

**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

---

Инженерная школа новых производственных технологий  
Направление подготовки *Материаловедение и технологии материалов*  
Отделение материаловедения

**БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА**

Тема работы
Структура, механические свойства и особенности поведения при деформации пористой керамики на основе диоксида циркония

УДК 666.3-127.546.83:539.374

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4Б41	Орлова Елена Сергеевна		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
н.с. ИФПМ СО РАН	Севостьянова И.Н.	к.т.н.		

**КОНСУЛЬТАНТЫ:**

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
старший преподаватель	Гаврикова Н.А.			

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ассистент	Раденков Т.А.			

**ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:**

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Материаловедение в машиностроении	Овечкин Б.Б.	к.т.н., доцент		

Томск – 2018 г.

*Планируемые результаты обучения по ООП 22.03.01 Материаловедение и технологии материалов (бакалавриат)*

<b>Код результата</b>	<b>Результат обучения (выпускник должен быть готов)</b>
P1	Применять основные положения и методы гуманитарных наук при решении социально-общественных и профессиональных задач в области материаловедения и технологии материалов
P2	Использовать современное информационное пространство при решении профессиональных задач в области материаловедения и технологии материалов
P3	Разрабатывать, оформлять и использовать техническую документацию, включая нормативные документы по вопросам интеллектуальной собственности в области материаловедения и технологии материалов
P4	Проводить элементарный экономический анализ ресурсов, технологий и производств при решении профессиональных задач в области материаловедения и технологии материалов
P5	Эффективно работать в коллективе на основе принципов толерантности, использовать устную и письменную коммуникации на родном и иностранном языках в мультикультурной среде
P6	Эффективно выполнять трудовые функции по реализации высокотехнологичных производств материалов и изделий
P7	Проводить комплексную диагностику материалов, процессов и изделий с использованием технических средств измерений, испытательного и производственного оборудования
P8	Готовность к мотивированному саморазвитию, самоорганизации и обучению для обеспечения полноценной социальной и профессиональной деятельности в области материаловедения и технологии материалов
P9	Успешно использовать методы и приемы организации труда, обеспечивающие эффективное, экологически, социально и технически безопасное производство
P10	Использовать принципы производственного менеджмента и управления персоналом в производственной деятельности в области материаловедения и технологии материалов

**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

---

Институт *физики высоких технологий*

Направление подготовки *Материаловедение и технологии материалов*

Кафедра *Материаловедение в машиностроении*

УТВЕРЖДАЮ:

Зав. кафедрой

\_\_\_\_\_ Панин С.В.

**ЗАДАНИЕ**

**на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

бакалаврской работы

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

Студенту:

Группа	ФИО
4Б41	Орлова Елена Сергеевна

Тема работы:

Структура, механические свойства и особенности поведения при деформации пористой керамики на основе диоксида циркония

Утверждена приказом директора ИФВТ

Приказ № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

Срок сдачи студентом выполненной работы:

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

<b>Исходные данные к работе</b>	Объектом исследования данной работы является диоксид циркония стабилизированный 5.5 вес.% оксидом иттрия. Пористость исследованной керамики изменялась от 2 до 40 %, размер зерна – от 0.53 до 1.55 мкм.
<b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b>	<ol style="list-style-type: none"><li>1. Провести литературный обзор по структуре и свойствам керамики на основе диоксида циркония, по свойствам и методам получения пористых керамических материалов.</li><li>2. Получить пористую керамику на основе диоксида циркония в широком диапазоне пористости и размера зерна, используя в качестве порообразователя органический наполнитель.</li><li>3. Исследовать поровую и зёрненную структуру полученной керамики, провести испытания образцов на твердость, на осевое сжатие, изучить фазовый состав керамики в зависимости от размера зерна и пористости</li></ol>

	после спекания и после деформации. <b>4.</b> Провести анализ полученных результатов, построить зависимости свойств от размера зерна и пористости, обобщить полученные результаты, сделать заключение по проделанной работе.
--	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

**Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы**

*(с указанием разделов)*

Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент...	Н.А. Гаврикова старший преподаватель НИ ТПУ
Социальная ответственность	Т.А. Раденков ассистент НИ ТПУ

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

Реферат

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

**Задание выдал руководитель:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
научный сотрудник ИФПМ СО РАН	Севостьянова И.Н.	к.т.н.		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4Б41	Орлова Е.С.		

## РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 85 с., 34 рис., 19 табл., 31 источника.

Ключевые слова: диоксид циркония, пористая керамика, размер зерна, пористость, твердость, вязкость разрушения, предел прочности при сжатии.

Объектом исследования является диоксид циркония стабилизированный 5.5 вес.% оксидом иттрия. Пористость исследованной керамики изменялась от 2 до 40 %, размер зерна – от 0.53 до 1.55 мкм.

Цель работы: исследование влияния размера зерна и пористости на структуру, фазовый состав и механические свойства пористой керамики  $ZrO_2-5.5\text{вес.}Y_2O_3$ .

В процессе работы проводилось исследование структуры, механических свойств и фазового состава образцов методами: оптической электронной микроскопии; растровой электронной микроскопии; измерение твердости по Виккерсу; рентгеноструктурного анализа. Определение среднего размера зерна керамики, металлографической пористости проводили в программе ImageJ. Обработка результатов исследования методом рентгеноструктурного анализа проводилась в программе Repeh.

В результате исследования получена пористая керамика на основе диоксида циркония в диапазоне пористости 2-40 % и размера зерна от 0.53 до 1.55 мкм. Исследовано: влияние режимов получения керамики на размер зерна и морфологическое строение поровой структуры; влияние пористости на появление моноклинной фазы в исходных образцах и в образцах подвергнутых испытанию на сжатие; влияние размера зерна и пористости на твердость, вязкость разрушения и предел прочности при сжатии образцов диоксида циркония.

Пористая керамика находит широкое применение в качестве огнеупорного материала, фильтров и материалов медицинского назначения в качестве остеозамещающих элементов (протезов).

В полученном материале, с развитой поровой структурой, под нагрузкой происходит мартенситное превращение из тетрагональной в моноклинную фазу. Это должно способствовать повышению вязкости разрушения, а также надежности и долговечности пористой керамики, в условиях, например, мало- и многоциклового усталости.

## ABSTRACT

Graduation qualification thesis contains 85 p., 34 fig., 19 tables and 31 literary sources.

Keywords: zirconia, porous ceramics, grain size, porosity, hardness, fracture toughness, ultimate compression strength.

Object of a research is zirconia stabilized 5.5 weight % yttrium oxide. The porosity of the studied ceramics changed from 2 to 40%, the grain size – from 0.53 to 1.55 micrometers.

The purpose of the study was research of influence of the grains size and porosity on structure, phase composition and mechanical properties of porous ceramics  $ZrO_2$ -5.5 weight %  $Y_2O_3$ .

The research of structure, mechanical properties and phase composition of samples was conducted by methods: optical microscopy; scanning electron microscopy; Vickers hardness test; X-ray diffraction. Determination of the average size of grain of ceramics, metallographic porosity carried out in the program ImageJ. Processing of results of a research by method of the X-ray diffraction analysis was carried out in the program Renex.

