12).



(а)



(б)

Рисунок 11 – Модель контртела сложной геометрической формы (а); распечатанное контртело на 3D принтере (б)



(а)



(б)



(в)

Рисунок 12 – Закреплённое контртело в ёмкости для заливки компаунда (а); ёмкости, залитые компаундом (б); готовая оболочка с формообразующей полостью в виде зубного штифта (в)

2.4. Лабораторное технологическое оборудование

Форма прессовок, полученных КИП, нелинейно отличается от правильного цилиндра. Чтобы найти и зафиксировать данные этой нелинейной деформации было необходимо произвести эталонные цилиндрические образцы. Для сравнения формы компактов, полученных КИП, изготавливали образцы при помощи одностороннего прессования. ОП проводили в стальных цилиндрических пресс-формах из закалённой стали (рисунок 13).



Рисунок 13 – Стальная цилиндрическая пресс-форма

Для изготовления эластичных оболочек на 3D-принтере Designer PRO 250 (рисунок 14) были распечатаны контртела из ABS пластика.



Рисунок 14 – 3D-принтере Designer PRO 250

Компактирование порошка в эластичных оболочках с цилиндрической полостью, помещаемых в жёсткую цилиндрическую пресс-форму, проводили по схеме, представленной на рисунке 15.

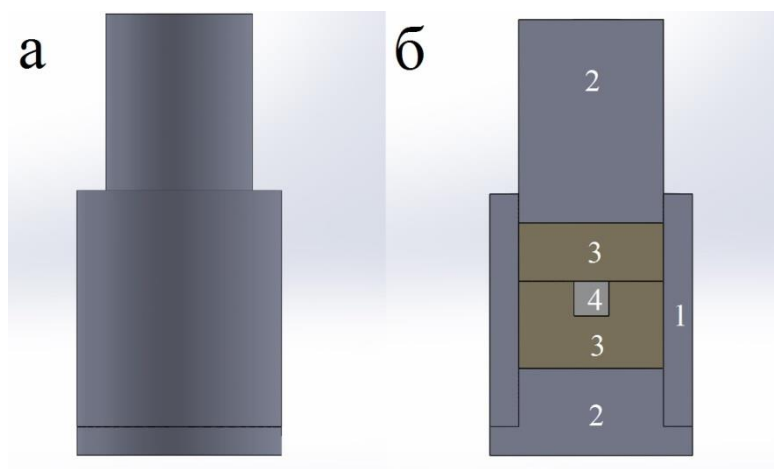


Рисунок 15 – Схема лабораторной реализации КИП в жёсткой цилиндрической пресс-форме (а) для ОП с заключённой в ней замкнутой эластичной оболочкой и порошком (б): 1 – матрица, 2 – пуансоны, 3 – эластичная оболочка, 4 – порошковое тело

При КИП изделий сложной геометрической формы в цилиндрическую эластичную оболочку помещали деформируемый материал, передающий давление, а уже в него оболочку с необходимой нам полостью, заполненной порошком (рисунок 16).



(а)

(б)

Рисунок 16 – Подготовка пресс-формы для КИП (а); 1 – полиуретановая матрица, 2 – ньютоновская жидкость (слайм), 3 – полиуретановая оболочка с полостью сложной геометрической формой (б)

Компактирование изделий в пресс-формах проводили с использованием гидравлического пресса ИП-500М авто (ЗАО «ЗИПО», Россия) (рисунок 17).



Рисунок 17 – Гидравлический пресс IP-500М авто

Спекание компактов проводили в воздушной атмосфере в высокотемпературной печи ЛНТ 08/18/P310 (Nabertherm, Германия) при температурах от 1400 до 1500°С, скорости нагрева до 200°С/час, с выдержкой для порошка: **ЗУСВ-Е** 9,1 часа, **ЗУ-25А-В** 1,41 часа и естественным охлаждением с печью (рисунок 18).



Рисунок 18 – Печь муфельная ЛНТ 08/18/P310 высокотемпературная

Исследование механических характеристик керамических образцов выполняли после механической полировки ее торцов при помощи шлифовально-полировальной системы EcoMet 300 Pro (Buehler, Германия) с применением алмазных суспензий MetaDi (Buehler, Германия). Испытание керамики на сжатие проводили по ГОСТ Р 57606-2017 при помощи гидравлического пресса ИП-500М авто (ЗАО «ЗИПО», Россия). Твёрдость определяли с помощью ультрамикротвёрдомера DUN-211S (Shimadzu, Япония) методом Виккерса. Упругие характеристики керамических образцов рассчитывались исходя из скорости распространения в них продольных и поперечных акустических волн, регистрацию которой проводили на ультразвуковом толщиномере 38DLPlus (Olimpus, США).

2.5. Методика исследования свойств материалов

Рентгенофазовый анализ исследуемых порошковых материалов был проведён рентгеновским дифрактометром Shimadzu XRD-7000S (рисунок 19) с расшифровкой параметров кристаллической структуры и размеров областей когерентного рассеяния (кристаллитов), выполненной с использованием стандартной базы данных кристаллических материалов PDF-4 в свободно распространяемой программе полнопрофильного анализа PowderCell по алгоритму Риттвельда. Критерием достаточной достоверности расшифровки, при котором ошибка определения содержания кристаллических фаз в исследуемом материале не превышает 2% (по массе), в этом алгоритме служит R_{wp} -параметр [101]. Характеристики Shimadzu XRD-7000S: рентгеновская трубка Cu- α , минимальный шаг сканирования 0,02 (2 θ).



Рисунок 19 – Рентгеновский дифрактометр Shimadzu XRD-7000S

Морфологические особенности порошка и консолидированной керамики, а также чистоту элементного состава определяли с использованием методов сканирующей электронной микроскопии.

Определение гранулометрического состава порошков проводили методом лазерной дифракции с помощью лазерного дифракционного анализатора размеров частиц Shimadzu SALD-7101 (рисунок 20). Диапазон измерения размера частиц на этом приборе составляет от 10 нм до 300 мкм. Этот метод основан на измерении углового распределения интенсивности рассеянного света при прохождении лазерного луча через диспергированный образец.



Рисунок 20 – Лазерный дифракционный анализатор размеров частиц Shimadzu SALD-7101

Для выбранных порошков была определена величина удельной поверхности, найденной по уравнению БЭТ (названного по инициалам авторов Брунауэр, Эммет и Теллер). Зная удельный вес материала порошка и определив удельную поверхность порошка, а также предполагая сферическую форму частиц, можно оценить их средний диаметр. Величина удельной поверхности порошков была определена на БЭТ-анализаторе удельной поверхности МЕТА СОРБИ-М (рисунок 21). Прибор имеет следующие характеристики: диапазон измерений удельной поверхности 0,01–2000 м²/г, предел допускаемой относительной погрешности измерений удельной поверхности ± 6%.



(a)



(б)

Рисунок 21 – Прибор для измерения удельной поверхности (МЕТА СОРБИ-М) (а), станция для подготовки образцов (б)

В работе использовали сканирующий электронный микроскоп (СЭМ) JSM-7500FA (JEOL, Япония) с энергодисперсионным микроанализатором EDXS (рисунок 22). Характеристики СЭМ: пространственное разрешение 1 нм, максимальное увеличение – 1000000 крат. Он оснащён детекторами вторичных электронов и электронов обратного рассеяния.



Рисунок 22 – Сканирующий электронный микроскоп JSM-7500FA

Построение кривых уплотнения

Из двух существующих методик построения кривых уплотнения использовали ту, в которой определяется плотность компактов, спрессованных при различных давлениях.

Вторая методика [10] заключается в последовательной нагрузке и разгрузке порошкового тела (рисунок 23).

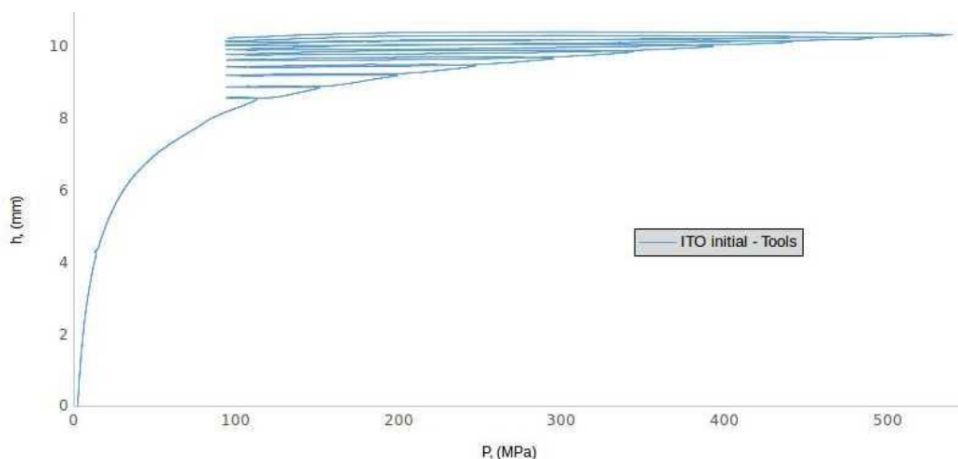


Рисунок 23 – Зависимость высоты прессовки от давления прессования

В случае КИП такой подход нельзя применить, так как оболочку можно считать абсолютно упругим телом, то есть при каждом цикле разгрузки датчик будет показывать одинаковое значение обратного перемещения. Для определения плотности компакта в процессе КИП возможно регистрировать значения перемещения, полученные с датчиков пресса, но только при

использовании абсолютно беспористой оболочки и жёсткой пресс-формы с минимальными зазорами, чтобы перемещение пуансона осуществлялось только за счёт изменения объёма внутренней полости эластичной оболочки.

Используемая в исследовании прессовая оснастка не соответствует описанным выше требованиям. По этим причинам определение плотности изготовленных образцов проводили измерением их веса и объёма.

Определение плотности образцов

Плотность цилиндрических образцов была определена по формуле 1; образцов в форме усечённого конуса – по формуле 2.

$$\rho = \frac{m}{\left(\pi \times \left(\frac{D}{2}\right)^2 \cdot h\right)} \quad (1)$$

$$\rho = \frac{m}{\left(\left(\frac{D_1}{2}\right)^2 + \left(\frac{D_1}{2}\right) \times \left(\frac{D_2}{2}\right) + \left(\frac{D_2}{2}\right)^2\right) \times \frac{\pi \cdot h}{3}} \quad (2)$$

где m – масса образца, D – диаметр цилиндрического образца, D_1 – диаметр верхней части образца в форме усечённого конуса, D_2 – диаметр нижней части образца в форме усечённого конуса, h – высота образца.

Диаметр, длину и ширину определяли с помощью электронного штангенциркуля Electronic Digital Caliper 6 с точностью до 0,01 мм; толщину – с помощью электронного толщинометра Mitutoyo Absolute Digimatic Quick с точностью до 0,001 мм; массу определяли взвешиванием на электронных весах с точностью до 0,001 г.

Плотность образцов сложной геометрической формы определяли гидростатическим взвешиванием (ГОСТ 24409-80.) [102] (формула 3).

$$\rho = \frac{m_{\text{воздух}}}{m_{\text{насыщ}} - m_{\text{воде}}} \times \rho_{\text{воды}} \quad (3)$$

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 работы. 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 магистерской диссертации является разработка технологии получения изделий сложной формы методом квазиизостатического прессования керамических порошков с применением аддитивных технологий.

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

4.1.1. Анализ конкурентных технических решений

В ходе исследования была рассмотрена разработка технологии получения изделий сложной формы методом квазиизостатического прессования керамических порошков с применением аддитивных технологий.

Детальный анализ необходим, т.к. данная технология имеет свои достоинства и недостатки. В таблице 15 показано сравнение разработок-конкурентов и разработки данного НИ с точки зрения технических и экономических критериев оценки эффективности.

В ходе исследования были рассмотрены две конкурирующие работы о технологиях изготовления различных изделий:

1) Технология изготовления изделий из нано- и субмикрористаллических металлов и сплавов. (Рассмотрена технология изготовления изделий из нано- и субмикрористаллических металлов и сплавов. Проведен анализ методов получения заготовок с объемной нано- и субмикрористаллической структурой. Указаны возможные области применения материалов с новыми свойствами.);

2) Технология изготовления и физико-химические свойства керамики на основе нанокристаллического порошка композита диоксида циркония. (Представлены результаты разработки технологии получения высокочистого нанокристаллического порошка композита на основе ZrO_2 в системе $ZrO_2 - Y_2O_3 - CeO_2 - Al_2O_3$ и нового керамического материала на его основе.).

Таблица 15 – Сравнение конкурентных технических решений(разработок)

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		Б _ф	Б _{к1}	Б _{к2}	К _ф	К _{к1}	К _{к2}
1	2	3	4	5	6	7	8
Технические критерии оценки ресурсоэффективности							
1. Актуальность исследования	0,1	5	3	4	0,5	0,3	0,4
2. Биосовместимость	0,17	5	3	3	0,85	0,51	0,51
3. Трещиностойкость	0,12	5	2	3	0,6	0,24	0,36
4. Ударопрочность	0,15	4	3	3	0,6	0,45	0,45
5. Период приживаемости	0,14	4	4	3	0,56	0,56	0,42
6. Простота изготовления	0,04	5	3	4	0,2	0,12	0,16
7. Эффективность работы	0,04	5	5	5	0,2	0,2	0,2
Экономические критерии оценки эффективности							
1. Цена сырья	0,12	4	5	3	0,48	0,6	0,36
2. Предполагаемый срок эксплуатации	0,05	4	3	4	0,2	0,15	0,2
3. Финансирование научной разработки конкурентных товаров и разработок	0,07	5	4	4	0,35	0,28	0,28
Итого	1	46	35	36	4,54	3,41	3,34

Расчет конкурентоспособности, на примере стабильности срабатывания, определяется по формуле 5:

$$K = \sum B_i * B_i = 4,54 \quad (5)$$

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

Проведенный анализ конкурентных технических решений показал, что исследование является наиболее актуальным и перспективным, имеет конкурентоспособность.

4.1.2. SWOT-анализ

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

Первый этап, составляется матрица SWOT, в которую описаны слабые и сильные стороны проекта и выявленные возможности и угрозы для реализации проекта, которые проявились или могут появиться в его внешней среде, приведены в таблице 16.

Таблица 16 – Матрица SWOT-анализа

Сильные стороны	Слабые стороны
С1. Простота изготовления изделия.	Сл1. Отсутствие ссылок и материалов для соответствующих научных исследований.
С2. Высокая трещиностойкость и ударопрочность продукции.	Сл2. Долгое время подготовки образца, используемого при проведении научного исследования.
С3. Высокая плотность изделий.	Сл3. Высокие требования к экспериментальному и исследовательскому оборудованию.
С4. Малый объем затрат порошка для производства.	Сл4. Эксперименты имеют погрешности и неопределенности.
С5. Квалифицированный персонал.	Сл5. Вероятность получения брака.
Возможности	Угрозы
В1. Использование оборудования ИНШПТ ТПУ и ИФПМ СО РАН.	У1. Снижение стоимости разработок конкурентов.
В2. Появление потенциального спроса на новые разработки.	У2. Появление зарубежных аналогов и более ранний их выход на рынок.
В3. Внедрение технологии в области медицины.	
В4. Внедрение на мировой рынок, экспорт за рубеж.	