As a result of a research the porous ceramics on the basis of zirconia in the range of porosity of 2-40% and the grain size from 0.53 to 1.55 micrometers is received. It is investigated: influence of sintering regimes of ceramics on the grain size and morphological structure of porous structure; influence of porosity on emergence of a monoclinic phase in initial samples and in samples after compression test; influence of the grain size and porosity on the hardness, fracture toughness and compression strength of samples of zirconia.

The porous ceramics finds broad application as a refractory material, filters and medical materials as osteosubstaining elements (endoprotheses).

In the received material, with the developed porous structure, under loading there is a martensitic transformation from tetragonal into a monoclinic phase. It has to promote increase in fracture toughness and also reliability and durability of porous ceramics, under conditions such as low and multi-cycle fatigue.

## Содержание

ВВЕДЕНИЕ .....	9
1. Литературный обзор .....	11
1.1 Структура и свойства керамических материалов на основе $ZrO_2$ .....	11
1.1 Диаграмма состояния $ZrO_2—Y_2O_3$ .....	13
1.2 Механизмы упрочнения частично стабилизированного диоксида циркония.....	15
1.3 Пористые керамические материалы. ....	17
1.4 Получение пористой керамической керамики. Порообразователи.....	19
1.5 Механические свойства пористых материалов .....	22
1.6 Применение пористых керамических материалов.....	25
2 Материалы и методы исследования.....	27
3 Экспериментальная часть. ....	34
3.1 Структура пористых образцов керамики $ZrO_2(Y_2O_3)$ .....	34
3.2 Фазовый состав образцов керамики $ZrO_2(Y_2O_3)$ .....	42
3.3 Влияние пористости и размера зерна на механические свойства образцов керамики $ZrO_2-5.5\text{вес.}\%Y_2O_3$ .....	46
4 Результаты проведенного исследования .....	51
5. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение..	54
5.1 Технико-экономическое обоснование научно-исследовательской работы .....	54
5.2 Потенциальные потребители результатов исследования .....	55
5.3 SWOT-анализ.....	56
5.4 Планирование комплекса работ по проведению НТИ .....	58
5.4.1 Определение трудоемкости работ .....	59
5.4.2 Техническая готовность НТИ .....	60
5.4.3 Построение графика работ .....	62
5.4.4 Расчет бюджета затрат на НТИ.....	64
6. Социальная ответственность .....	69
6.1 Производственная безопасность.....	69

6.1.1. Анализ вредных и опасных факторов производственных факторов.....	70
6.2 Безопасность в чрезвычайных ситуациях.....	74
6.2.1 Анализ вероятных ЧС, которые могут возникнуть на рабочем месте при проведении исследований .....	74
6.2.2. Обоснование мероприятий по предотвращению ЧС и разработка порядка действия в случае возникновения ЧС .....	75
6.3 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности .....	76
6.3.1 Специальные (характерные для проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства .....	76
6.3.2 Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны .....	77
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	80
СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ .....	81
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	82



## ВВЕДЕНИЕ

Материаловедение, как наука предполагает изучение взаимосвязи свойств и структур. Полученные знания применяются не только для создания новых материалов, но и для улучшения свойств уже имеющихся. Именно к таким материалам относится частично стабилизированный диоксид циркония. Керамические материалы на его основе давно известны и применяются в различных областях науки и техники.

Керамика на основе диоксида циркония, в отличие от других керамик, обладает уникальным механизмом увеличения вязкости, когда тетрагональная фаза превращается в полях внутренних напряжений в моноклинную, обуславливая сочетание высоких значений прочности и вязкости разрушения материала [1]. В работах [1, 2] установлено, что превращение тетрагональной фазы в моноклинную под действием напряжений определяется тремя основными факторами:

(1) содержанием растворенного стабилизатора, уменьшение количества которого приводит к спонтанному превращению в моноклинную фазу;

(2) размером зерна, причем при его увеличении выше некоторого критического значения происходит спонтанное превращение в моноклинную фазу;

(3) внутренними напряжениями, стабилизирующими тетрагональную фазу. Поэтому соотношение этих трех факторов существенно влияет на реализацию механизмов упрочнения.

Литературные данные свидетельствуют о том, что наличие пористости препятствует подобному превращению [3, 4]. Сложность получения высокопористой керамики на основе диоксида циркония, способной испытывать мартенситное превращение, заключается в том, что при традиционном методе частичного спекания порошков, не удается получить керамику одновременно с большим объёмом остаточной пористости и достаточно крупными зёрнами тетрагональной фазы для реализации мартенситного превращения из тетрагональной фазы в моноклинную под

нагрузкой. Для получения керамик на основе диоксида циркония с высокой пористостью целесообразно использовать методы высокотемпературного спекания с добавлением порообразующих добавок, что даст возможность получать материалы, сочетающие развитую поровую структуру с достаточно крупным размером зерен тетрагональной фазы.

Цель настоящей работы – исследование влияния размера зерна и пористости на структуру, фазовый состав и механические свойства пористой керамики  $ZrO_2$ -5.5вес. $Y_2O_3$ .

## 1. Литературный обзор

### 1.1 Структура и свойства керамических материалов на основе $ZrO_2$

Диоксид циркония  $ZrO_2$  представляет собой белый кристаллический порошок и является тугоплавким соединением с преимущественно ионной межатомной связью. Температура плавления составляет  $2700\text{ }^\circ\text{C}$ . Чистого оксида в природе не встречается, поэтому его добывают из минерала бадделеита ( $ZrO_2$ ) и циркона ( $ZrSiO_4$ ) (рисунок 1).



а)

б)

Рисунок 1 — а) минерал бадделеит; б) минерал циркон

Бадделеит является рудой циркония. Кристаллы имеют пластинчатый вид с твердостью в 6,5 по шкале Мооса. В промышленности используется не только, как сырье для керамической промышленности, но и для создания огнеупоров так, как имеет высокую температуру плавления.

Циркон — ортосиликат циркония. В природе циркон встречается в виде кристаллов, обычно короткостолбчатых, изометрических, иногда дипирамидальных, реже в виде неправильных зерен. Твердость по шкале Мооса колеблется от 7-8. Циркон является не только минералом-источником для циркония и гафния, но и для таких редких элементов, как уран. Циркон также как и бадделеит используется в качестве огнеупоров.

Керамические материалы на основе диоксида циркония представляют огромный практический интерес, обусловленный следующими отличительными характеристиками данных материалов [5]:

- уникальное сочетание высоких показателей вязкости разрушения и прочности;
- низкая смачиваемость жидкими металлами и стеклами;
- высокая термическая прочность;
- химическая инертность;
- особые электрофизические свойства;
- низкая теплопроводность.

Все вышеперечисленные свойства позволяют использовать его в различных практических приложениях: топливных ячейках, каталитических системах, кислородных сенсорах, керамических биоматериалах, а также в различных областях микроэлектроники [6].

Высокие показатели прочности в сочетании с высокими показателями вязкости разрушения достигаются благодаря полиморфным превращениям диоксида циркония, существующего в следующих модификациях:

- высокотемпературная гранецентрированная кубическая  $c\text{-ZrO}_2$ ;
- среднетемпературная тетрагональная  $t\text{-ZrO}_2$  (присутствует во многих циркониевых керамиках, имеет способность переходить в моноклинную под действием внешних напряжений);
- низкотемпературная моноклинная  $m\text{-ZrO}_2$  (встречается в природе в виде бадделеита).