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 17 – 20.

Таблица 17 – Интерактивная матрица проекта «Возможности проекта и сильные стороны»

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

Таблица 18 – Интерактивная матрица проекта «Возможности проекта и слабые стороны»

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

Таблица 19 – Интерактивная матрица проекта «Угрозы проекта и сильные стороны»

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

Таблица 20 – 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 21.

Таблица 21 – Итоговая таблица SWOT-анализа

	<p>Сильные стороны научно-исследовательского проекта</p> <p>С1. Простота изготовления изделия.</p> <p>С2. Высокая трещиностойкость и ударопрочность продукции.</p> <p>С3. Высокая плотность продукции.</p> <p>С4. Малый объем затрат порошка для производства.</p> <p>С5. Квалифицированный персонал.</p>	<p>Слабые стороны научно-исследовательского проекта</p> <p>Сл1. Отсутствие ссылок и материалов для соответствующих научных исследований.</p> <p>Сл2. Долгое время подготовки образца, используемого при проведении научного исследования.</p> <p>Сл3. Высокие требования к экспериментальному и исследовательскому оборудованию.</p> <p>Сл4. Эксперименты имеют погрешности и неопределенности.</p> <p>Сл5. Вероятность получения брака.</p>
<p>Возможности</p> <p>В1. Использование оборудования ИШНПТ ТПУ и ИФПМ СО РАН.</p> <p>В2. Появление потенциального спроса на новые разработки.</p>	<p>Направления развития</p> <p>В1С1С2С3С4С5. Оборудование ИШНПТ ТПУ и ИФПМ СО РАН позволяют изготавливать изделия по данной технологии.</p> <p>В2С1С2С3С4С5. Высокая трещиностойкость, ударопрочность и плотность продукции позволяет расширить спрос, использование новейшей информации и технологий</p>	<p>Сдерживающие факторы</p> <p>В1Сл2Сл3Сл4Сл5. Никакие возможности оборудования не убергут на 100% продукцию от погрешностей и неточностей.</p> <p>В2Сл1Сл3Сл4. Появлению спроса может помешать недостаточность литературных данных, высокие требования к</p>

<p>В3. Внедрение технологии в области медицины.</p> <p>В4. Внедрение на мировой рынок, экспорт за рубеж.</p>	<p>соответствует потенциальному спросу на новые разработки.</p> <p>В3С1С2С3С4С5. Высокая трещиностойкость, ударопрочность и плотность продукции являются хорошим основанием для внедрения технологии в области медицины.</p> <p>В4С1С2С3С4С5. Простота изготовления, использование малого объема сырья, высокая трещиностойкость, ударопрочность и плотность продукции являются основой для экспорта за рубеж и выхода на мировой рынок.</p>	<p>оборудованию и погрешности в результате.</p> <p>В3Сл2Сл3Сл4. В медицине часто нужно быстрое и точное решение. Погрешности здесь неприемлемы.</p> <p>В4Сл3Сл4. Внедрение на мировой рынок требует точности экспериментов. Чем меньше погрешности, тем лучше.</p>
<p>Угрозы</p> <p>У1. Снижение стоимости разработок конкурентов.</p> <p>У2. Появление зарубежных аналогов и более ранний их выход на рынок.</p>	<p>Угрозы развития</p> <p>У2С1С2С3С4. Наши продукты обладают лучшими механическими свойствами, являются более привлекательными в мировом рынке.</p>	<p>Уязвимости:</p> <p>У2Сл1Сл2Сл3. Недостаточность литературных данных, долгая реализация цикла производства вместе с исследованиями могут дать выиграть время конкурентам.</p>

Говоря о таком продукте, как керамический имплантат, потребитель не задумывается о тонкостях его производства. Потребителю важен результат: надежность и долговечность. Исследователи же смотрят иначе. Любой разбирающийся человек оценит простоту изготовления изделия, легкость в изменении его формы, а также малые затраты порошка для производства одного изделия и безотходность сырья.

При внедрении на рынок нового продукта, тем более качественного, всегда есть угроза конкуренции. Для того, чтобы чувствовать себя защищенным от подобных угроз в максимально короткий срок, необходимо поддерживать высокие характеристики продукта и создавать хорошую рекламу, чтобы знакомить потребителей с продуктом, рассказывая о всех качествах имплантов.

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 22.

Таблица 22 – Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№ раб	Содержание работ	Должность исполнителя
Разработка технического задания	1	Составление и утверждение технического задания, утверждение плана-графика	Научный руководитель
	2	Составление и утверждение плана магистерской диссертации	Инженер, научный руководитель
Выбор способа решения поставленной задачи	3	Обзор научной литературы	Инженер
	4	Выбор методов исследования	Инженер
	5	Планирование эксперимента	Инженер, научный руководитель

Теоретические и экспериментальные исследования	6	Разработка и изготовление эластичных оболочек для получения изделий простой геометрии	Инженер
	7	Прессование порошка при различном давлении в оболочках для получения изделий различной формы, спекание компактов в различных температурных режимах	Инженер
	8	Измерение геометрических характеристик компактов и керамики	Инженер
	9	Анализ полученных данных, разработка и изготовление оболочек, учитывающих искривление формообразующей поверхности внутренней полости оболочки при КИП	Инженер
	10	Получение компактов заданной формы, оценка результатов компенсации искривления формообразующей поверхности внутренней полости оболочки	Инженер
	11	Изготовление оболочек для изделий сложной геометрии, получение изделий	Инженер
Обобщение и оценка результатов	12	Обработка полученных данных	Инженер
	13	Оценка правильности полученных результатов	Инженер, Научный руководитель
Оформление отчета по НИР	14	Составление пояснительной записки.	Инженер

4.2.2. Определение трудоемкости выполнения работ и разработка графика проведения

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

Для определения ожидаемого (среднего) значения трудоемкости использована следующая формула (6):

$$t_{\text{ож}i} = \frac{3t_{\text{мин}i} + 2t_{\text{макс}i}}{5}, \quad (6)$$

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

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

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

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

$$T_{pi} = \frac{t_{\text{ож}i}}{Ч_i}, \quad (7)$$

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

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

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

Для перевода длительности каждого этапа из рабочих в календарные дни, необходимо воспользоваться формулой 8:

$$T_{\text{к.инж}} = T_{pi} \cdot k_{\text{кал}}, \quad (8)$$

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

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

$k_{кал}$ – календарный коэффициент.

Календарный коэффициент определяется по формуле 9:

$$k_{кал.инж} = \frac{T_{кал}}{T_{кал} - T_{вых} - T_{пр}} = \frac{365}{365 - 104 - 14} = 1,48 \quad (9)$$

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

Расчеты временных показателей проведения научного исследования обобщены в таблице 23.

Таблица 23 – 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		$t_{ож\ i}$, чел-дни			
	Исп.1	Исп.2	Исп.1	Исп.2	Исп.1	Исп.2		
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1. Составление и утверждение технического задания, утверждение плана-графика		1		3		1,8	1,8	3
2. Составление и утверждение плана магистерской диссертации	3	3	6	7	4,2	4,6	4,4	7
3. Обзор научной литературы	7		10		8,2		8,2	12
4. Выбор методов исследования	1		3		1,8		1,8	3

5. Планирование эксперимента	2	2	4	4	2,8	2,8	2,8	4
6. Разработка и изготовление эластичных оболочек для получения изделий простой геометрии	7		9		7,8		7,8	11
7. Прессование порошка при различном давлении в оболочках для получения изделий различной формы, спекание компактов в различных температурных режимах	8		10		8,8		8,8	13
8. Измерение геометрических характеристик компактов и керамики	5		7		5,8		5,8	9
9. Анализ полученных данных, разработка и изготовление оболочек, учитывающих искривление формообразующей поверхности внутренней полости оболочки при КИП	7		10		8,2		8,2	12

10. Получение компактов заданной формы, оценка результатов компенсации искривления формообразующей поверхности внутренней полости оболочки	6		8		6,8		6,8	10
11. Изготовление оболочек для изделий сложной геометрии, получение изделий	7		10		8,2		8,2	12
12. Обработка полученных данных	8		10		8,8		8,8	13
13. Оценка правильности полученных результатов	4	2	6	3	4,8	2,4	3,6	5
14. Составление пояснительной записки	9		12		10,2		10,2	15
Итого:	74	8	105	17	86,4	11,6	87,2	129

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

На основе таблицы составлен календарный план-график выполнения проекта с использованием диаграммы Ганта (таблица 24).

Таблица 24 – Диаграмма Ганта

№	Вид работ	Исп	T_{ki} , 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,	Исп2	3	☑													

Таблица 24 – Диаграмма Ганта

№	Вид работ	Исп	T_{ki} , кал. дн.	Продолжительность работ													
				февр			Март			апр			Май				
				1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3		
	утверждение плана-графика																
2	Составление и утверждение плана магистерской диссертации	Исп1 Исп2	7														
3	Обзор научной литературы	Исп1	12														
4	Выбор методов исследования	Исп1	3														
5	Планирование эксперимента	Исп1 Исп2	4														
6	Разработка и изготовление эластичных оболочек для получения изделий простой геометрии	Исп1	11														
7	Прессование порошка при различном давлении в оболочках для получения изделий различной формы, спекание компактов в различных температурных режимах	Исп1	13														
8	Измерение геометрических характеристик компактов и керамики	Исп1	9														
9	Анализ полученных данных, разработка и изготовление оболочек,	Исп1	12														

Таблица 24 – Диаграмма Ганта

№	Вид работ	Исп	T_{ki} кал. дн.	Продолжительность работ												
				февр			Март			апр			Май			
				1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
	учитывающих искривление формообразующей поверхности внутренней полости оболочки при КИП															
10	Получение компактов заданной формы, оценка результатов компенсации искривления формообразующей поверхности внутренней полости оболочки	Исп1	10													
11	Изготовление оболочек для изделий сложной геометрии, получение изделий	Исп1	12													
12	Обработка полученных данных	Исп1	13													
13	Оценка правильности полученных результатов	Исп1 Исп2	5													
14	Составление пояснительной записки	Исп1	15													

Примечание:



– Исп. 1 (инженер),



– Исп. 2 (научный руководитель)

4.3. Бюджет научно-технического исследования

При планировании бюджета научно-технического исследования учитывались все виды расходов, связанных с его выполнением. В состав затрат на создание

проекта включается величина всех расходов, необходимых для реализации комплекса работ, составляющих содержание данной разработки. Расчет сметной стоимости ее выполнения производится по следующим статьям затрат:

- 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

К данной статье расходов относится стоимость материалов, покупных изделий, полуфабрикатов и других материальных ценностей, расходуемых непосредственно в процессе выполнения работ над объектом проектирования. Сюда же относятся специально приобретенное оборудование, инструменты и прочие объекты, относимые к основным средствам, стоимостью до 40 000 руб. включительно. Цена материальных ресурсов определяется по соответствующим ценникам или договорам поставки. Кроме того статья включает так называемые транспортно-заготовительные расходы, связанные с транспортировкой от поставщика к потребителю, хранением и прочими процессами, обеспечивающими движение (доставку) материальных ресурсов от поставщиков к потребителю. Сюда же включаются расходы на совершение сделки купли-продажи (т.н. транзакции). Приблизительно они оцениваются в процентах к отпускной цене закупаемых материалов, как правило, это 5 - 20 %. Исполнитель работы самостоятельно выбирает их величину в указанных границах. Результаты расчета затрат представлены в таблице 25.

Таблица 25 – Затраты на получение образца, нанесенного с покрытием Zr-Y-O

Наименование статей	Единица измерения	Количество	Цена за ед., руб.	Итого затраты, руб.
Нанопорошок стабилизированного иттрием диоксида циркония 3YSB-E (TOSOH, Япония)	Кг	0,5	9750	4875
Нанопорошок стабилизированного иттрием диоксида циркония 3Y-25A-B (Treibacher Industrie AG, Австрия).	Кг	0,5	10000	5000
Полиуретан «Силагерм 6030»	Л	2	3200	6400
Перчатки резиновые, технические	Пар	20	12	240
Комплекс канцелярских принадлежностей	Штук	2	500	1000
Итого:				17515

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 10:

$$H_A = \frac{1}{n}, \quad (10)$$

где n – срок полезного использования в количестве лет.

Амортизация оборудования рассчитывается по формуле 11:

$$A = \frac{H_A I}{12} \cdot m, \quad (11)$$

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

Таблица 26 – Затраты на оборудование

№ п/п	Наименование Оборудования	Кол-во ед.	Срок полезного использования,	Время использования, мес.	N_A , %	Цена оборудования, руб.	Амортизация	
1	2	3	4	5	6	7	8	
1	Гидравлический пресс IP-500M авто	1	15	0,89	7	250000	1298	
2	Печь муфельная ЛНТ 08/18/Р310 высокотемпературная	1	20	0,33	5	50000	573	
3	Просвечивающий электронный микроскоп (ПЭМ) JEM-2100F	1	20	0,33	5	18000000	24750	
4	РФА- установка ДРОН-3М	1	20	0,33	5	18000000	24750	
5	Моноблок DELL Optiplex 7480, 23.8"	1	10	1	10	145000	1208	
6	3д принтер ZENIT 3d	1	8	0,17	12,5	80000	142	
7	ПЭВМ	1	6	20	16,7	40000	11133	
Итого:							63854 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 12:

$$Z_{осн} = Z_{дн} \cdot T_p, \quad (12)$$

где $Z_{\text{дн}}$ – среднедневная заработная плата, руб.; T_p – продолжительность работ, выполняемых работником, раб.дн.