Параметры кристаллических решеток диоксида циркония приведены в таблице 1.

Таблица 1 — Параметры кристаллической структуры диоксида циркония [7]

Модификация		Моноклинная	Тетрагональная	Кубическая
Пространственная группа		$C_{2h}^5 - P2_1/b$	$D_{4h}^{15} - P4_2/nmc$	$O_h^5 - Fm3m$
Температура		от 237°C до 1160°C	от 2370 °C до 1160°C	от $T_{пл}$ 2680 °C до 2360 °C
Параметры решетки	a, нм	0,5145	0,364	0,50862
	b, нм	0,52075	—	—
	c, нм	0,53107	0,527	—
	$\beta$	99,194	—	—
	c/a	—	1,445	—

Фазовый переход мартенситного типа  $ZrO_2$  тетрагональной модификации ( $t-ZrO_2$ ) в моноклинную ( $m-ZrO_2$ ) обеспечивает существенное увеличение вязкости разрушения, прочности и сопротивления термическому удару. Эффект трансформационного упрочнения обуславливает достигнутый уровень свойств этих материалов [7].

Полиморфные превращения зависят не только от температуры, но и от других факторов. Например, переход из тетрагональной фазы в моноклинную может происходить под действием внешних напряжений. Возможность существования метастабильных высокотемпературных модификаций  $t,c-ZrO_2$  при комнатной температуре экспериментально доказана в работах [8-9].

Для стабилизации высокотемпературных фаз, интерес к которым обусловлен их высокими физико-механическими свойствами, широко используют оксиды структурно близкие диоксиду циркония, такие как  $Y_2O_3$ ,  $MgO$ , и  $CaO$ . От их концентрации зависит разность свободных энергий, которая и является движущей силой полиморфных превращений.

Стабилизация  $ZrO_2$  основана на образовании с одним из указанных оксидов твердого раствора кубической системы устойчивого в широком диапазоне температур.

В зависимости от концентрации стабилизирующего вещества различают два вида диоксида циркония:

➤ Полностью стабилизированный. Концентрация стабилизатора равна или превышает следующие концентрации:  $CaO - 7,9 \%$ ,  $MgO - 5,86 \%$ ,  $Y_2O_3 - 13,75 \%$ .

➤ Частично стабилизированный. Концентрация стабилизатора меньшая, чем при полной стабилизации.

### 1.1 Диаграмма состояния $ZrO_2—Y_2O_3$

Существует более 30 вариаций диаграмм состояния  $ZrO_2—Y_2O_3$ . По этой теме было опубликовано большое количество работ с разными

вариациями диаграммы. Вероятно, это связано с изучением кристаллической структуры быстро охлажденных образцов так, как невозможно изучать образцы при высоких температурах (выше 2000 °С), а также с разными используемыми методами: дилатометрия, акустические методы анализа, комбинационное рассеяние, дифференциальный термический анализ и другие.

Так, в 2014 году в работе [10] с помощью рентгеноструктурного анализа была построена пространственная диаграмма состояния системы Zr-Y-O, которая позволила объяснить разнообразие фаз и уникальное сочетание свойств. Однако более распространенной и известной является двойная диаграмма системы  $ZrO_2$ — $Y_2O_3$  (рисунок 2).

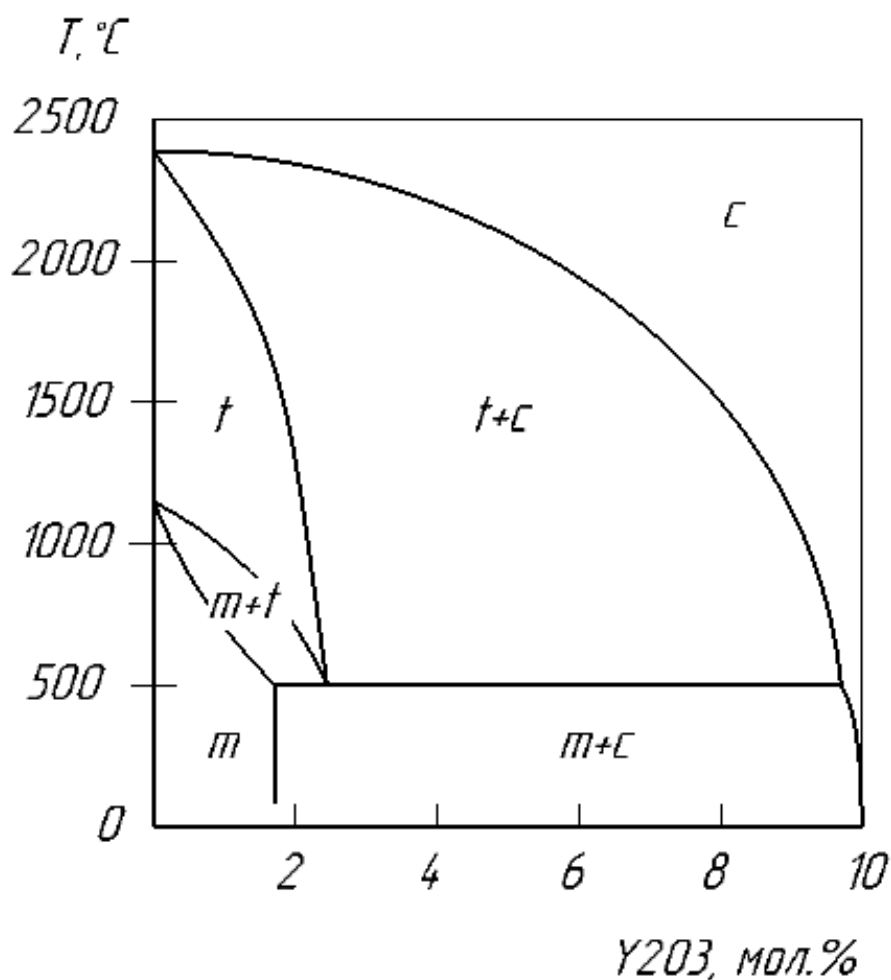


Рисунок 2 — Двойная диаграмма состояния системы  $ZrO_2$ — $Y_2O_3$

Как было сказано выше,  $ZrO_2—Y_2O_3$  может существовать в трех модификациях. Область низкотемпературной моноклинной фазы (m) с повышением температуры переходит в состояние моноклинно-тетрагональной (m+t) фазы т.е. в двухфазное состояние и с последующим повышением температуры — в тетрагональную фазу (t). Данные переходы осуществимы для раствора с концентрацией  $Y_2O_3$  менее 2,5 %.

Превращение  $t \rightarrow m$  в  $ZrO_2$  — мартенситное, его особенность заключается в соответствии параметров решетки моноклинной и тетрагональной фаз, что в свою очередь обуславливает положительный объемный дилатационный эффект превращения 3-4 % и величину сдвиговой деформации  $\approx 10\%$ .

При концентрации оксида иттрия выше 2,5 % существуют двухфазные области с кубической модификацией. До 500 °С моноклинная и кубическая (m+c), после — тетрагональная и кубическая (t+c). При концентрации оксида иттрия более 10% происходит образование однофазного кубического твердого раствора.