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

Для шестидневной рабочей недели (рабочая неделя руководителя):

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_m \cdot M}{F_{\text{д}}} = \frac{38050 \cdot 10,3}{246} = 1593,2 \text{ руб.}, \quad (4.8)$$

где Z_m – 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):

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_m \cdot M}{F_{\text{д}}} = \frac{21611 \cdot 11,2}{213} = 1136,4 \text{ руб.} \quad (13)$$

Должностной оклад работника за месяц:

– для руководителя:

$$Z_m = Z_{\text{мс}} \cdot (1 + k_{\text{пр}} + k_{\text{д}}) k_p = 19513 \cdot (1 + 0,3 + 0,2) \cdot 1,3 = 38050 \text{ руб.} \quad (14)$$

– для инженера:

$$Z_m = Z_{\text{мс}} \cdot (1 + k_{\text{пр}} + k_{\text{д}}) k_p = 11083 \cdot (1 + 0,3 + 0,2) \cdot 1,3 = 21611 \text{ руб.}, \quad (15)$$

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

Таблица 27 – 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 - отпуск - невыходы по болезни	48/5	24/10
Действительный годовой фонд рабочего времени	246	213

Таблица 28 – Расчет основной заработной платы исполнителей

Исполнители НИ	$Z_{мс}, руб$	$k_{пр}$	k_o	k_p	$Z_m, руб$	$Z_{он}, руб$	$T_p, раб.дн.$	$Z_{осн}, руб$
Руководитель	19513	0,3	0,2	1,3	38050	1593,2	11,6	18481,1
Инженер	11083	0,3	0,2	1,3	21611	1136,4	113,6	129095
Итого:								147576,1

4.3.4. Дополнительная заработная плата исполнителей темы

Дополнительная заработная плата определяется по формуле:

– для руководителя:

$$Z_{доп} = k_{доп} \cdot Z_{осн} = 0,15 \cdot 18481,1 = 2772,2 \text{ руб.} \quad (16)$$

– для инженера:

$$Z_{доп} = k_{доп} \cdot Z_{осн} = 0,15 \cdot 129095 = 19364,3 \text{ руб.}, \quad (17)$$

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

4.3.5. Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)

Отчисления во внебюджетные фонды определяется по формулам 18, 19:

– для руководителя:

$$Z_{внеб} = k_{внеб} (Z_{осн} + Z_{доп}) = 0,3 \cdot (18481,1 + 2772,2) = 6376 \text{ руб.} \quad (18)$$

– для инженера:

$$Z_{внеб} = k_{внеб} (Z_{осн} + Z_{доп}) = 0,3 \cdot (129095 + 19364,3) = 44537,8 \text{ руб.}, \quad (19)$$

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

4.3.6. Накладные расходы

Накладные расходы учитывают прочие затраты организации, не попавшие в предыдущие статьи расходов: печать и ксерокопирование материалов исследования, оплата услуг связи, электроэнергии, почтовые и телеграфные расходы, размножение материалов и т.д.

Величина накладных расходов определяется по формуле 20:

$$Z_{накл} = (\text{сумма статей } 1 \div 5) \cdot k_{np}, \quad (20)$$

где k_{np} – коэффициент, учитывающий накладные расходы. Величина коэффициента принимается равной 0,16.

4.3.7. Бюджетная стоимость НИР

Таблица 29 – Группировка затрат по статьям

Статьи							
1	2	3	4	5	6	7	8
Амортизация	Сырье, материалы	Основная заработная плата	Дополнительная заработная плата	Отчисления на социальные нужды	Итого без накладных расходов	Накладные расходы	Стоимость бюджета
63854	17515	147576,1	22136,5	50913,8	301995,4	48319,26	350314,66

На основании полученных данных по отдельным статьям затрат составляется бюджет НИ «Развитие метода квазиизостатического прессования керамических порошков в изделие сложной формы применением аддитивных технологий» по форме, приведенной в таблице 30. В таблице также представлено определение бюджета затрат двух конкурирующих научно-исследовательских проектов.

Таблица 30 – Группировка затрат по статьям

№	Наименование статьи	Сумма, руб.			Примечание
		Текущий Проект	Исп.2	Исп.3	
1	Материальные затраты НИР	17515	18325	15945	Пункт 4.2.3.1

2	Затраты на специальное оборудование	63854	65959,8	43453	Пункт 4.2.3.2
3	Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	147576,1	147576,1	147576,1	Пункт 4.2.3.3
4	Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы	22136,5	22136,5	22136,5	Пункт 4.2.3.3
5	Отчисления во внебюджетные фонды	50913,8	50913,8	50913,8	Пункт 4.2.3.4
6	Накладные расходы	48319,26	46377,98	46377,98	Пункт 4.2.3.5
Бюджет затрат НИР		350314,66	351289,18	326402,38	Сумма ст. 1- 6

Где: Исп.2 – Аналог 1; Исп.3- Аналог 2

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.

4.4.1. Интегральный показатель финансовой эффективности

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

В качестве аналогов данной НИР рассмотрены:

- 1) Титановые имплантаты от швейцарского производителя «Nobel Biocare»;
- 2) Имплантаты из титанового сплава с покрытием из оксида алюминия и титанового порошка от немецкого производителя «. Конмет».

Интегральный финансовый показатель разработки рассчитывается как:

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

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

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

Φ_{max} – максимальная стоимость исполнения.

$\Phi_{\text{текущ.проект}} = 350314,66$ руб, $\Phi_{\text{исп.1}} = 351289,18$ руб, $\Phi_{\text{исп.2}} = 326402,38$ руб.

$$I_{\text{финр}}^{\text{тек.пр.}} = \frac{\Phi_{\text{тек.пр.}}}{\Phi_{\text{max}}} = \frac{350314,66}{351289,18} = 0,99;$$

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп.2}} = \frac{\Phi_{\text{исп.2}}}{\Phi_{\text{max}}} = \frac{326402,38}{351289,18} = 0,93;$$

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп.3}} = \frac{\Phi_{\text{исп.3}}}{\Phi_{\text{max}}} = \frac{351289,18}{351289,18} = 1;$$

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

4.4.2. Интегральный показатель ресурсоэффективности

Интегральный показатель ресурсоэффективности вариантов выполнения НИР (I_{pi}) определен путем сравнительной оценки их характеристик, распределенных с учетом весового коэффициента каждого параметра (таблица 31).

Таблица 31 – Сравнительная оценка характеристик вариантов НИР

Объект исследования Критерии	Весовой коэффициент параметра	Текущий проект	Исп.2	Исп.3
1. Быстрое производство	0,18	5	4	5
2. Энергоэкономичность	0,32	4	4	3

3. Удобство при эксплуатации	0,12	5	3	3
4. Безопасность при производстве	0,08	5	4	5
5. Затраты сырья	0,12	5	4	2
6. Экологичность производства	0,18	4	4	3
ИТОГО	1	4,5	3,88	3,4

Расчет интегрального показателя для разрабатываемого проекта:

$$I_{p1} = 0,18*5 + 0,32*4 + 0,12*5 + 0,08*5 + 0,12*5 + 0,18*4 = 4,5$$

$$I_{p2} = 0,18*4 + 0,32*4 + 0,12*3 + 0,08*4 + 0,12*4 + 0,18*4 = 3,88$$

$$I_{p3} = 0,18*3 + 0,32*3 + 0,12*3 + 0,08*5 + 0,12*2 + 0,18*3 = 3,4$$

4.4.3. Интегральный показатель эффективности вариантов исполнения разработки

Вычисляется на основании показателя ресурсоэффективности и интегрального финансового показателя по формуле 22:

$$I_{исп.i} = \frac{I_{p-исп.i}}{I_{финр}} \quad (22)$$

$$I_{исп.1} = \frac{4,5}{0,99} = 4,55, \quad I_{исп.2} = \frac{3,88}{1} = 3,88, \quad I_{исп.3} = \frac{3,4}{0,96} = 3,54.$$

Далее интегральные показатели эффективности каждого варианта НИР сравнивались с интегральными показателями эффективности других вариантов с целью определения сравнительной эффективности проекта (таблица 32).

Таблица 32 – Сравнительная эффективность разработки

№ п/п	Показатели	Текущий проект	Исп.2	Исп.3
1	Интегральный финансовый показатель разработки	0,99	1	0,93
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	4,5	3,88	3,4
3	Интегральный показатель эффективности	4,55	3,88	3,54

4	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	1	0,85	0,78
---	--	---	------	------

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 171 день; общее количество рабочих дней, в течение которых работал инженер, составляет 113 дней; общее количество дней, в течение которых работал руководитель, составляет 12 дней;

3. Для оценки затрат на реализацию проекта разработан проектный бюджет, который составляет 350314,66 руб;

4. Результат оценки эффективности ИР показывает следующие выводы:

1) значение интегрального финансового показателя ИР составляет 0,99, что является показателем того, что ИР является финансово выгодной по сравнению с аналогами;

2) значение интегрального показателя ресурсоэффективности ИР составляет 4,5, по сравнению с 3,88 и 3,4;

3) значение интегрального показателя эффективности ИР составляет 4,55, по сравнению с 3,88 и 3,54, и является наиболее высоким, что означает, что

техническое решение, рассматриваемое в ИР, является наиболее эффективным вариантом исполнения.

5. СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ

5.1. Введение

Научно-исследовательская работа была выполнена в Научно-образовательном инновационном центре «Наноматериалы и нанотехнологии», ТПУ. Рабочее место, где была выполнена основная работа, находится в 018 аудитории 10 корпуса ТПУ по адресу проспект Ленина, 2.

Данная диссертация посвящена получению керамики из порошков на основе диоксида циркония методом квазиизостатического прессования. Метод заключается в загрузке порошка в эластичную оболочку, которая помещается в жесткую пресс-форму. Пресс-форма помещается под пресс, уплотнение порошка происходит за счет сжатия эластичной оболочки, передающей давление от пуансона порошковому телу. Эластичная оболочка, подобно жидкости, равномерно распределяет давление и сжимает порошок с одинаковой силой со всех сторон, что обеспечивает равномерное распределение плотности по объему компакта. После окончания прессования компакт извлекается из оболочки и спекается в печи в воздушной атмосфере при температуре от 1400 до 1500°С.

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 получения керамических изделий методом квазиизостатического прессования.

5.2. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

Специальные правовые нормы трудового законодательства. Все работники и руководитель в соответствии с Постановлением Минтруда РФ и Минобразования РФ от 13 января 2003 г. N 1/29 [85] обязаны проходить

обучение по охране труда и проверку знания требований охраны труда для обеспечения профилактических мер по сокращению производственного травматизма и профессиональных заболеваний.

Исследование подразумевает взаимодействие с химически опасными веществами, такие условия труда относятся к вредным условиям. Регулирование рабочих процессов, выплат и предоставления дополнительных льгот работникам, занятым на вредных производствах, осуществляется статьями 219, 92, 117, 147 ТК РФ [86]. В частности, в соответствии с требованиями, изложенными в ст.147 ТК РФ, в 2017 году сотрудники обладают правом на получение доплат за труд во вредных условиях.

Кроме денежных выплат, специалисты, выполняющие трудовые функции под воздействием вредных факторов, вправе требовать:

- сокращения рабочей недели до 36 часов;
- предоставления ежегодного дополнительного отпуска на срок от 7 дней.

Компоновка рабочего места. Характер основной работы при выполнении ВКР предполагал оборудование рабочего места для проведения работ стоя. В ГОСТ 12.2.033-78 [87] 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;
- организация рабочего места и конструкция оборудования должны обеспечивать прямое и свободное положение корпуса тела работающего или его наклон вперед не более чем на 15°.

Согласно СН 181-70 [88] стены рабочего помещения должны быть покрашены в светлые теплые цвета, а пол в темный цвет. Оборудование должно быть покрашено не более чем тремя различными цветами.

5.3. 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 [89].

Перечень опасных и вредных факторов, характерных для проектируемой производственной среды, представлен в таблице 33.

Таблица 33. Возможные опасные и вредные факторы

Факторы (ГОСТ 12.0.003-2015)	Этапы работ			Нормативные документы
	Разраб отка	Изгото вление	Эксплу атация	
1. Повышенная или пониженная температура воздуха рабочей зоны.	+	+	-	СанПиН 2.2.4.548-96. 2.2.4 [90]
2. Отсутствие или недостаток естественного света	+	+	-	СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03 [91]
3. Химически вредные вещества в воздухе рабочей зоны.	-	+	-	ГОСТ 12.1.007-76 [92]
4. Механические опасности	-	+	-	ГОСТ ISO 12100-2013 [95]
5. Термические опасности	-	+	-	
6. Электробезопасность	+	+	-	ГОСТ Р 12.1.019-2009 [97] ГОСТ 12.2.007.0-75 [98]
7. Пожаробезопасность	+	+	-	Приложение №3 к приказу ректора ТПУ №52/од от 21.06.2013

5.4. Анализ вредных производственных факторов

Повышенная или пониженная температура воздуха рабочей зоны.

Микроклимат характеризуется тремя основными параметрами: температурой воздуха, влажностью и скоростью движения воздушных масс. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений установлены в санитарных правилах и нормах СанПиН 2.2.4.548-96 [90].

Согласно СанПиН 2.2.4.548-96 [90] работа при проведении исследований относится к категории Па, так как иногда приходится переносить предметы

массой свыше 10 кг. Из этого следует, что в холодный период года оптимальные значения показателей микроклимата должны соответствовать следующим значениям: температура воздуха 19-21°C, относительная влажность воздуха 60-40% и скорость движения воздуха 0,2 м/с. Для теплого периода года данные показатели составляют: температура воздуха 20-22 °С, относительная влажность воздуха 60-40% и скорость движения воздуха 0,2 м/с.

Превышение допустимой температуры воздуха рабочей зоны может быть вызвана неисправностью кондиционеров или долгой работой установки для электроимпульсного спекания на высокой мощности, особенно высокая вероятность отклонения показателей микроклимата присутствует в жаркие дни.

Недостаточная освещенность.

Лаборатория расположена на цокольном этаже, поэтому необходимая освещенность достигается за счет искусственного освещения люминесцентными лампами.

Плохие условия освещенности приводят к снижению зрительной работоспособности, усталости центральной нервной системы, возникающей в результате прилагаемых усилий для опознания недостаточно четких или сомнительных сигналов, мышечной усталостью из-за неудобного положения, принимаемого в попытке разглядеть тот или иной объект.

По нормам освещения и отраслевым нормам освещения в помещении при работе с ПК рекомендуется освещенность 300 - 500 лк, коэффициент пульсации 15-20%. При недостаточной освещенности рабочего места необходимо увеличить число осветительных приборов либо использовать более яркие лампы.

Отсутствие или недостаток естественного освещения.

Недостаток естественного света вызван расположением лаборатории на цокольном этаже. Отсутствие или недостаток естественного света приводит к дефициту ультрафиолетового облучения, следствием чего является нарушение обмена веществ и снижение резистентности организма [91].

При комбинированном освещении для офисных помещений в СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03 [91] установлено значение КЕО равное 0,6.

Химически вредные вещества в воздухе рабочей зоны.

Химически опасным производственным фактором является микродисперсный порошок ZrO_2 , стабилизированный оксидом иттрия. 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 того, микродисперсные порошки способны оказывать раздражающий эффект на органы дыхания.

Диоксид циркония относится к веществам 4-го класса опасности ГОСТ 12.1.007-76 [92]. Его предельно допустимая концентрация (ПДК) в воздухе рабочей зоны производственных помещений 6 мг/м³.

Для обеспечения безопасности персонала на производствах по получению ультрадисперсных порошков и пудр, а также в местах исследования таких порошков, для создания чистого помещения осуществляется технический контроль, очистка воздуха и воды, а персонал пользуется средствами индивидуальной защиты (респираторы, халаты, перчатки) согласно ГОСТ 12.4.132-83 [93], ГОСТ 12.4.299-2015 [94].

Для изготовления эластичных оболочек в работе использовали полиуретан, получаемый смешиванием двух жидких компонентов (основы и отвердителя), которые затвердевают после полимеризации. Испарения компонентов не несут серьезной опасности для человека, однако при попадании на кожу способны вызвать раздражение, поэтому при работе с ними следует пользоваться перчатками и халатом для защиты открытых участков кожи согласно [94].