## 1.2 Механизмы упрочнения частично стабилизированного диоксида циркония

Рассмотрим два вида упрочнения частично стабилизированного диоксида циркония.

Первый вид — трансформационный, названный так по наличию тетрагонально-моноклинного перехода, обусловленного наличием большого напряжения вокруг трещины, которое и оказывает влияние на тетрагональную фазу, дестабилизируя ее и способствуя переходу в моноклинную. На рисунке 3 показана схема трансформационного упрочнения.

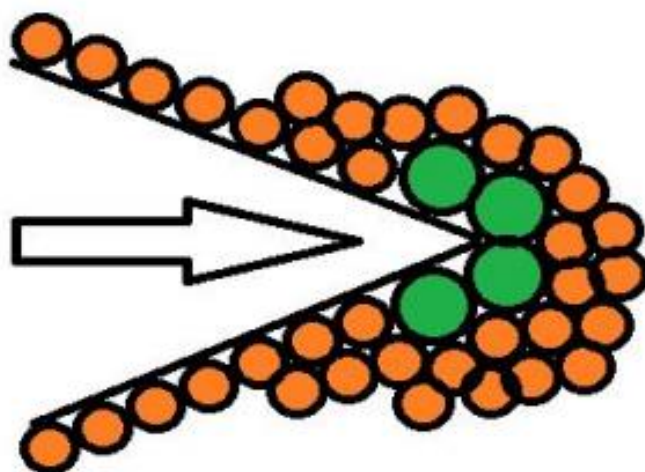


Рисунок 3 — Распространение трещины в частично стабилизированном диоксиде циркония. Тетрагональная фаза выделена оранжевым цветом, моноклинная — зеленым. Стрелкой указано направление распространения трещины [11]

На рисунке 3 показано, что при распространении трещины и возникновении напряжения в зоне ее роста происходит тетрагонально-моноклинное превращение. Моноклинная фаза, имея больший размер кристаллической решетки, нежели тетрагональная, блокирует дальнейшее распространение трещины.

Концентрация оксида иттрия оказывает значительное влияние на значение трещиностойкости, увеличивая его. Однако при этом необходимо сохранить объем тетрагональной фазы так, как кубическая и моноклинная фазы имеют механические свойства уступающие свойствам тетрагональной фазы. Из диаграммы состояния можно заключить, что оптимальной концентрацией оксида иттрия, для сохранения тетрагональной фазы и предотвращения тетрагонально-моноклинного перехода, является концентрация в 2-3 моль.% [12].

Вторым видом упрочнения является ферроупругое упрочнение [13]. Суть процесса заключается в переориентации доменов, возникающих под действием внешних напряжений. Такое упрочнение наблюдается только в тетрагональной фазе диоксида циркония. В кубической и моноклинной фазах



данного вида упрочнения нет. Тетрагональная фаза формирующегося кристалла или отдельного зерна имеет шесть вариантов ориентации кристаллографических ориентаций оси. Все варианты обладают одинаковой энергией и при приложении напряжения могут его изменять, т.е. в процессе приложения нагрузки к материалу, в нем происходит смена одного равновесного состояния на другое. При температурах до 1200 °С задействованы оба вида деформационного упрочнения. При дальнейшем увеличении температуры остается лишь ферроупругий механизм упрочнения так, как при данных температурах не происходит тетрагонально-моноклинного перехода [13].

### 1.3 Пористые керамические материалы.

Керамика производится с разными структурами: плотной и пористой. Оба вида активно применяются в самых разных областях [5]. Использование пористых керамических материалов обусловлено появлением дополнительных свойств при диспергировании. По сути поры в материале являются дефектами, снижающими прочностные характеристики этого материала, однако в то же время они являются антагонистами концентраторов напряжений в вершинах трещин, что положительно влияет на прочность материала.

Обычные свойства керамик — теплоизоляция, стойкость к коррозии и износу, сопротивление эрозии, уникальные электронные свойства, биоустойчивость и высокая удельная прочность [7]. При диспергировании к ним добавляются следующие: низкая плотность, низкая теплопроводность, контролируемая проницаемость, высокая площадь поверхности, низкая диэлектрическая постоянная и улучшенные пьезоэлектрические свойства.

Пористые керамические материалы не лишены недостатков. Наличие пор в объеме материала, как уже было сказано выше, значительно снижает механическую прочность и уменьшает деформационную способность данного материала.

Керамические материалы отличаются низкой величиной вязкости разрушения, обусловленной ионной и ковалентной связью в данных материалах. Однако керамика на основе частично стабилизированного диоксида циркония частично лишена данного недостатка и имеет высокую по сравнению с другими керамическими материалами, вязкость разрушения. Данная особенность обусловлена наличием двухфазной структуры, преобладающей в которой является нестабильная тетрагональная фаза, которая переходит в моноклинную модификацию, попадая в поле напряжений трещины. В виду того, что объем кристаллической решетки моноклинной фазы больше тетрагональной трещина оказывается в статическом состоянии без возможности дальнейшего развития. Наличие данного механизма не спасает циркониевую керамику от негативного влияния пор — существенного снижения прочности [10].

Механические свойства керамик зависят от размера зерна. Используя данную особенность керамических материалов, исследователи пытаются добиться повышения прочностных характеристик пористых керамических материалов.

Свойства последних также в значительной степени зависят от размера, формы, расположения и концентрации пор в нем. Данному вопросу посвящены многие работы последнего десятилетия [14-15].

Пористые материалы разделяют на два вида по типу структуры:

- ячеистая;
- зернистая.

Пористость ячеистой керамики может достигать 90%, в то время как пористость зернистой керамики ограничивается 40%. Материалы данных видов могут значительно отличаться по свойствам.

Пористые материалы разделяют на три класса в зависимости от размера пор [16]:

- макропористые ( $d > 50$  нм);
- мезопористые ( $50$  нм  $> d > 2$  нм);

- микропористые ( $d < 2$  нм).

Пористость, а, следовательно, и механические характеристики пористых материалов, зависят от размера начальных порошков, давления формования, температуры и времени спекания. Также на размер и количество пор влияют добавки, их тип и количество.

Одним из исследуемых вопросов является поиск наиболее оптимального способа получения пористых материалов.

#### 1.4 Получение пористой керамической керамики. Порообразователи.

В настоящее время наиболее распространенными методами получения пористой керамики являются следующие [17]:

- метод вспенивания;
- метод химического порообразования;
- использование монофракционных составов исходных сырьевых веществ;
- метод выгорающих добавок.

Методы вспенивания и химического порообразования позволяют получать поры необходимого размера, однако цена компонентов делает процесс порообразования экономически невыгодным.

Использование монофракционных составов исходных сырьевых веществ налагает определенные требования к последним, в результате чего усложняется технология подготовки порошков, а также увеличивается стоимость процесса.

Наиболее традиционным способом получения пор в керамических материалах является метод выгорающих добавок, который заключается в добавлении к исходному порошку порообразующего агента, который распределяется по всему объему порошка. Далее порошок формуется и спекается. В результате спекания порообразователь выгорает и в объеме образца образуются поры [18]. Данный процесс проиллюстрирован на рисунке 4.