5.5. Анализ опасных производственных факторов

Механические опасности.

Основным источником механической опасности в рабочей зоне является гидравлический пресс IP-500M авто. Подвижные части пресса и осколки сломавшейся под давлением прессовой оснастки способны нанести серьезный урон здоровью человека.

Согласно ГОСТ ISO 12100-2013 [95] машины и механизмы имеющие подвижные части, способные нанести вред здоровью человека, должны быть оснащены защитными или предохранительными устройствами. В нашем случае пресс оснащен подвижным защитным кожухом, но данная защитная мера ограничивает видимость процесса прессования. В случае, когда наблюдение за процессом прессования необходимо, должны использоваться индивидуальные средства защиты лица и глаз, соответствующие требованиям ГОСТ 12.4.253-2013 [96].

Безопасные расстояния для предохранения верхних конечностей от попадания в опасную зону указаны в ГОСТ ISO 12100-2013 [96]. Для используемого в работе пресса, в данном нормативном акте установлено расстояние равное 1,4 м при высоте защитного ограждения 1м.

Термические опасности.

Основным источником термической опасности при выполнении работы была муфельная печь ЛНТ 08/18/P310. Данная печь способна нагреваться до температуры 3000 °С. Спекание керамики проводилось при температуре до 1500 °С, при соприкосновении с поверхностью, нагретой до такой температуры, можно получить термические ожоги, степень которых будет зависеть от времени взаимодействия с горячей поверхностью и площади контакта.

Для предотвращения ожогов к печи не притрагиваются с момента начала спекания до остывания образцов и футеровки печи до комнатной температуры. В случае если все же образец нужно достать из печи до его остывания до комнатной температуры, пользуются специальными щипцами и термостойкими рукавицами.

Электробезопасность.

В ходе выполнения работы были использованы следующие электроприборы: гидравлический пресс, высокотемпературная муфельная печь, электронный микрометр, электронные весы, персональный компьютер, сканирующий электронный микроскоп, рентгенофазовый анализатор. Все эти приборы при неправильной эксплуатации или обслуживании несут опасность поражения электрическим током.

Наиболее вероятной причиной электротравм является прикосновение или приближение на недопустимое расстояние к токоведущим частям, находящимся под напряжением.

Действие электрического тока на организм человека имеет разносторонний характер. Ток, проходящий через тело человека способен оказывать электролитическое, термическое и биологическое действие [96].

Защитные меры на производстве для обеспечения электробезопасности указаны в ГОСТ Р 12.1.019-2009 [97].

Для защиты от поражения электрическим током при прикосновении к токоведущим частям согласно ГОСТ Р 12.1.019-2009 [97] электроприборы должны быть заземлены или занулены.

При работе с электроприборами должны соблюдаться «Правила техники безопасности при эксплуатации электроустановок потребителей», установленные ГОСТ 12.2.007.0-75 [98]. Все лица, приступающие к работе с электрооборудованием, должны проходить инструктаж на рабочем месте, к самостоятельной работе допускаются лица, прошедшие проверку на знание техники безопасности.

Пожаровзрывобезопасность.

Помещение лаборатории по степени пожароопасности относится к классу П-2, так как в нем присутствует выделение пыли и волокон во взвешенном состоянии.

Согласно приложению №3 к приказу ректора ТПУ №52/од от 21.06.2013 в целях обеспечения пожарной безопасности в лаборатории запрещено:

- курить;

- пользоваться неисправными электронагревательными приборами;
- использовать временную электропроводку, удлинители, переноски для питания приборов;
- перегружать электрическую сеть;
- скручивать, завязывать электрические провода;
- хранить пожароопасные материалы ЛЖВ;
- оставлять выключенным свет, компьютеры и другие электроприборы.

Особое внимание необходимо уделять технике безопасности при работе с печью. Перед спеканием образца из того или иного материала необходимо узнать его химический состав, температуру плавления или температуру возгорания, чтобы избежать расплавления или воспламенения образца. Это может привести к поломке печи и возникновению пожара.

При извлечении из печи еще не остывшего образца не стоит помещать его на легковоспламеняющийся материал или оставлять в непосредственной близости от легковоспламеняющихся реактивов.

Кроме того, каждый работник должен знать порядок эвакуации и расположение первичных средств пожаротушения.

5.6. Расчет искусственного освещения

Правильно спроектированное и рационально выполненное освещение производственных помещений оказывает положительное воздействие на работающих, способствует повышению эффективности и безопасности труда, снижает утомление и травматизм, сохраняет высокую работоспособность.

Основной задачей светотехнических расчётов для искусственного освещения является определение требуемой мощности электрической осветительной установки для создания заданной освещённости.

В расчётном задании решены следующие вопросы:

- выбор системы освещения;
- выбор источников света;
- выбор светильников и их размещение;

- выбор нормируемой освещённости;
- расчёт освещения методом светового потока.

5.6.1. Выбор системы освещения

Для производственных помещений всех назначений применяются системы общего и комбинированного освещения. Выбор между равномерным и локализованным освещением проводится с учётом особенностей производственного процесса и размещения технологического оборудования. Система комбинированного освещения применяется для производственных помещений, в которых выполняются точные зрительные работы. Применение одного местного освещения на рабочих местах не допускается.

В данном расчётном задании для помещения рассчитывается общее равномерное освещение.

5.6.2. Выбор источников света

Источники света, применяемые для искусственного освещения, делят на две группы: газоразрядные лампы и лампы накаливания.

Для общего освещения, как правило, применяются газоразрядные лампы как энергетически более экономичные и обладающие большим сроком службы. Наиболее распространёнными являются люминесцентные лампы. По спектральному составу видимого света различают лампы дневной (ЛД), холодно-белой (ЛХБ), тепло-белой (ЛТБ) и белой цветности (ЛБ). Наиболее широко применяются лампы типа ЛБ. При повышенных требованиях к передаче цветов освещением применяются лампы типа ЛХБ, ЛД. Лампа типа ЛТБ применяется для правильной цветопередачи человеческого лица. Характеристики люминесцентных ламп приведены в таблице 34.

Таблица 34. Основные характеристики люминесцентных ламп

Мощность, Вт	Напряжение сети, В	Световой поток, лм			
		ЛД	ЛХБ	ЛБ	ЛТБ
15	127	700	820	835	850

20	127	880	1020	1060	1060
30	220	1650	1940	2020	2020
40	220	2300	2700	2800	2850
65	220	3750	4400	4600	4600
80	220	4250	5000	5200	5200
125	220	-	8000	-	8150

Энергосберегающие лампы обладают такими достоинствами как небольшие габариты, возможность включения в электрическую сеть через обычный патрон, хорошая светопередача, высокая световая отдача, длительный срок службы. Характеристики некоторых компактных люминесцентных ламп приведены в таблице 35.

Таблица 35. Основные характеристики энергосберегающих ламп Navigator серии NCL

Тип лампы	Номинальная мощность, Вт	Световой поток, лм
NCL-2U-09-827-E27	9	560
NCL-2U-11-827-E27	11	700
NCL-2U-15-827-E27	15	1000
NCL-3U-20-827-E27	20	1300
NCL-4U-25-827-E27	25	1600
NCL-4U-30-827-E27	30	1800
NCL-4U-45-827-E27	45	2700
CL-4U-55-827-E27	55	3150
CL-6U-85-840-E40	85	4660
CL-6U-105-840-E40	105	5880

Для производственного освещения высоких помещений (6–10 м) рекомендуется использовать газоразрядные лампы высокого давления, например, лампы ДРЛ (дуговые ртутные люминесцентные) и др. Основные характеристики ламп ДРЛ, наиболее широко используемых для производственного освещения, приведены в таблице 36.

Таблица 36. Основные характеристики ламп ДРЛ

Тип лампы	Номинальная мощность, Вт	Световой поток
ДРЛ 125	125	6000
ДРЛ 250	250	13000
ДРЛ 400	400	23000
ДРЛ 700	700	39000
ДРЛ 1000	1000	55000

Использование ламп накаливания допускается при производстве грубых работ или осуществлении общего надзора за эксплуатацией оборудования, особенно если эти помещения не предназначены для пребывания людей, а также в случае невозможности или технико-экономической нецелесообразности применения газоразрядных ламп. Во взрыво- и пожароопасных помещениях, сырых, пыльных, с химически активной средой, там, где температура воздуха может быть менее +10 °С и напряжение в сети падает ниже 90 % от номинального, следует отдавать предпочтение лампам накаливания. Характеристики ламп накаливания приведены в таблице 37.

Таблица 37. Основные характеристики ламп накаливания

Тип лампы	Номинальная мощность, Вт	Световой поток, лм
B215-225-15-1	15	120
B215-225-25	25	220
B215-225-40-1	40	430
B215-225-60-1	60	730
B215-225-75-1	75	960
B215-225-100-1	100	1380
B215-225-150	150	2220
B215-225-200	200	3150
Г215-225-300-2	300	4850
Г215-225-500-1	500	8400
Г215-225-750	750	13100
Г215-225-1000-2	1000	18800

Светодиодные источники света обладают рядом преимуществ по сравнению с люминесцентными лампами и лампами накаливания: малое энергопотребление, высокая световая отдача (до 120 лм/Вт), большой срок службы (до 80 тыс. ч), безопасность, прочность, экологичность и др., благодаря которым они находят все большее применение для освещения общественных и производственных помещений. Основные характеристики светодиодных ламп E27 (аналогов ламп накаливания), предназначенных для установки в светильники общего назначения, приведены в таблице 38.

Таблица 38. Основные характеристики светодиодных ламп LED-A60 серии Standart

Тип лампы	Номинальная мощность, Вт	Световой поток, лм
LED-A60 5 Вт	5	400
LED-A60 7 Вт	7	600
LED-A60 11 Вт	11	900
LED-A60 15 Вт	15	1200

5.6.3. Выбор светильников и их размещение

При выборе типа светильников следует учитывать светотехнические требования, экономические показатели, условия среды.

Наиболее распространёнными типами светильников для люминесцентных ламп являются:

- Открытые двухламповые светильники типа ОД, ОДОР, ШОД, ОДО, ООД – для нормальных помещений с хорошим отражением потолка и стен, допускаются при умеренной влажности и запылённости.
- Светильник ПВХ – является пылевлагозащищённым, пригоден для некоторых пожароопасных помещений: мощность ламп 2×40Вт.
- Плафоны потолочные для общего освещения закрытых сухих помещений: Л71Б03 – мощность ламп 10×30Вт; Л71Б84 – мощность ламп 8×40Вт.

Основные характеристики светильников с люминесцентными лампами приведены в таблице 39.

Таблица 39. Основные характеристики некоторых светильников с люминесцентными лампами

Тип светильников	Кол-во и мощность лампы	Область применения	Размеры, мм			КПД, %
			Длина	Ширина	Высота	
ОД – 2-30	2×30	Освещение производственных помещений с нормальными условиями среды	933	204	156	75
ОД – 2-40	2×40		1230	266	158	75
ОД – 2-80	2×80		1531	266	198	75
ОД – 2-125	2×125		1528	266	190	75
ОДО – 2-40	2×40		1230	266	158	75
ОДОР – 2-30	2×30		925	265	125	75
ОДОР – 2-40	2×40		1227	265	155	75
АОД – 2-30	2×30		945	255	-	80
АОД – 2-40	2×40		1241	255	-	80
ШОД – 2-40	2×40		1228	284	-	85
ШОД – 2-80	2×80		1530	284	-	83
Л71БОЗ	10×30		1096	1096	187	45
ПВЛ			Для пожароопасных помещений с пыле- и влаговыведениями. Параметры – аналогично ОД			

На рисунке 37 показаны основные типы светильников для ламп накаливания и люминесцентных ламп.

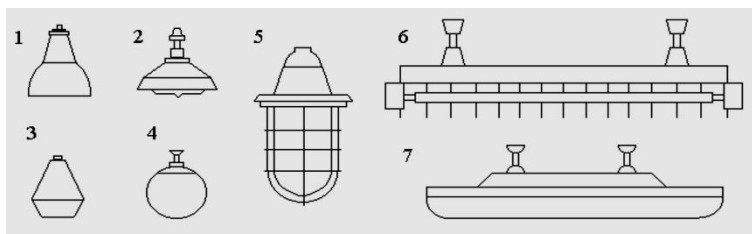


Рисунок 37 – Основные типы светильников: 1 – «Универсаль»; 2 – «Глубокоизлучатель»; 3 – «Люцетта»; 4 – «Молочный шар»; 5 – взрывобезопасный типа ВЗГ; 6 – типа ОД; 7 – типа ПВЛП

Размещение светильников в помещении определяется следующими параметрами (рисунок 38): H – высота помещения; h_c – расстояние светильников от перекрытия (свес); $h_n = H - h_c$ – высота светильника над полом, высота подвеса; $h_{рп}$ – высота рабочей поверхности над полом; $h = h_n - h_{рп}$ – расчётная высота, высота светильника над рабочей поверхностью; L – расстояние между

соседними светильниками или рядами, l – расстояние от крайних светильников или рядов до стены.

Свес светильников h_c принимается обычно 0,5–0,7 м; в высоких помещениях свес можно увеличивать с тем, чтобы высота подвеса над полом не была больше 5–5,5 м, так как при большей высоте обслуживать светильники с приставных лестниц и стремянок становится затруднительным и опасным. Однако увеличивать свес более чем до 1,5–2 м не следует, т. к. при большом свесе светильники будут сильно раскачиваться даже от незначительного движения воздуха. При необходимости выполнения более длинных свесов можно рекомендовать подвеску светильников к горизонтально натянутым тросам.

Оптимальное расстояние l от крайнего ряда светильников до стены рекомендуется принимать равным $L/3$.

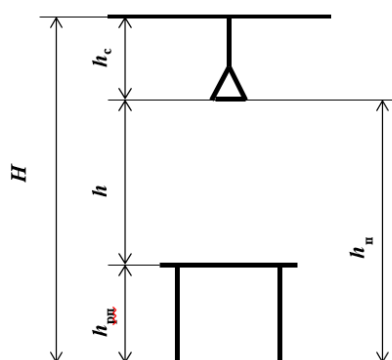


Рисунок 38. Основные расчетные параметры

Для создания благоприятных зрительных условий на рабочем месте, для борьбы со слепящим действием источников света введены требования ограничения наименьшей высоты светильников над полом (таблица 40, 41).

Таблица 40. Наименьшая допустимая высота подвеса светильников с люминесцентными лампами

Тип светильников	Наименьшая допустимая высота подвеса над полом, м
Двухламповые светильники ОД, ОДР, ОДО, ОДОР при одиночной установке или при непрерывных рядах из одиночных светильников	3,5
Двухламповые светильники ОД, ОДР, ОДО, ОДОР при непрерывных рядах их сдвоенных светильников	4,0
Двухламповые светильники ШЛД, ШОД	2,5
Двухламповые уплотнённые светильники ПВХ	3,0

Таблица 41. Наименьшая допустимая высота подвеса светильников с лампами накаливания

Тип светильников	Наименьшая допустимая высота подвеса над полом, м		
	В матированной колбе, до 150 Вт	В прозрачной колбе, ≤ 200 Вт	В прозрачной колбе, > 200 Вт
У	2,5	3	4
ШМ	–	2,5	3
ЛЦ	2,5	3	4
ГС	2,5	3	4
ПУ	–	3	4

Наилучшими вариантами равномерного размещения светильников являются шахматное размещение и по сторонам квадрата (расстояния между светильниками в ряду и между рядами светильников равны) (рисунок 39).