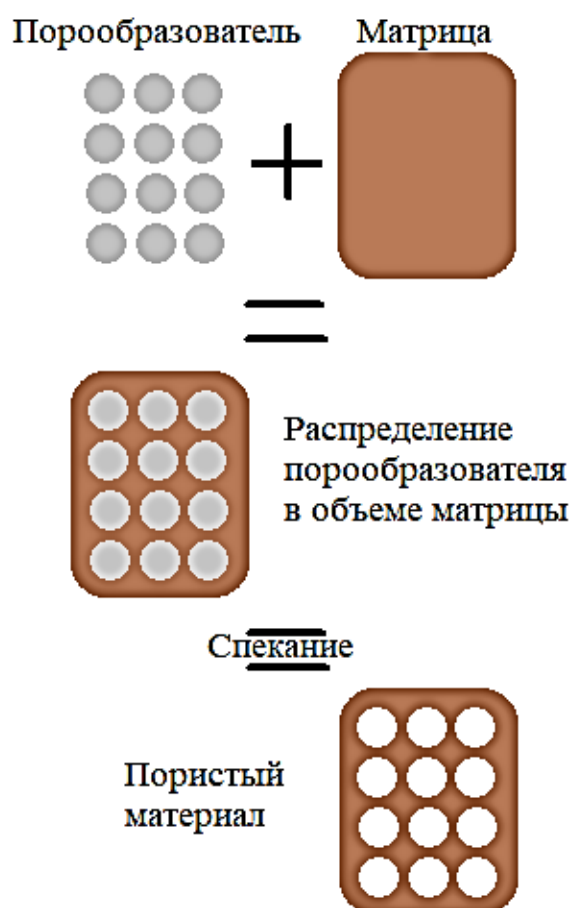


Рисунок 4 — Схема реализации метода выгорающих добавок для получения пористой керамики

Порообразующие агенты можно разделить на четыре группы [19]:

- синтетические органические вещества (полимерные шарики, органические волокна и т.д.);
- натуральные органические вещества (картофельный крахмал, целлюлоза, хлопок и т.д.);
- металлические и неорганические вещества (никель, углерод, летучая зола, частицы стекла);
- жидкости (вода, гель, эмульсии и т.д. ).

В данной работе внимание сконцентрировано на натуральных органических веществах. Среди них особое место занимает крахмал, многообещающий и перспективный порообразователь. Так в работе [20] крахмал выступал в качестве порообразователя для изготовления керамических изделий методом шликерного литья. Метод основан на

способности гипсовых форм впитывать воду и способности шликера отдавать ее. Шликером называется густая тестообразная масса из смеси замешанных на воде силикатных материалов и различных добавок. Полученная данным способом форма проходит термическую обработку, в результате чего получается готовое керамическое изделие. Шликерное литье отличается такими недостатками, как высокая длительность получения одной заготовки, необходимость изготовления форм и потребность в сушильном аппарате. Авторы работы отметили не только способность крахмала к выгоранию, но и способность впитывать воду, что позволяет получать поры больших размеров. Несмотря на недостатки шликерного литья исследования продолжились.

В работах [21-23], были рассмотрены различные керамические порошки и коммерчески доступные виды крахмала в качестве порообразователя. Использовался крахмал различного происхождения для получения недорогих пористых керамических изделий. На рисунке 5 представлены некоторые из этих крахмалов вместе с другими естественными органическими веществами.

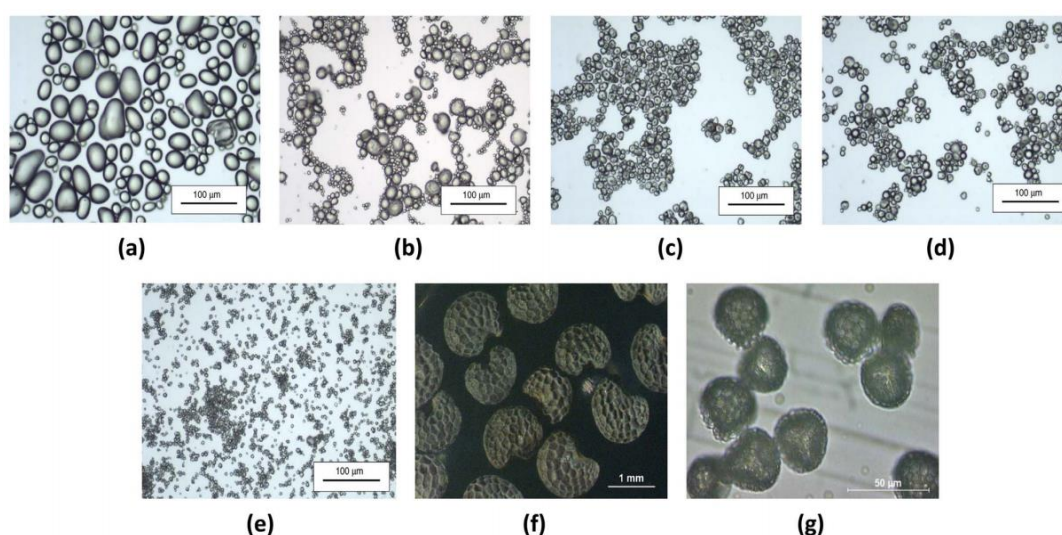


Рисунок 5 — Натуральные органические вещества. (a) — картофельный крахмал; (b) — пшеничный крахмал; (c) — крахмал тапиоки; (d) — кукурузный крахмал; (e) — рисовый крахмал; (f) — мак; (g) — плаун споры

[18]

Авторы работы исследовали размер и форму получаемых пор в зависимости от вида крахмала. Все исследуемые образцы были распределены по размерам получаемых пор. Картофельный крахмал показал самый большой размер пор, однако полученные поры отличались анизометрической формой. Остальные же виды крахмала, уступая в размерах, показывали более изометрические формы пор.

Исследования крахмала в качестве порообразователя не ограничились определением взаимосвязи между типом крахмала и видом пор. В работе [24] исследовалась зависимость между количеством порообразователя и свойствами получаемого материала. Увеличение содержания крахмала с 0 до 30 % вызывало увеличение пористости и уменьшение коэффициента теплопроводности, тогда как предел прочности при сжатии сохранялся на относительно высокой отметке. Однако дальнейшее увеличение количества крахмала до 40 % ухудшило механические свойства и привело к краху пористой системы. Образцы не были спечены полностью и стали подвержены трещинам.

Суммируя все вышесказанное можно заключить, что получение необходимой пористой структуры зависит не только от типа порообразующего агента — жидкого, металлического, органического синтетического, но и от вида этого агента, от его объемного содержания и происхождения.

### 1.5 Механические свойства пористых материалов

В приведенных выше главах был дан обзор пористых керамических материалов, обсуждены способы получения пор в керамике. В данном разделе будет уделено внимание влиянию пористости на механические свойства образцов керамических материалов.

Выше уже упоминалось о зависимости количества порообразователя, следовательно, о плотности пористости и механических свойствах. При

превышении порога в 30 % образцы резко снижали прочностные характеристики, начиная разваливаться.

Работа [25] также посвящена исследованию взаимосвязи между механическими свойствами, пористостью и средним размером пор.

Посредством испытаний прочности на изгиб пористых образцов глинозема, полученных с помощью рисовой шелухи и сахарозы, авторы получили следующие результаты. Образцы с самым низким содержанием порообразователя (20 %), имеющие наименьшую пористость и размер пор (50 мкм) показали самую высокую прочность на изгиб в 207 МПа. В то же время образцы с самым высоким содержанием порообразователя (66 %), имеющие наибольшую пористость и размер пор (516 мкм) имели самую низкую прочность на изгиб в 22.3 МПа. Подобный результат также наблюдался для образцов после испытаний на предел прочности при сжатии, в которых прочность увеличивалась с 9.18 до 180 МПа, с уменьшением пористости от 66 до 20 об.% и размера пор от 516 до 50 мкм. В работе было показано, что механические свойства пористых образцов глинозема уменьшаются по экспоненте с увеличением пористости и размера пор до 50% пористости и размера пор 400 мкм.

Авторы подчеркнули присутствие муллита, силиката алюминия, получаемого из реакции между глиноземом и кварцем, как фактор уплотнения стенок пор и достижения высокого предела прочности при сжатии в пористой керамике глинозема.

Для пористой керамики на основе SiC также соблюдается характер взаимосвязи между пористостью и прочностью на изгиб. В работе [26] изменяли содержание кукурузного крахмала с 0 до 20% веса, пористость увеличилась с 34.2% до 42.7%, в то же время наблюдалось уменьшение прочности на изгиб от 139.2 до 86.7 МПа. Авторы данной работы подчеркивали значение сферической формы пор, получаемых с помощью кукурузного крахмала (выше отмечалась разница форм пор, полученных с

помощью с различных видов крахмала), как фактор способствующий облегчению концентрации напряжений.

Исследованию подверглась и взаимосвязь между механическими свойствами пористых керамик и температурой окружающей среды. В работах [27-28] посредством использования высокой температуры и испытания на диаметрально сжатие были исследованы механические свойства основанной на кордиерите спеченной пористой керамики с порообразователями в виде различных типов крахмала: картофельный, маниока и измельченная маниока. Образцы были подвергнуты диаметральному испытанию на сжатие при температурах: комнатная температура, 800 °С, 1000 °С и 1100 °С. Таблица 2 отражает результаты исследований.

Таблица 2 — Результаты испытания на диаметрально сжатие пористой керамики с различными видами порообразователя при различных температурах

Порообразователь	Показатели	Комнатная температура	800 °С	1000 °С	1100 °С
Картофельный крахмал	$\sigma_F$ (Мпа)	10,6±1,5	11,3±1,8	8,2±1,2	4,9±1,1
	$E_a$ (Мпа)	580±160	454±172	153±88	183±101
Маниока	$\sigma_F$ (Мпа)	14,6±2,6	14,0±1,0	13,8±1,3	7,1±2,3
	$E_a$ (Мпа)	1186±345	475±20	442±88	233±135
Измельченная маниока	$\sigma_F$ (Мпа)	13,4±1,0	14,9±1,0	16,3±1,0	10,9±1,0
	$E_a$ (Мпа)	1138±394	478±77	367±80	315±68

Связь между изменением механической прочности и температуры испытания авторы обуславливают влиянием пор их количества и размера на вязкую фазу керамики при высокой температуре. Поры закрывают вязкую фазу, благодаря чему уменьшают ее вклад в скольжение зерна.

Образцы, при изготовлении которых использовался картофельный крахмал, имеют самую низкую прочность  $\sigma_F$ . Авторы связывают это с неэффективным взаимодействием крахмальных пор с вязкой фазой. С повышением температуры с 800 до 1100 °С эффект релаксации напряжения



микротрещин уменьшается и механическая прочность понижается. Однако у образцов с маниокой в качестве порообразователя при тех же температурах не наблюдается изменения прочностных характеристик, что связывается авторами с более эффективным, чем у крахмальных пор взаимодействием пор образованных маниокой с вязкой фазой. Дальнейшие же изменения в прочностных характеристиках при более высоких температурах испытаний авторы связывают с более активной вязкой фазой и ее взаимодействием с порами, при этом подчеркивается, что основным фактором механической прочности образцов была не общая пористость, а размер отдельно взятых пор, исследовавшийся с помощью фрактографии.

Все вышеизложенное подчеркивает взаимосвязь механических свойств пористой керамики, развитой органическими веществами с особенностями пористой структуры.

Механическая прочность пористой керамики зависит в основном от плотности, пористости, размера и распределения пор в объеме материала. Кроме того существует верхний предел содержания порообразователя, после превышения которого механические свойства резко ухудшаются. Также стоит учитывать условия окружающей среды, так как в условиях высоких температур происходит изменение механических свойств.

#### 1.6 Применение пористых керамических материалов.

Пористые керамические материалы широко применяются в промышленности, строительстве и других сферах жизни [7].

Распространенность подобных материалов обусловлена сочетанием уникальных керамических свойств данных материалов и свойств пористых материалов. Замечательные внутренние свойства керамик и морфология пористых структур активно эксплуатируются в системах, работающих в условиях агрессивной окружающей среды, таких как системы фильтрации и теплоизоляции [18].

Высокая тепловая стойкость и стойкость к действию химикатов делает керамические материалы с пористой структурой, подготовленной естественными органическими веществами идеальным кандидатом для фильтрации сточных вод, жидкого металла и горячих газов [9].

Пористые керамические материалы с развитой пористой структурой имеют высокие коэффициент теплопроводности, что обуславливает их активное использование в качестве огнеупоров в теплоизоляционных системах.

Благодаря свойствам химической инертности и износостойкости, а также биологической совместимости пористые керамики активно используют в медицине в качестве имплантов, костей, зубов и т.д.[30]

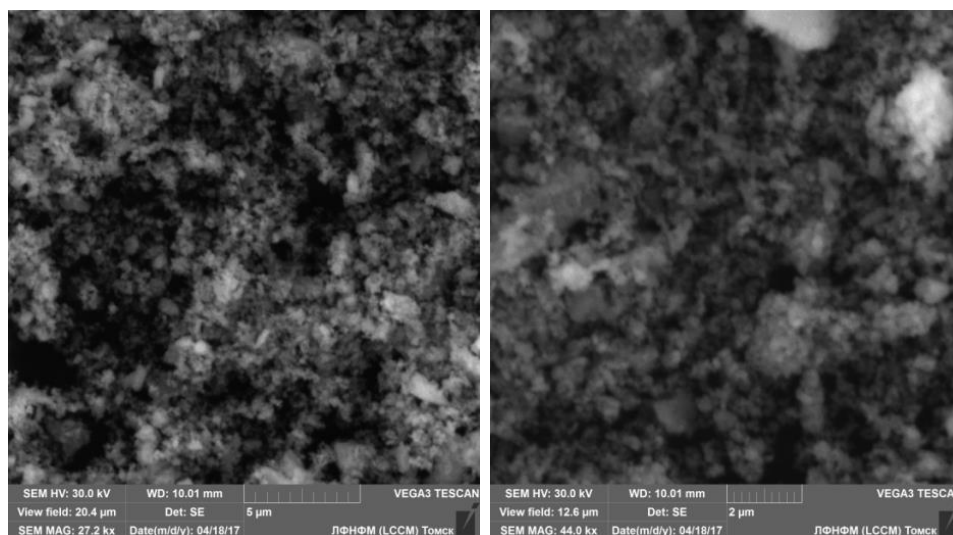
## 2 Материалы и методы исследования

Для проведения исследований, был выбран керамический порошок  $ZrO_2$ -5.5вес.% $Y_2O_3$  производства КНР, со структурной неустойчивостью решетки. Химический состав порошка, по данным производителя, представлен в таблице 3.