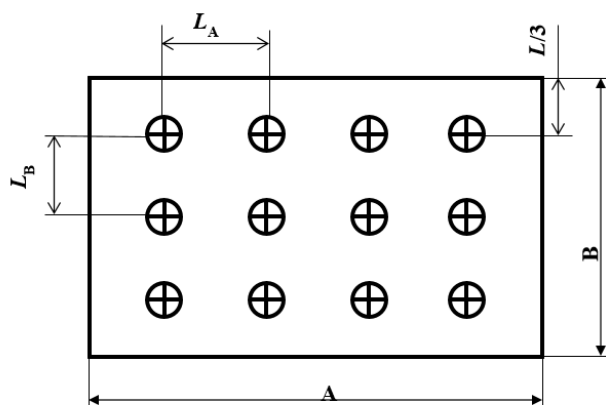


Рисунок 39 – Схема размещения светильников в помещении для ламп накаливания

При равномерном размещении люминесцентных светильников последние располагаются обычно рядами – параллельно рядам оборудования. При высоких уровнях нормированной освещённости люминесцентные светильники обычно располагаются непрерывными рядами, для чего светильники сочленяются друг с другом торцами.

Интегральным критерием оптимальности расположения светильников является величина $\lambda = L/h$, характеризующая наивыгоднейшее относительное расстояние между светильниками. В таблице 42 приведены значения λ для разных светильников.

Таблица 42. Наивыгоднейшее расположение светильников

Наименование светильников	λ
Люминесцентные с защитной решёткой ОДР, ОДОР, ШЛД, ШОД	1,1 – 1,3
Люминесцентные без защитной решётки типов ОД, ОДО	1,4
ПВЛ	1,5
ГС, ЛЦ	1,6
У, ПУ с отражателем	1,8
ШМ, ПУ без отражателей, плафоны	2,3
СЗ-4-ДРЛ	1,0

Расстояние между светильниками L определяется как:

$$L = \lambda * h \quad (23)$$

Количество рядов светильников с люминесцентными лампами определяется по формуле 24:

$$n_{\text{ряд}} = \frac{B - \frac{2}{3}L}{L} + 1, \quad (24)$$

где $n_{\text{ряд}}$ – количество рядов; B – ширина помещения, м; L – расстояние между рядами светильников, м.

Количество светильников с люминесцентными лампами определяется по формуле 25:

$$n_{\text{св}} = \frac{A - \frac{2}{3}L}{l_{\text{св}} + 0,5}, \quad (25)$$

где $n_{\text{св}}$ – количество светильников в ряду; A – длина помещения, м; $l_{\text{св}}$ – длина светильника, м.

Общее количество светильников с люминесцентными лампами в помещении определяется по формуле 26:

$$N = n_{\text{ряд}} * n_{\text{св}}, \quad (26)$$

где N – общее количество светильников; $n_{\text{ряд}}$ – количество рядов; $n_{\text{св}}$ – количество светильников в ряду.

5.6.4. Выбор величины освещенности

Основные требования и значения нормируемой освещенности рабочих поверхностей изложены в СНиП 23-05-95. Выбор освещенности осуществляется в зависимости от размера объёма различения (толщина линии, риски, высота буквы), контраста объекта с фоном, характеристики фона.

5.6.5. Расчет общего равномерного освещения

Расчёт общего равномерного искусственного освещения горизонтальной рабочей поверхности выполняется методом коэффициента светового потока, учитывающим световой поток, отражённый от потолка и стен.

Световой поток лампы Φ определяется по формуле 27:

$$\Phi = \frac{E_n * S * K_z * Z}{N_l * \eta}, \quad (27)$$

где E_n – нормативная освещённость по СНиП 23-05-95*, лк; S – площадь освещаемого помещения, м²; K_z – коэффициент запаса, учитывающий загрязнение светильника (источника света, светотехнической арматуры, стен и пр., т. е. отражающих поверхностей), наличие в атмосфере цеха дыма, пыли (табл. 11); Z – коэффициент неравномерности освещения, отношение E_{cp} / E_{min} . Для люминесцентных ламп при расчётах берётся равным 1,1; N_l – число ламп в помещении (необходимо учесть число ламп в светильнике); η – коэффициент использования светового потока.

Коэффициент использования светового потока показывает, какая часть светового потока ламп попадает на рабочую поверхность. Индекс помещения определяется по формуле 28:

$$i = \frac{S}{h * (A + B)} \quad (28)$$

Коэффициенты отражения оцениваются субъективно (таблица 43).

Таблица 43. Коэффициент запаса светильников с люминесцентными лампами

Характеристика объекта	Коэффициент запаса
Помещения с большим выделением пыли	2,0
Помещение со средним выделением пыли	1,8
Помещения с малым выделением пыли	1,5

Таблица 44. Значение коэффициентов отражения потолка и стен

Состояние потолка	$\rho_n, \%$	Состояние стен	$\rho_{cm}, \%$
Свежепобеленный	70	Свежепобеленные с окнами, закрытыми шторами	70
Побеленный, в сырых помещениях	50	Свежепобеленные с окнами без штор	50
Чистый бетонный	50	Бетонные с окнами	30
Светлый деревянный (окрашенный)	50	Оклеенные светлыми обоями	30
Бетонный грязный	30	Грязные	10
Деревянный неокрашенный	30	Кирпичные неокрашенные	10
Грязный (кузницы, склады)	10	С темными обоями	10

5.7. Расчет освещенности помещения НИР.

Дано помещение с размерами: длина $A = 10$ м, ширина $B = 8$ м, высота $H = 4,5$ м. Высота рабочей поверхности $h_{pn} = 0,8$ м. Требуется создать освещенность $E = 300$ лк.

Коэффициент отражения стен $R_c = 30\%$, потолка $R_n = 50\%$. Коэффициент запаса $k = 1,5$, коэффициент неравномерности $Z = 1,1$. Рассчитываем систему общего люминесцентного освещения.

Выбираем светильники типа ОД, $\lambda = 1,4$. Приняв $h_c = 0,5$ м, определяем расчетную высоту:

$$h = H - h_c - h_{pn} = 4,5 - 0,5 - 0,8 = 3,2 \text{ м}$$

Расстояние между светильниками:

$$L = \lambda * h = 1,4 * 3,2 = 4,48 \text{ м}$$

Определяем количество рядов светильников:

$$n_{ряд} = \frac{B - \frac{2}{3}L}{L} + 1 = \frac{8 - \frac{2}{3} * 4,48}{4,48} + 1 \approx 2$$

Расстояние от крайнего ряда светильников до стены: $L/2 = 4,48/2 = 2,24 \text{ м}$

Определим количество светильников в ряду:

$$n_{св} = \frac{A - \frac{2}{3}L}{l_{cd} + 0,5} = \frac{10 - \frac{2}{3} * 4,48}{1,262 + 0,5} \approx 4$$

Размещаем светильники в два ряда. В каждом ряду можно установить 4 светильника типа ОД мощностью 125 Вт (с длиной 1,262 м), при этом разрывы между светильниками в ряду составят 16,7 см. Изображаем в масштабе план помещения и размещения на нем светильники (рисунок 40). Учитывая, что в каждом светильнике установлено две лампы, общее число ламп в помещении $N = 16$.

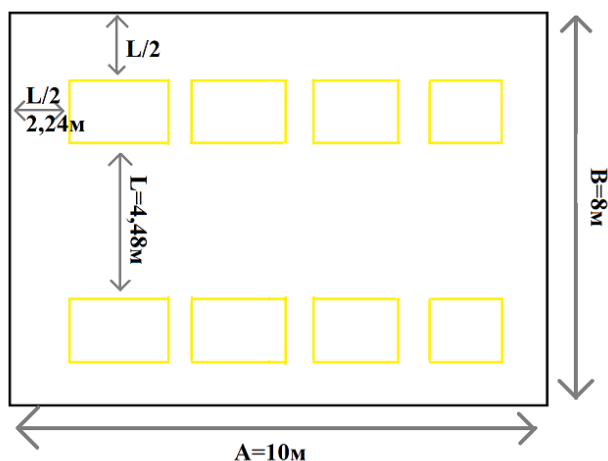


Рисунок 40 – План помещения и размещения светильников с люминесцентными лампами

Находим индекс помещения:

$$i = \frac{S}{h \cdot (A + B)} = \frac{10 \cdot 8}{3,2 \cdot (10 + 8)} \approx 1,4$$

По табл. 13 определяем коэффициент использования светового потока:

$$\eta = 0,47$$

Определяем потребный световой поток ламп в каждом из рядов:

$$\Phi = \frac{E_n \cdot S \cdot K_s \cdot Z}{N_n \cdot \eta} = \frac{300 \cdot 80 \cdot 2 \cdot 1,1}{16 \cdot 0,47} = 7021,28$$

По табл. 1 выбираем ближайшую стандартную лампу – ЛТБ 125 Вт с потоком 8150 лм. Делаем проверку выполнения условия:

$$-10\% \leq \frac{8150 - 7021,28}{8150} \cdot 100\% \leq +20\%$$

Получаем: $-10\% \leq 13,85\% \leq 20\%$

Определяем электрическую мощность осветительной установки:

$$P = 125 \cdot 16 = 2000 \text{ Вт}$$

5.8. Экологическая безопасность

Основным материалом, используемым в работе, является диоксид циркония, стабилизированный оксидом иттрия. В природе цирконий чаще всего встречается в виде двуокиси ZrO_2 (диоксид циркония). Металлический цирконий и его нерастворимые соединения, в том числе оксид, биоинертны и не оказывают токсического воздействия на флору и фауну.

При высоких концентрациях в воздухе порошок диоксида циркония способен вызывать раздражение слизистой оболочки органов дыхания животных и человека. При концентрациях, используемых в работе, диоксид циркония, стабилизированный оксидом иттрия, не способен нанести вреда окружающей среде.

5.9. Безопасность в чрезвычайных ситуациях

Здание 10 корпуса ТПУ, где находится лаборатория, расположено вдали от воды, химических предприятий, атомных электростанций в сейсмически не активном районе. Поэтому такие чрезвычайные ситуации, как затопления, цунами, землетрясения, химические и радиоактивные выбросы маловероятны. Наиболее вероятной чрезвычайной ситуацией является пожар. Причиной пожара может быть короткое замыкание, возгорание легко воспламеняющихся веществ, неосторожное обращение с огнем. Все помещения должны соответствовать требованиям пожарной безопасности согласно ГОСТ 12.1.004-91 [99] и иметь средства пожаротушения по ГОСТ 12.4.009-83 [100].

Для предотвращения и ликвидации пожара здание оборудовано пожарной сигнализацией, пожарными кранами и шлангами, пожарными щитами, огнетушителями, во всех помещениях имеется план эвакуации, в коридорах указатели движения к эвакуационному выходу. На рисунке 41 представлен план эвакуации из лаборатории (018 аудитория) и соседних помещений.

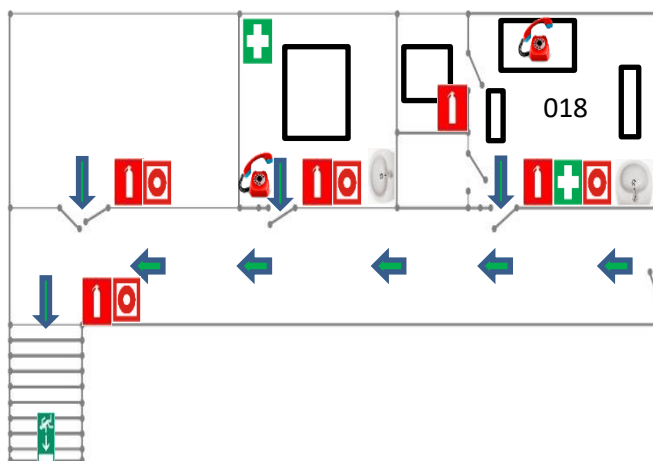


Рисунок 41 – План эвакуации

В лаборатории (018 аудитория) находится 2 огнетушителя ОУ-5, в соседней (021) аудитории и помещении склада так же расположено по одному огнетушителю ОУ-5.

При срабатывании пожарной сигнализации или явных признаках пожара необходимо руководствоваться следующими указаниями.

1. При выходе из помещения, убедиться, что за дверью нет пожара, приложив руку к двери или к металлической ручке, если они горячие, то ни в коем случае не открывайте дверь. Если основной выход заблокирован пожаром, постарайтесь покинуть помещение через окна. Если нет возможности выйти через окна необходимо плотно заткнуть все щели вокруг двери влажными тряпками, укрыться смоченными водой покрывалами или намочить одежду, при наличии большого количества воды постоянно поливать дверь. Постарайтесь посредством связи сообщить о своем местоположении. При задымлении необходимо лечь на пол и дышать сквозь намоченную ткань, дожидаясь спасения.

2. Когда есть возможность покинуть помещение, необходимо организованно двигаться к аварийному выходу, согласно плану эвакуации (рисунок 5), избегая при этом огня и сильного задымления. При наличии дыма, двигайтесь на четвереньках, прикрывая дыхательные пути влажной тканью. Плотно закрывайте за собой двери, чтобы замедлить распространение пожара.

При невозможности пройти к эвакуационному выходу, используйте для выхода окна или лазы на крышу, привлекайте к себе внимание, чтобы вас заметили и спасли. При выходе из помещения сразу сообщите об этом ответственным лицам.

3. Если очаг возгорания возник непосредственно на вашем рабочем месте, первым делом вызовете пожарную службу и самостоятельно начните тушение огня с помощью имеющихся в помещении противопожарных средств. При возгорании электроприбора, перед тушением, необходимо его обесточить и накрыть покрывалом, ограничив доступ к огню кислорода. При отсутствии покрывала тушите с помощью огнетушителя или водой, однако это может повредить не вышедшие из строя в результате пожара элементы прибора.

5.10. Выводы по разделу

Таким образом, в данном разделе были рассмотрены негативные факторы, влияющие на работника в процессе выполнения настоящей выпускной квалификационной работы, а также меры по снижению их вредного/опасного действия к минимуму. Кроме того, были рассмотрены правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности работника, экологические аспекты работы, а также возможные чрезвычайные ситуации на рабочем месте и порядок действий в случае их возникновения.

Список публикаций

1. Иващенко Я.О., Алишин Т.Р. Сравнительное исследование механических свойств керамики на основе диоксида циркония, изготовленной квазиизостатическим прессованием. // В сборнике: ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ НАУК Сборник научных трудов XVII Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. под редакцией И.А. Курзиной, Г.А. Вороновой, С.А. Поробовой. 2020. С. 88-90.