Таблица 3 — Результаты определения контролируемых показателей

Наименование	Результаты химического анализа
$ZrO_2+HfO_2$ , %	$\geq 94.4$
$Y_2O_3$ , %	$5.25 \pm 0.25$
$Fe_2O_3$ , %	0.0013
$SiO_2$ , %	0.0093
$TiO_2$ , %	0.001
Потери при прокаливании	0.49

На рисунке 6 показано РЭМ изображение исходного порошка  $ZrO_2$ -5.5вес.% $Y_2O_3$ . Видно, что порошок представляет собой мелкодисперсную смесь агломерированных частиц неправильной формы.



(a)

(б)

Рисунок 6 – Структура порошка  $ZrO_2$ -5.5вес.% $Y_2O_3$

На рисунке 7 представлено распределение размеров частиц порошка, включая агломераты.

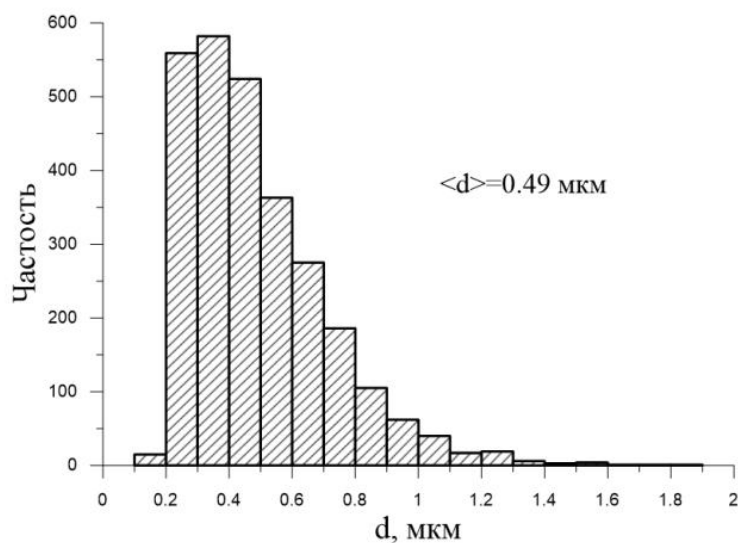


Рисунок 7 — Распределение частиц порошка  $\text{ZrO}_2\text{-}5.5\text{вес.}\%\text{Y}_2\text{O}_3$  по размерам (включая агломераты)

В качестве порообразователя при изготовлении пористых образцов использовали органический наполнитель (крахмал). Готовили порошковые смеси  $\text{ZrO}_2\text{-}5.5\text{вес.}\%\text{Y}_2\text{O}_3$  + органический наполнитель. В порошок добавляли 10, 25, 40, 50, 60 об.% крахмала.

Смешивание порошка с крахмалом проводили всухую в барабанной мельнице с Z-образными и сферическими мелющими телами в течение 24 часов.

Прессование образцов проводили на гидравлическом прессе ПГ-50 в металлической пресс-форме в виде цилиндров размерами  $\varnothing = 9$  мм,  $h = 15$  мм.

Предварительный отжиг прессовок, с целью удаления порообразователя, проводили в воздушной печи в засыпке MgO по режиму, представленному на рисунке 3.

Спекание образцов проводили в муфельной высокотемпературной печи Р310 ЛНТ 02/17 при температурах 1500 и 1600 °С. Время выдержки при

максимальной температуре составляло 1, 3 и 5 часов. Скорость нагрева и охлаждения при спекании составляла 240 °С/час.

На алмазном круге диаметром 125 мм были обточены боковые грани образцов, на 1/3 или на 1/2 диаметра, для получения ровной поверхности.

Полировку боковой поверхности образцов производили с помощью алмазных паст АСМ ГОСТ 25593-83 (СТ СЭВ 206-75) разной зернистости.

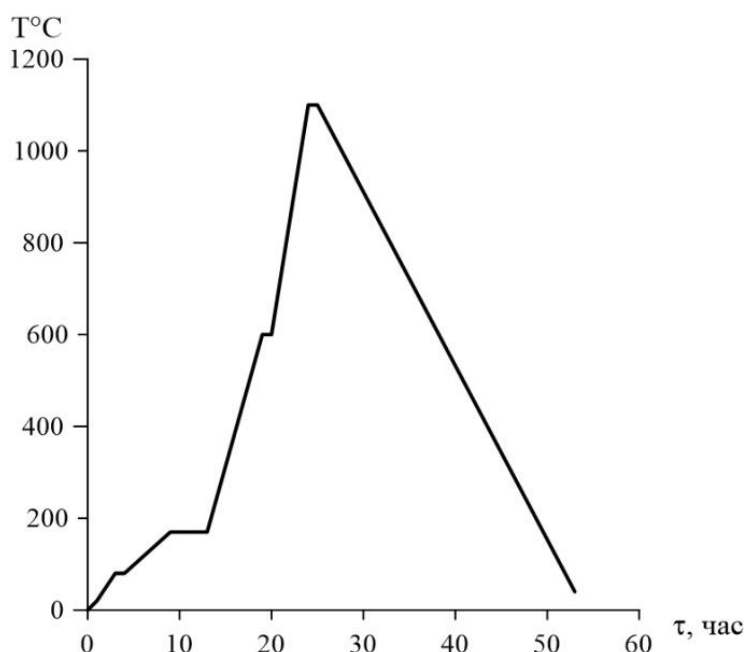


Рисунок 8 – Режим отжига порошковой смеси с порообразователем

Металлографический анализ полированных поверхностей образцов проводили на оптическом металлографическом микроскопе с видео-приставкой «Альтами МЕТ 1М».

Структуру порошков и образцов исследовали на растровом электронном микроскопе VEGA 3TESCAN.

Определение среднего размера частиц порошка и распределение частиц порошка по размерам проводили в программе ImageJ [29].

Теоретическую плотность рассчитывали по формуле:

$$\rho_{\text{общ, теор.}} = \frac{100}{\frac{m_1}{\rho_1} + \frac{m_2}{\rho_2}} \quad (1)$$

где  $m_1$  — вес компонента, %

$\rho_1$  — теоретическая плотность компонента, г/см<sup>3</sup>

Действительную плотность определяли геометрическим методом по формуле:

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{m}{h \cdot \pi \cdot r^2} \quad (2)$$

где  $m$  — масса образца;

$h$  — высота образца;

$r$  — радиус основания образца.

Пористость образцов рассчитывали по формуле:

$$\Pi = \frac{\Delta\rho \cdot 100\%}{\rho_{\text{теор}}} \quad (3)$$

где  $\Delta\rho = \rho_{\text{теор.}} - \rho_{\text{обр.}}$ ;

$\rho_{\text{теор.}}$  — теоретическая плотность образца;

$\rho_{\text{обр.}}$  — действительная плотность образца.