2. Алишин Т.Р., Двилис Э.С., Иващенко Я.О. Определение характеристик прессуемости порошка на основе диоксида циркония в процессе квазиизостатического прессования. // В сборнике: ПРОБЛЕМЫ МЕХАНИКИ: ТЕОРИЯ, ЭКСПЕРИМЕНТ И НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ. Сборник научных трудов XV Всероссийской школы-конференции молодых ученых. 2021. С. 7-8.

Список использованной литературы

1. Завадовская В.Д., Попов В.П., Карлов А.В., Григорьев Е.Г., Килина О.Ю., Аминова Т.Ф. Возможности ультразвуковых методов исследования в оценке консолидации переломов трубчатых костей, леченных металлоосеосинтезов. // Вопросы реконструктивной и пластической хирургии. – №1. – 2009. – С. 27-32.
2. Березин И.М., Залазинский А.Г., Нестеренко А.П. Моделированием процесса эластостатического компактирования порошкообразного титаносодержащего сырья // Информационные технологии и системы: сборник научных трудов V-ой Международной научной конференции (24-28 февраля 2016 года). Челябинск: Издательство Челябинского государственного университета, 2016. С. 207-2013.
3. Кузнецов П.А., Мертенс К.К., Гоциридзе А.В. Опыт эластостатического прессования порошковых изделий сложной формы // Обработка металлов давлением. – 2004. – № 2 (20). – С. 17-19.
4. Carter S., Costa P., Vaquette C. et al. Additive biomanufacturing: an advanced approach for periodontal tissue regeneration. // Annals of biomedical engineering. – 2017. – No. 45 (1). – P. 12-22.
5. Spottiswoode B., van den Heever D., Chang Y. et al. Preoperative three-dimensional model creation of magnetic resonance brain images as a tool to assist neurosurgical planning. // Stereotactic and functional neurosurgery. – 2013. – V. 91 (3). – P. 162-169.
6. Лякишев Н.П., Калинин Б.А., Солонин М.И. Перспективные направления получения и обработки материалов. // Бюллетень Международного Общества Материаловедов. – 2000. – №1. – С. 22 – 47.
7. Гропянов А.В., Ситов Н.Н., Жукова М.Н. Порошковые материалы: учебное пособие. – ВШТЭ СПбГУПТД, 2017. – 76 с.
8. Нефедов Я.В., Черных А.А., Караваев Д.М., Матыгуллина Е.В., Макарован Л.Е. Зависимость насыпной плотности порошка терморасширенного графита от скорости вращения элементов измельчителя с режущими кромками

продолжительности цикла измельчения. // Современные проблемы науки и образования. – 2015ю №2-2. – С.

9. Двилис Э.С. Закономерности консолидации порошковых систем при изменении деформации и физических воздействий: дисс. ... д-ра физ.-мат. наук. Томск, 2014. 386 с.

10. Хасанов О.Л., Двилис Э.С., Качаев А.А. Метод коллекторного компактирования нано- и полидисперсных порошков. Учебное пособие. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008. – 8-12 с.

11. Somiya Sh., Aldinger F., Claussen N. et al. Handbook of Advanced Ceramics. Volume I: Materials science. – Elsevier, 2003. – 790 p.

12. Corrado Piconi, AnnaTampieri. Oxide Ceramics for Biomedical Applications. // Reference Module in Materials Science and Materials Engineering. – 2020. – P. 1-8.

13. Fabbri, P., Piconi, C., Burrese, E., Magnani, G., Mazzanti, F., Mingazzini. Lifetime estimation of a zirconia–alumina composite for biomedical applications. // Dent. Mater. – 2013. – P. 138–142.

14. Corrado Piconi, AnnaTampieri. Oxide Ceramics for Biomedical Applications. // Reference Module in Materials Science and Materials Engineering. – 2020. – P. 1-8.

15. Сидорова Н.В. Структура, фазовый состав и механические свойства твердых растворов ZrO_2 - Y_2O_3 , солегированных оксидами CeO_2 , Nd_2O_3 , Er_2O_3 , Yb_2O_3 : дисс. ... канд. физ.-мат. наук. Саранск, 2019. 134 с.

16. Lawson, S. Environmental degradation of zirconia ceramics. J. Eur. Ceram. Soc. – 1995. V.15. – P. 485–4502.

17. Chevalier, J., Gremillard, L., Deville, S. Low Temperature Degradation of Zirconia an Implication for Biomedical Implants. // Annu. Rev. Mater. –2007. V. 37. – P. 1–32.

18. Lughì, V., Sergo, V. Low temperature degradation-aging-of zirconia: A critical review of the relevant aspects in dentistry. // Dent. Mater. –2010. – V.26. P. 807–820.

19. Chevalier, J., Gremillard, L., Virkar, A.V., Clarke, D.R. The tetragonal–monoclinic transformation in zirconia: Lessons learned and future trends. // *J. Am. Ceram. Soc.* –2009. – V. 92. – P. 1901–1920.
20. Meshalkin V.P., Belyakov A.V. Methods used for the compaction and Molding of ceramic matrix composites reinforced with carbon nanotubes. // *Processes.* – 2020. – V. 8(8). – P. 1-37.
21. Belyakov, A.V. Synergetic and quasichemical approaches in ceramic technology (a review). // *Glass Ceram.* – 2003. – V. 60. – P. 274–279.
22. Шликерное формование в неадсорбирующие формы, литье из термопластичных шликеров, электрофоретическое литье шликеров [Электронный ресурс]: URL: https://studopedia.ru/2_9490_shlikernoe-formovanie-v-neadsorbiruyushchie-formi-lite-iz-termoplastichnih-shlikerov-elektroforeticheskoe-lite-shlikerov.html (режим доступа: свободный).
23. Буякова С.П., Хлусов И.А., Кульков С.Н. Пористая циркониевая керамика для эндопротезирования костной ткани // *Физическая мезомеханика.* – 2004. – №7. – С. 127-130.
24. Кульбакин Д.Е., Чойнзонов Е.Л., Кульков С.Н., Буякова С.П., Чернов В.И., Мухамедов М.Р., Буяков А.С. Методика реконструкции челюстно-лицевой области с использованием индивидуальных имплантатов из биоактивной керамики // *Опухоли головы и шеи.* – 2017. – Том 7. – № 4. – С. 29-34.
25. Vogler, T.J.; Lee, M.Y.; Grady, D.E. Static and dynamic compaction of ceramic powders. // *Int. J. Solids Struct.* – 2007. – V. 44. – P. 636–658.
26. Khoei, A.R.; Biabanaki, S.O.R.; Parvaneh, S.M. Dynamic modeling of powder compaction processes via a simple contact algorithm. // *Int. J. Mech. Sci.* – 2012. – V. 64. – P. 196–210.
27. Boltachev, G.S.; Nagayev, K.A.; Paranin, S.N.; Spirin, A.V.; Volkov, N.B. Magnetic Pulsed Compaction of Nanosized Powders. // *Nanotechnology Science and Technology Series.* – 2009. – P. 6–9.
28. Bokov, A.A.; Boltachev, G.S.; Volkov, N.B.; Zayats, S.V.; Il'ina, A.M.; Nozdrin, A.A.; Paranin, S.N.; Olevskii, E.A. Uniaxial compaction of nanopowders on

a magnetic-pulse press. // *Physical science of materials*. – 2013. – V. 58. – P. 1459–1468.

29. Kaygorodov, A.S.; Ivanov, V.V.; Khrustov, V.R.; Kotov, Y.A.; Medvedev, A.I.; Osipov, V.V.; Ivanov, M.G.; Orlov, A.N.; Murzakaev, A.M. Fabrication of Nd:Y₂O₃ transparent ceramics by pulsed compaction and sintering of weakly agglomerated nanopowders. // *Journal of the European Ceramic Society*. – 2007. – V. 27. – P. 1165–1169.

30. Generalov M.B. Dynamic Compaction of Powder Materials by Percussive and Percussive-Vibratory Devices. // *Chemical and Petroleum Engineering*. – 2000. – V. 36. – P. 701–708.

31. Gray, W.A.; Rhodes, G.T. Energy transfer during vibratory compaction of powders. // *Powder Technol.* – 1972. – V. 6. – P. 271–281.

32. Karban, O.V.; Kanunnikova, O.M.; Khazanov, E.N.; Salamatov, E.I.; Khasanov, O.L.; Taranov, A.V. Effect of ultrasonic vibration on the structure and composition of the interface regions in Ba–W–Ti–O ceramics. // *Ceramics International*. – 2013. – V. 39. – P. 497–502.

33. Khasanov, O.L.; Dvilis, E.S.; Sokolov, V.M. Compressibility of the structural and functional ceramic nanopowders. // *Journal of the European Ceramic Society*. – 2007. – V. 27. – P. 749–752.

34. Vaezi, M.; Seitz, H.; Yang, S. A review on 3D micro-additive manufacturing technologies. // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2013. – V. 67. – P. 1721–1754.

35. Manjooran, N.J.; Kumar, A.; Sigmund, W.M. Development of a liquid toner for electro-photographic solid free form fabrication. // *Journal of the European Ceramic Society*. – 2006. – V. 26. – P. 2459–2465.

36. Smay, J.E.; Ratson, G.; Shepard, R.F.; Cesarano, J., III; Lewis, J.A. Directed colloidal assembly of 3D periodic structures. // *Advanced Materials*. – 2002. – V. 14. – P. 1279–1283.

37. Zhao, X.; Evans, J.R.G.; Edirisinghe, M.J. Direct ink-jet printing of vertical walls. // *Journal of the American Ceramic Society*. – 2002. – V. 85. – P. 2113–2115.
38. Allahverdi, M.; Danforth, S.C.; Jafari, M.; Safari, A. Processing of advanced electroceramic components by fused deposition technique. // *Journal of the European Ceramic Society*. – 2001. – V. 21. – P. 1485–1490.
39. Su, B.; Dhara, S.; Wang, L. Green ceramic machining: A top-down approach for the rapid fabrication of complex-shaped ceramics. // *Journal of the European Ceramic Society*. – 2008. – V. 28. – P. 2109–2115.
40. Kumar, D.B.R.; Reddy, M.R.; Mulay, V.N.; Krishnamurti, N. Acrylic copolymer emulsion binders for green machining of ceramics. // *European Polymer Journal*. – 2000. – V. 36. – P. 1503–1510.
41. Halloran, J.W. Freeform fabrication of ceramics. // *Journal of the American Ceramic Society*. – 1999. – V. 59. – P. 17–28.
42. Mohanty, S.; Rameshbabu, A.P.; Manda, S.; Su, B.; Dhara, S. Critical issues in near net shape forming via green machining of ceramics: A case study of alumina dental crown. // *Journal of Asian Ceramic Societies*. – 2013. – V. 1. – P. 274–281.
43. Mohanty, S.; Rameshbabu, A.P.; Dhara, S. Net shape forming of green alumina via CNC machining using diamond embedded tool. // *Ceramics International*. – 2013. – V. 39. – P. 8985–8993.
44. Strakna, T.J.; Jahanmir, S.; Allor, R.L.; Kumar, K.V. Influence of grinding direction on fracture strength of silicon nitride. // *Journal of Engineering Materials and Technology*. – 1996. – V. 118. – P. 335–342.
45. Li, J.-Z.; Wu, T.; Yu, Z.-Y.; Zhang, L.; Chen, G.-Q.; Guo, D.-M. Micro machining of pre-sintered ceramic green body. // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2012. – V. 212. – P. 571–579.
46. Margarido, A.; Purquerio, B.M.; Foschini, C.R.; Fortulan, C.A. Influence of the green-machining parameters on the mechanical properties of alumina rods. //

The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2017. – V. 88. – P. 3475–3484.

47. Yang, J.L.; Su, L.; Ma, L.G. Colloidal injection moulding of ceramics. // Key Engineering Materials. – 2002. – V. 224–226. – P. 667–672.

48. Kamboj, R.K.; Dhara, S.; Bhargava, P. Machining behaviour of green gelcast ceramics. // Journal of the European Ceramic Society. – 2003. – V. 23. – P. 1005–1011.

49. Ng, S.H.; Hull, J.B.; Henshall, J.L. Machining of novel alumina/cyanoacrylate green ceramic compacts. // Journal of Materials Processing Technology. – 2006. – V. 175. – P. 299–305.

50. Dadhich, P.; Srivas, P.K.; Mohanty, S.; Dhara, S. Microfabrication of green ceramics: Contact vs. non-contact machining. // Journal of the European Ceramic Society. – 2015. – V. 35. – P. 3909–3916.

51. Yang, J.; Yu, J.; Cui, Y.; Huang, Y. New laser machining technology of Al₂O₃ ceramic with complex shape. // Ceramic International. – 2012. – V. 38. – P. 3643–3648.

52. Yapryntsev, A.D.; Baranchikov, A.E.; Ivanov, V.K. Layered rare-earth hydroxides: A new family of anion-exchangeable layered inorganic materials. // Russian Chemical Reviews. – 2020. – V. 89. – P. 629–666.

53. Kasyanova, A.V.; Tarutina, L.R.; Rudenko, A.O.; Lyagaeva, J.G.; Medvedev, D.A. Ba(Ce; Zr)O₃-based electrodes for protonic ceramic electrochemical cells: Towards highly comible functionality and triple-conducting behavior. // Russian Chemical Reviews. – 2020. – V. 89. – P. 667–692.

54. Zak, P.P.; Lapina, V.A.; Pavich, T.A.; Trofimov, A.V.; Trofimova, N.N.; Tsaplev, Y.B. Luminescent materials for modern light sources. // Russian Chemical Reviews. – 2017. – V. 86. – P. 831–844.

55. Pat. US 6919041 Method for Compacting Powder Materials into Articles and a Mold for Implementing the Method. [Electronic resource] / Dvilis, E.; Khasanov, O.; Sokolov, V.; Pokholkov, Y.; Current Assignee Lockheed Martin Energy Systems Inc. – Pub. Date 2005/07/19/.

56. Пат. 2225280 Российская Федерация, МПК В22F 3/03, В30В 15/02. Способ прессования порошковых материалов (варианты) и устройство для его осуществления / Двилис Э.С., Хасанов О.Л., Соколов В.М., Похолков Ю.П.; заявитель и патентообладатель Томский политехнический университет. ин-т связи. – опубл. 10.03.04, Бюл. № 7.
57. Dvilis, E.S.; Khasanov, O.L.; Chartpuk, P.; Sokolov, V.M. Optimal design of the spiral type of collector die for dry powder compaction. // In Proceedings of the 8th International Forum on Strategic Technology (IFOST2013). – 2013. – V. 1. – P. 25–28.
58. Khasanov, O.L.; Dvilis, E.S.; Sokolov, V.M.; Chartpuk, P. Deformation distribution of the powder green compacts due to changing the number of slider parts in collector die of spiral type. In Abstracts of German-Russian Forum on Nanotechnology; National Research Tomsk Polytechnic University (TPU): Tomsk, Russia, 2013; p. 65.
59. Yang, H.C.; Kim, J.K.; Kim, K.T. Rubber isostatic pressing and cold isostatic pressing of metal powder. // Materials Science and Engineering: A. – 2004. – V. 382. P. 41–49.
60. Fu, Y.; Tao, Z.; Hou, X. Weibull distribution of the fracture strength of 99% alumina ceramic reshaped by cold isostatic pressing. // Ceramics International. – 2014. – V. 40. – P. 7661–7667.
61. He, W.; Wei, Q.; Liu, K.; Shi, Y.; Liu, J. Numerical simulation of cold isostatic pressed alumina parts produced by selective laser sintering and part shape optimization. // Ceramics International. – 2013.– V. 39. – P. 9683–9690.
62. Lee, S.C.; Kim, K.T. A densification model for powder materials under cold isostatic pressing—Effect of adhesion and friction of rubber molds. // Materials Science and Engineering A. – 2008. – V. 498. – P. 359–368.
63. Timokhova, M.I. Physical bases of quasiisostatic compaction of powder materials. // Refractories and Industrial Ceramics. – 2009. – V. 50. –P. 26–30.

64. Timokhova, M.I. Some properties of elastic press components in powder material quasiisostatic pressing. // *Refractories and Industrial Ceramics*. – 2009. – V. 50. – P. 189–190.
65. Timokhova, M.I. Production schemes for quasiisostatic compaction of ceramic objects. // *Refractories and Industrial Ceramics*. – 2009. – V. 50. – P. 262–265.
66. Timokhova, M.I. Industrial technology for the automated production of grinding balls by quasiisostatic pressing. // *Refractories and Industrial Ceramics*. – 2011. – V. 52. – P. 389–392.
67. Groll J., Boland T., Blunk T. et al. Biofabrication: reappraising the definition of an evolving field. // *Biofabrication*. – 2016. – V. 8 (1). – P. 013001.
68. Zhang Y., Yue K., Aleman J. et al. 3D bioprinting for tissue and organ fabrication. // *Annals of biomedical engineering*. – 2016. – V. 45 (1). – P. 148-163.
69. Kang H., Lee S., Ko I. et al. A 3D bioprinting system to produce human-scale tissue constructs with structural integrity. // *Nature biotechnology*. – 2016. – V. 34 (3). – P. 312-319.
70. Lee V., Dai G. Printing of three-dimensional tissue analogs for regenerative medicine. // *Annals of Biomedical Engineering*. – 2017. – V. 45. – P. 115131.
71. Gross BC, Erkal JL, Lockwood SY, et al. Evaluation of 3D printing and its potential impact on biotechnology and the chemical sciences. // *Analytical Chemistry*. – 2014. – V. 86(7). – P. 3240–3253.
72. Schubert C, van Langeveld MC, Donoso LA. Innovations in 3D printing: a 3D overview from optics to organs. // *British Journal of Ophthalmology*. – 2014. – V. 98(2). – P. 159–161.
73. Cui X, Boland T, D’Lima DD, Lotz MK. Thermal inkjet printing in tissue engineering and regenerative medicine. // *Recent Pat Drug Deliv Formul*. – 2012. – V. 6(2). – P. 149–155.
74. Dodziuk H. Applications of 3D printing in healthcare. // *Kardiochirurgia i Torakochirurgia Polska*. – 2016. – V. 13(3). – P. 283-293.

75. An J, Ee Mei Teoh J, Suntornnond R, Kai Chua C. Design and 3D Printing of Scaffolds and Tissues. // *Engineering*. – 2019. – V. 9. – P. 1713.
76. Gao G, Hubbell K, Schilling A.F, Dai G, Cui X. Bioprinting Cartilage Tissue from Mesenchymal Stem Cells and PEG Hydrogel. // *Methods in molecular biology (Clifton, N.J.)*. – 2017. – V. 1612. – P. 391–398.
77. Cubo N, Garcia M, Del Canizo J.F, Velasco D, Jorcano J.L. 3D bioprinting of functional human skin: Production and in vivo analysis. // *Biofabrication*. – 2016. – V. 9. – P. 015006.
78. Zhou X, Zhu W, Nowicki M, Miao S, Cui H, Holmes B, Glazer R.I, Zhang L.G. 3D Bioprinting a Cell-Laden Bone Matrix for Breast Cancer Metastasis Study. // *ACS Applied Materials & Interfaces*. – 2016. – V. 8. – P. 30017–30026.
79. Haglin, J.M.; Eltorai, A.E.; Gil, J.A.; Marcaccio, S.E.; Botero-Hincapie, J.; Daniels, A.H. Patient-Specific Orthopaedic Implants. // *Orthopaedic Surgery*. – 2016. – V. 8. – P. 417–424.
80. Kazzazi, S.M.; Kranioti, E.F. Applicability of 3D-dental reconstruction in cervical odontometrics. // *American journal of physical anthropology*. – 2018. – V. 165. – P. 370–377.
81. Zak C. Eckel, Chaoyin Zhou, John H. Martin, Alan J. Jacobsen, William B. Carter and Tobias A. Schaedle. Additive manufacturing of polymer-derived ceramics. // *Science*. – 2016. – V. 351. – Issue. 6268. – P. 58–62.
82. Sardarian M., Mirzaee O., Habibolahzaden A. Numerical simulation and experimental investigation on jetting phenomenon in low pressure injection molding (LPIM) of alumina. // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2017. – V. 243. – P. 374–380.
83. Кириллова Н.К., Алексеева А.Н., Егорова А.Д. Применение аддитивных технологий в строительстве и при изготовлении керамических изделий. // *Вестник ТГИУ им. В.Г. Шухова*. – 2020. – №2. – С. 134-141.
84. Алишин Т.Р. Влияние геометрических параметров оболочки и режимов квазиизостатического прессования на деформацию порошкового тела. // *Перспективы развития фундаментальных наук. Сборник научных трудов XVI*

Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. 23-26 апреля 2019 г. стр. 49-52.

85. Постановление Минтруда России, Минобразования России от 13.01.2003 N 1/29 (ред. от 30.11.2016) "Об утверждении Порядка обучения по охране труда и проверки знаний требований охраны труда работников организаций" [Электронный ресурс]: Официальный сайт компании "КонсультантПлюс". URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_40987/ (режим доступа: свободный).

86. Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 09.03.2021) [Электронный ресурс]: Официальный сайт компании "КонсультантПлюс". URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_34683/ (режим доступа: свободный).

87. 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) [Электронный ресурс]: Официальный сайт компании "КонсультантПлюс". URL: <http://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc;base=STR;n=4023#0> (режим доступа: ограниченный).

88. СН 181-70. Строительные нормы. Указания по проектированию цветовой отделки интерьеров производственных зданий промышленных предприятий (утв. Госстроем СССР и ГКНТ СССР 21.01.1970) [Электронный ресурс]: Официальный сайт компании "КонсультантПлюс". URL: <http://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc;base=STR;n=14884#0> (режим доступа: ограниченный).

89. ГОСТ 12.0.003-2015. Межгосударственный стандарт. Система стандартов безопасности труда. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация (введен в действие Приказом Росстандарта от 09.06.2016 N 602-ст) [Электронный ресурс]: Официальный сайт компании "КонсультантПлюс".

URL: <http://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc;base=STR;n=20151#0>
(режим доступа: ограниченный).

90. СанПиН 2.2.4.548-96. 2.2.4. Физические факторы производственной среды. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений. Санитарные правила и нормы (утв. Постановлением Госкомсанэпиднадзора РФ от 01.10.1996 N 21) [Электронный ресурс]: Официальный сайт компании "КонсультантПлюс". URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_93768/ (режим доступа: свободный).

91. СанПиН 1.2.3685-21 Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания. Санитарные правила и нормы (утв. Главным государственным санитарным врачом РФ 28.01.2021) [Электронный ресурс]: Официальный сайт электронного фонда правовых и нормативно-технических документов "Docs.cntd.ru". URL: <https://docs.cntd.ru/document/573500115> (режим доступа: свободный).

92. ГОСТ 12.1.007-76. Система стандартов безопасности труда. Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности (утв. Постановлением Госстандарта СССР от 10.03.1976 N 579) (ред. от 28.03.1990) [Электронный ресурс]: Официальный сайт компании "КонсультантПлюс". URL: <http://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc;base=STR;n=3#0> (режим доступа: ограниченный).

93. 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) [Электронный ресурс]: Официальный сайт компании "КонсультантПлюс". URL: <http://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc;base=OTN;n=8534#0> (режим доступа: ограниченный).

94. 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) [Электронный ресурс]: Официальный сайт компании "КонсультантПлюс". URL: <http://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc;base=OTN;n=12926#0> (режим доступа: ограниченный).

95. ГОСТ ISO 12100-2013. Межгосударственный стандарт. Безопасность машин. Основные принципы конструирования. Оценки риска и снижения риска (введен в действие Приказом Росстандарта от 13.03.2014 N 137-ст) [Электронный ресурс]: Официальный сайт компании "КонсультантПлюс". URL: <http://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=OTN&n=7747&rnd=263249.968218140#0> (режим доступа: ограниченный).

96. ГОСТ 12.4.253-2013 (EN 166:2002). Межгосударственный стандарт. Система стандартов безопасности труда. Средства индивидуальной защиты глаз. Общие технические требования (введен в действие Приказом Росстандарта от 30.12.2013 N 2428-ст) [Электронный ресурс]: Официальный сайт компании "КонсультантПлюс". URL: <http://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc;base=STR;n=18042#0> (режим доступа: ограниченный).

97. ГОСТ Р 12.1.019-2009. Национальный стандарт Российской Федерации. Система стандартов безопасности труда. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты (утв. и введен в действие Приказом Ростехрегулирования от 10.12.2009 N 681-ст) [Электронный ресурс]: Официальный сайт компании "КонсультантПлюс". URL: <http://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc;base=STR;n=13564#0> (режим доступа: ограниченный).

98. ГОСТ 12.2.007.0-75. Система стандартов безопасности труда. Изделия электротехнические. Общие требования безопасности (введен в действие Постановлением Госстандарта СССР от 10.09.1975 N 2368) (ред. от 01.06.1988) [Электронный ресурс]: Официальный сайт компании "КонсультантПлюс". URL:

<http://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc;base=STR;n=7996#0> (режим доступа: ограниченный).

99. ГОСТ 12.1.004-91. Межгосударственный стандарт. Система стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность. Общие требования (утв. Постановлением Госстандарта СССР от 14.06.1991 N 875) (ред. от 01.10.1993) [Электронный ресурс]: Официальный сайт компании "КонсультантПлюс". URL: <http://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc;base=STR;n=4371#0> (режим доступа: ограниченный).

100. ГОСТ 12.4.009-83. Пожарная техника для защиты объектов. Основные виды. Размещение и обслуживание (утв. Постановлением Госстандарта СССР от 10.10.1983 N 4882) (ред. от 01.06.1989) [Электронный ресурс]: Официальный сайт компании "КонсультантПлюс". URL: <http://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc;base=STR;n=4120#0> (режим доступа: ограниченный).

101. Дмитриенко А.О. Разработка и апробация критерия достоверности и точности геометрических параметров, полученных по данным порошковой дифракции: дисс. ... канд. хим. наук. Москва, 2015. 186 с.

102. ГОСТ 24409-80. Межгосударственный стандарт. Материалы керамические электротехнические. Методы испытаний. Классификация (введен в действие Приказом Росстандарта от 01.01.1982 N 5071) [Электронный ресурс]: Официальный сайт компании "Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов". URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200011905> (режим доступа: ограниченный)

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Раздел 1.3; 1.4; 1.5 LITERATURE REVIEW

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4БМ92	Иващенко Яна Олеговна		

Консультант ИШНПТ ОМ

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ОМ ИШНПТ	Двилис Э.С.	д.ф.-м.н.		

Консультант –лингвист отделения (НОЦ) школы БИП, ОИЯ :

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Демьяненко Н.В.	–		

1.3. Forming of powder materials with uniform distribution of compact density

This section discusses the most convenient modern methods of compaction of powder masses. This pre-binder removal and sintering step plays a key role in the production of porous, uniform density ceramics in mass production. The possibilities of formless approaches to the production of ceramic bodies of precise shape, including the machining of ceramic compacts and additive manufacturing technologies, are also analyzed.

Compacting is an important technological step in the mass production of technical ceramics. This stage usually starts with a mixture of powders or slip (usually called a molding compound) and ends with a compacted compact - compact. This is followed by binder removal and high temperature sintering to obtain the desired ceramic product. This stage plays a decisive role in the production of non-porous ceramics with a uniform density distribution both at the laboratory and at the industrial level [18].

Materials with the highest density and smallest grain size exhibit the best mechanical properties that are often required for modern applications. Such ceramics can be made from highly dispersed or nano-sized powders using special compaction and sintering methods to prevent uncontrolled grain growth.

Fine-grained and high-density ceramics can be obtained by sintering at high pressure or high heating rates, which minimizes the retention time of the material at the highest temperature. These requirements can be met by hot pressing (HP), hot isostatic pressing (HIP), or electro-pulse-plasma sintering (EIP). These methods are widely used to make ceramic specimens in laboratory and industrial settings. Meanwhile, these methods require expensive tools (equipment and accessories) [18].

The quantitative characteristics of the pressing process strongly depend on the content of the binder and the compaction method used [19]. Also important are the geometric dimensions of the mold and the processes occurring at the interface between the powder body and the mold. The more complex the geometric characteristics of the

mold, the more inhomogeneous is the field of friction forces and velocities of movement of powder components when filling the mold or when passing through the molding unit.

1.4. Slip casting

Slip is a stable suspension of a metallic or non-metallic powder in a liquid medium. Slip molding is a method of manufacturing products by pouring slip, which is a homogeneous concentrated suspension of powder in a liquid, into a porous form, followed by drying. Slip casting makes it possible to obtain products of complex shapes, small and large, hollow with a uniform wall thickness, with a high surface finish and precise dimensions. Significant disadvantages of slip molding are the high total duration of the billet production process, the need to manufacture and store large quantities of adsorbent molds, and the need for powerful drying equipment. The main properties of the slip, which determine the quality of the workpieces obtained from it, include: fluidity; sedimentation and aggregate stability at high solids content; ability to fill out a form. The dispersion of the solid phase particles distributed in the slip determines its stability, viscosity and affects the density of the resulting blanks [20].

In addition to traditional slip casting, its modification is also used, which consists in pouring a thermoplastic slip into a mold under pressure, which makes it possible to obtain ceramics of a higher quality.

Slip casting is actively used for the manufacture of products with complex and / or individual shapes, including various prostheses. For example, in [21], the authors developed a technology for producing porous ceramics based on partially stabilized zirconium dioxide. Ceramic properties, in particular porosity, were provided in two ways. The first consisted in varying the modes of pressing and sintering, the second - in the introduction of various amounts of easily combustible additives with different particle geometries into the composition of the ceramics. The authors managed to obtain ceramics suitable for the cultivation and life of living cells, which makes it promising for use in bone endoprosthetics. The authors of [21] have published many works on ceramic materials for medical use and the manufacture of prostheses by slip

casting [22]. A photograph of a facial implant obtained by the authors of [22] by slip casting is shown in Figure 3.



Figure 3 – Bioactive ceramic implant for reconstruction of the upper jaw and zygomatic-orbital complex [22]

A significant disadvantage of slip casting technology is the need to use special preparation of raw materials (feedstock), high design complexity, significant high cost and duration of mold production, which can be justified when producing only very large batches of identical products that have a long-term demand from the consumer. Bone implants of an individual shape are not such and require a significantly shorter development-design-manufacture cycle.

1.5. Dry or semi-dry pressing

The dry or semi-dry compaction method of forming powders is applicable to systems that do not contain a binder or contain it with a low content. The method leads to the formation of dense and mechanically strong compacts. It should be emphasized that this method is most commonly used in the industrial production of many types of metals, ceramics, and composites. Dry pressing is also the most economical method, so it is recommended to use it whenever possible. Nevertheless, with this pressing method, gradient density differences can be observed in products of complex geometric shapes.

All dry pressing methods can be divided into static and dynamic (impulse). The term "static" means that the external pressure on the molding mass gradually increases

at a relatively low rate [18]. Static dry pressing methods include closed rigid mold one-sided pressing, cold isostatic pressing and quasi-isostatic pressing, which are described in more detail below. In contrast, in dynamic methods, external pressure is applied in the form of pulses or shock waves, and thus the rate of pressure rise is very high.

1.5.1. Dynamic (impulse) dry pressing methods

This group of methods includes compaction processes under the action of impulsive external influences or shock waves generated by various sources [23, 24]. Shock waves can occur when a compressed, flammable gas or liquid explodes. Alternatively, electrohydraulic discharge of a high voltage capacitor through a water gap between two electrodes or the energy stored in a pulsed magnetic field can be used. These energy bursts can be used for molding products by methods of shock-wave compaction, impact compaction, electro-compaction, as well as hydrodynamic and magnetic-impulse compaction. Vibration and ultrasonic pressing can also be attributed to dynamic methods due to the periodicity of external influences.

It is generally accepted [18] that the main advantage of dynamic molding methods is the absence of external and internal friction. The fact is that the process is going too fast for frictional forces to develop. In addition, dynamic methods often allow one to obtain compacts with a higher average density and uniformity compared to their static counterparts. Forms for dynamic consolidation, first of all, must be distinguished by increased mechanical strength in order to withstand a shock wave of more than 1 GPa. In order to fulfill this requirement, these methods are usually applied to molding bodies of small dimensions (less than 100 mm).

Magnetic-pulse pressing of dry nanoscale powders

Magnetic pulse compaction, which is one of the simplest dynamic methods, was originally developed for nanosized powders [25, 26]. The powder is loaded into a mold and pressed under the action of weak impulse waves with a duration of 10–500 μ s and a shock wave up to 5 GPa (with repeated use). In this mode, both external and internal friction forces are significantly reduced, which makes it possible to obtain compacts with a very high density.

The energy mainly stored in the capacitor is converted into kinetic energy of the punch by an electromechanical converter. A mechanical impulse is generated by the interaction of a pulsed magnetic field with the conductive surface of the concentrator. The hub connected to the punch is driven by a diamagnetic effect, which tends to push the conductor out of the magnetic field. The concentrator drives the upper punch, which compresses the molding mass. This arrangement corresponds to a uniaxial seal. There can be two concentrators on both the top and bottom to double the compaction pressure and thus realize the biaxial compaction mode.

Heat is generated at the points of contact and mutual sliding of nanosized particles. Due to this, the hot mode of dynamic compaction can be realized through a certain optimization of external shock waves. This mode is possible for nanoscale powders due to their high excess surface energy.

Magnetic pulse compaction is characterized by the fact that the molded material accumulates significant excess energy in the form of structural defects. This stored energy lowers the temperature required for subsequent sintering by 200–300 °C, which is extremely useful, since it suppresses grain growth in the target ceramic particles [27].

Vibration seal

Vibration pressing is often used as an intermediate stage in the compaction of ceramic and metal powders [28, 29]. Vibration significantly reduces both internal and external friction within the molding compound during compaction. The molding mass may or may not contain a certain amount of binder. In the case of molding masses with a binder, one vibration compaction cycle usually leads to an increase in density by 6–12%. Vibration can be applied to one or both punches or to a die.

Vibration compaction is especially effective for solid powders that are resistant to traditional static pressing methods such as metal carbides, nitrides or borides. Relatively strong raw bodies with low internal stresses and relative density up to 75–85% can usually be obtained by vibration compaction.

Vibration compaction makes it possible to obtain compacts of complex shape with high density uniformity, which is an obvious advantage of the method. Moreover,

the equipment required to implement it is relatively simple and affordable. However, vibration is harmful to personnel due to repetitive vibrations.

Ultrasonic pressing

Ultrasonic pressing is the preferred method for the manufacture of uniformly structured high-density compacts, mainly from nanosized powders [30, 31]. As with the methods described above, ultrasonic treatment reduces both internal and external friction. Usually no binder is required, which eliminates removal related problems. The relative density of the resulting green bodies can reach 50%, which is a relatively high indicator for the compaction mode without a binder as applied to nanopowders. It is important to note that the density of compacts weakly depends on the characteristics of ultrasound and is primarily determined by the applied static pressure. Ultrasonic treatment makes nanoscale powder particles or their aggregates vibrate, and therefore the intensity of ultrasonic treatment should be such that the amplitude of forced vibrations is of the same order of magnitude as the particle (aggregate) size [8].

1.5.2. Manufacturing methods without molding

Freeform Solid Manufacturing

Semi-Solid Forging (SFF) technology has made tremendous progress over the past decade. This method can be modified, for example, by 3D printing [32], stereolithography [33], robotic casting [34], direct inkjet printing [35], deposited modeling [36], etc. The adaptation of SFF technology to ceramics turned out to be difficult a challenge due to the brittleness, hardness and high melting points of the most common ceramic materials.

The digitally generated CAD model of the object to be manufactured is first cut into thin cross-sectional layer images. To get the final geometry of the compact, the layers are sequentially added and connected to the previous ones. This technology makes it possible to obtain ceramic bodies of extremely complex shapes.

It should be noted that these methods are currently unprofitable for mass production. However, they have a very competitive potential in the production of one-off pieces of unique shape. And at the present time, this is a fairly relevant requirement.

The need for individual ceramic products of a unique shape constantly arises in the production of orthopedic or dental implants in practical medicine [37]. In this case, the ceramic product must be precisely adapted to the specific patient and the type of pathology.

Poor surface finish of ceramic compacts is the main drawback of modern technologies for the manufacture of bodies of arbitrary shape. This greatly affects the functional properties of ceramic products. The additional machining step, applied to both compacts and sintered ceramics, is labor intensive and expensive. Therefore, improving the surface quality of ceramic compacts manufactured using SFF technologies is one of the most pressing technological problems.

The green ceramic machining (GCM)

The processing of not yet sintered ceramics (GCM) as a technological operation can be formally classified as a modification of the production of a shapeless body. Moreover, it is based on a top-down approach, in contrast to the SFF technology discussed above, since the finished product is brought to the required shape and size by means of machining.

The use of GCM in ceramic technology has a long history. However, over the past decade, GCM technology has risen to the next level [38, 39]. In particular, computer-aided design and computer-aided manufacturing (CAD / CAM) tools have become common practice. With the recent development of CNC machine tools, GCM has evolved into a true alternative to casting. First of all, GMC is used for the manufacture of unique ceramic products such as dental implants [40, 41].

The processing of sintered ceramic products, as a rule, is not recommended because of the high probability of the appearance of surface microcracks, which reduce their mechanical strength [42]. While the processing of compacts requires much less effort, and surface defects, if they appear, will be successfully eliminated at the subsequent stage of sintering [44, 45].

It can be said that GCM has already become the industry standard for ceramic processing [45]. Machining types include drilling, turning and milling [46].

When machining green compacts, a lot of dust is usually generated, so an exhaust fan is usually installed near the cutting tool. It is advisable to collect dust for further processing.

Although diamond tools are preferred for GCM, many operations can usually be performed with HSS tools [47]. However, HSS tools are subject to rapid wear due to the abrasive properties of ceramic powders. This negatively affects the surface quality of the compacts. However, the surface quality tends to improve with subsequent sintering, accompanied by mass transfer and curing of defects.

Contactless GCM with lasers is a promising direction in the development of technologies [48]. Laser processing is applicable for compacts with a solid phase content of less than 40 vol.% [49]. The material is gradually evaporated layer by layer using a CO₂ laser. The effective process temperature was 600 °C, which is much lower than the temperature required to process the sintered ceramics and therefore cheaper.

The methods described above are relevant for the formation of ceramics from promising inorganic materials, which will become widespread in the near future [50 - 52].

1.5.3 Static dry pressing methods

Uniaxial dry pressing in hermetically sealed rigid molds

One-sided pressing in closed rigid molds is the most common type of dry pressing. The method is easily automated and has high productivity. Removal of the binder is not a problem due to its complete absence or low content. However, the mechanical stress in the wet body is the main disadvantage of dry pressing. The problem gets worse as the packing pressure increases. The elastic aftereffect under conditions of an uneven distribution of density over the volume can turn into defects and the appearance of cracks when the raw body is removed from the mold.

Understanding the origin of the processes, you can compensate for their negative consequences. For example, preliminary evacuation of the bulk of the powder body removes the absorbed air. However, this preprocessing procedure is rather expensive and rarely used [18].

The powder to be pressed experiences internal and external friction. The internal one involves friction between the powder particles, while the second involves friction between the powder and the walls of the mold. The effects of external friction can be reduced by adding special lubricants to the binder or to the interface between the powder body and the walls of the mold. The use of molds with ceramic surfaces instead of metal ones also reduces external friction, since the ceramic-ceramic friction coefficients are usually much lower than those of cermets [18]. However, such forms are much more expensive.

To improve the uniformity of compacting density, double-sided pressing can be used. In this case, external friction forces act towards each other.

This method is one of the most cost effective for mass production of simple ceramic bodies, especially when the requirements for mechanical properties are not too high.

Collector pressing

The invention of collector molds, first proposed by the staff of the Research and Development Center for Nanomaterials and Nanotechnologies of Tomsk Polytechnic University [53], has become one of the major achievements in the technology of uniaxial dry pressing. Figure 4 compares a standard mold (fig. A) and two collector compression molds (fig. B and c). Devices (molds) that implement the collector method consist of two solid or composite forming elements (1, 2) moving oppositely during the pressing process, the surface of each of which contains a part of the passive (5, 6) and a part of the active (7, 8) forming surface. The powder is compacted by their mutual counter displacement of the shaping elements while sliding along each other along the pressing axis [54].



Figure 4 – Cylindrical forms for dry pressing: a - standard form (1 - punch, 2 - matrix); (b) - mold for collector pressing: 1, 2 - shaping elements; 5, 6 - parts of the passive forming surface of the first and second elements of the mold; 7, 8 - part of the active forming surface of the first and second elements of the mold; 10 - structural element holding elements 1 and 2 from off-axis movements; 11 - technological groove on the element of the mold to facilitate the loading of the powder [54]

At the stage of pressing, external friction forces with opposite directions are applied to different parts of the passive forming surface, although they are equal in absolute values. This contributes to the equalization of the density throughout the compacted mass.

The number of matrix elements moving in opposite directions can be increased to meet the requirements of specific technological problems associated with the homogeneity of the high density of the compact and low plastic shear deformation in it. Special designs of collector pressing molds have been proposed for various compact forms and potential applications, including bevel gears, mills, turbine impellers and hydraulic pumps, toroidal, spherical and screw-shaped components [55].

However, an increase in the number of independent components has limited potential due to the complexity of their manufacturing technology [56].

Cold isostatic pressing

Cold isostatic pressing, or CIP, is a common pressing method used for molding complex-shaped powders. The powder body is placed in a shell made of an appropriate elastomer (rubber, polyurethane, etc.) and transferred to the chamber of an isostatic press [57]. The press generates high pressure and compresses the elastic membrane and

the molding mass in it from all sides through a liquid medium that serves as a pressure transmission medium. The density in the center of the compact is always lower than in the outer parts, even when a perfect ball is compressed. But the required level of density is usually achieved at a lower external pressure compared to the case of uniaxial pressing. HIP allows one to obtain compacts with a fairly uniform density [58, 59]. The use of HIP virtually eliminates the effects of external friction, although internal friction remains in focus. Correct design of resilient molds also becomes important [60]. Notably, both the size and shape of the resilient mold are always different from the target compact.

HIP is well suited for compacting complex shaped powder molding materials. Among the main disadvantages of the method are the high cost of isostatic presses and the need to manufacture and replace disposable elastic molds. Nevertheless, this method is quite often used as an auxiliary compaction step to improve the quality of compacts obtained by other methods.

Quasi-isostatic pressing

Quasi-isostatic pressing also belongs to static methods of dry pressing. The instrumentation allows realizing the isostatic pressing mode using a standard uniaxial press without the use of liquid, as in the case of the CIP [61–64]. Isotropic pressure transmission is achieved by deformation of a thick-walled elastic shell under uniaxial compression. The idea behind this method is shown schematically in Figure 5. When pressure is applied to the elastic shell, it deforms and thus transfers pressure in all directions. The compacts made by this method have density differences when passing from the surface of the punch to the peripheral parts of the compact, as in the case of HIP.

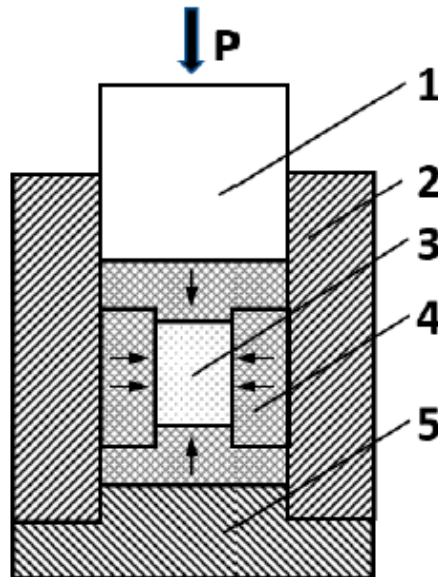


Figure 5 – Diagram of a cylindrical press for quasi-isostatic pressing: 1 - punch; 2 - matrix; 3 - cylindrical powder; 4 - elastomer; 5 – base

Quasi-isostatic pressing can be carried out on standard uniaxial presses, and this is the main advantage of this method. The complexity of the design and manufacture of elastic shells, the difficulty in obtaining raw bodies of exact dimensions (especially in the case of complex shapes) are the disadvantages of the method. Nevertheless, quasi-isostatic pressing can find application for compacting bodies of complex shapes if it is possible to produce an elastic shell with the required shape-generating cavity. In the manufacture of such casings, help can be found in rapidly advancing additive technologies.