Измерения твердости проводили на приборе «СуперВиккерс» с нагрузкой 10 кг.

Твердость рассчитывали по формуле:

$$HV = 1,854 \cdot P/d^2 \quad (4)$$

где  $P$  — приложенная нагрузка;

$d$  — диагональ отпечатка.

Вязкость рассчитывали по формуле:

$$K_{1c} = \frac{0.035(H \cdot \sqrt{a}) \left(E \cdot \frac{\varphi}{H}\right)^{0,4}}{\varphi \sqrt{(l/a)}} \quad (5)$$

где  $H$  — твердость по Виккерсу;

$\varphi$  — константа ( $\approx 3$ )

$l$  — длина трещины;

$a$  — длина половины диагонали;

$E$  — модуль упругости.

Термическое травление образцов на размер зерна проводили по режиму: Нагрев до температуры 1500 °С. Время нагрева — 4 часа, время выдержки — 20 минут, охлаждение в течение 6 часов (рисунок 9).

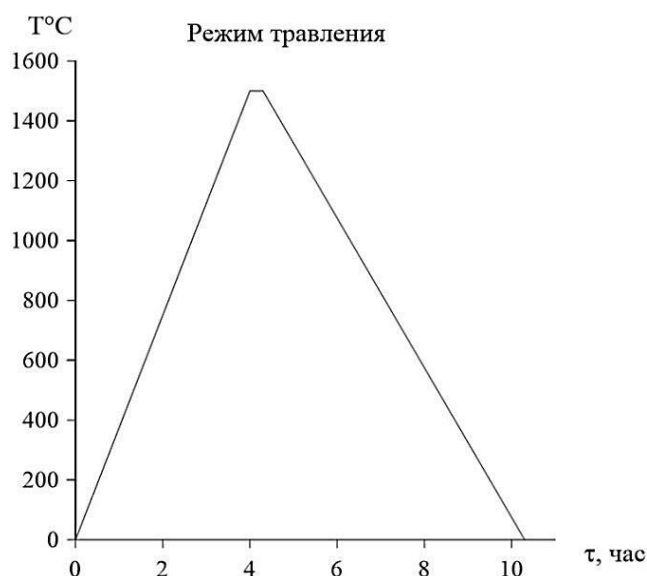


Рисунок 9 — Режим травления керамических образцов на размер зерна

Определение среднего размера зерна керамики при разных режимах спекания и распределение зерна по размерам, а также металлографической пористости и распределение пор по размерам проводили в программе ImageJ [29].

Рентгеновский анализ проводили на дифрактометре рентгеновском общего назначения ДРОН-3 в фильтрованном  $\text{CuK}_\alpha$  излучении в режиме сканирования в интервале углов  $2\Theta$  от 25 до 80° с шагом 0,05°.

Обработку рентгенограмм осуществляли с помощью компьютерной программы Repex на основе оптимизации отклонения аппроксимирующего профиля от экспериментального.

Расчет количества тетрагональной, моноклинной и кубической фаз в образцах проводили по формулам:

Формула расчета моноклинной фазы

$$X_m = 100 - \frac{I_{ct}(111)}{[I_m(111) + I_m(11-1) + I_{tc}(111)]} \cdot 100 \quad (6)$$

где  $I_{ct}(111)$  – максимальная интегральная интенсивность кубической и тетрагональной фаз;

$I_m(111), I_m(11 - 1)$  – максимальная интегральная интенсивность моноклинной фазы;

$I_{tc}(111)$  - максимальная интегральная интенсивность тетрагональной фазы.

Формула расчета соотношения кубической и тетрагональной фазы

$$\frac{C_k}{C_t} = 0.88 \cdot \frac{I_k(400)}{I_t(400) + I_t(004)} \quad (7)$$

где  $C_t$  – содержание тетрагональной фазы, %;

$C_k$  - содержание кубической фазы, %;

$I_k(400)$  – интегральная интенсивность кубической фазы;

$I_t(004), I_t(400)$  - интегральная интенсивность тетрагональной фазы.

Теоретическая плотность образцов определяли на основе результатов рентгеноструктурного анализа по формуле:

$$\rho_{теор} = \frac{100}{\frac{m_m}{\rho_m} + \frac{m_t}{\rho_t} + \frac{m_c}{\rho_c}} \quad (8)$$

где  $m_m, m_t, m_c$  – вес. % компонентов моноклинной, тетрагональной и кубической фаз;

$\rho_m, \rho_t, \rho_c$  – теоретическая плотность компонентов равная 5.6, 6.1 и 6.27 г/см<sup>3</sup> соответственно.

Испытание на осевое сжатие образцов проводили на установке «растяжение-сжатие» Instron-1185» со скоростью нагружения 0.1 мм/мин с записью кривой нагружения в координатах нагрузка-перемещение.

Предел прочности при сжатии определяли по формуле:

$$\sigma_{сж} = \frac{P}{S} \quad (9)$$

где  $P$  – приложенная нагрузка, кг;

$S$  – площадь поперечного сечения образца, мм.



Деформацию образца определяли по формуле:

$$\varepsilon = \frac{l}{h} \quad (10)$$

где  $l = l_0 - l_k$  – перемещение образца, мм;

$h$  – высота образца, мм.

При расчетах учитывали жесткость машины.

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

Студенту:

<b>Группа</b> 4Б41	<b>ФИО</b> Орлова Елена Сергеевна
-----------------------	--------------------------------------

<b>Инженерная школа</b>	новых производственных технологий	<b>Отделение</b>	материаловедения
<b>Уровень образования</b>	бакалавр	<b>Направление/специальность</b>	22.03.01 «Материаловедение и технологии материалов»

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

1. <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	- Инициатор проекта ИФП СО РАН; - В исследовании задействовано 2 человека: руководитель проекта, инженер - разработчик.
2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	- Проект выполняется в соответствии с ГОСТ 14.322-83 «Нормирование расхода материалов»; - Минимальный размер оплаты труда в 2018 году составляет 9489 руб.
3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	- Согласно п.3 п.п.16 ст. 149 НК РФ данная НИИ не подлежит налогообложению. На основании п. 1 ст. 58 закона №212-ФЗ для учреждений, осуществляющих образовательную и научную деятельность в 2014 году вводится пониженная ставка для расчета отчислений во внебюджетные фонды – 27,1% от фонда оплаты труда.

**Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:**

1. <i>Оценка коммерческого потенциала, перспективности проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения</i>	Технико-экономическое обоснование научно-исследовательской работы Потенциальные потребители результатов исследования. SWOT-анализ
2. <i>Планирование и формирование бюджета научных исследований</i>	Планирование комплекса работ по проведению НИИ; Расчет бюджета затрат на НИИ.

**Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):**

1. *График проведения и бюджет НИИ*

<b>Дата выдачи задания для раздела по линейному графику</b>	
-------------------------------------------------------------	--

**Задание выдал консультант:**

<b>Должность</b>	<b>ФИО</b>	<b>Ученая степень, звание</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
Старший преподаватель	Гаврикова Надежда Александровна			

**Задание принял к исполнению студент:**

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
4Б41	Орлова Елена Сергеевна		

## 5. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

Раздел «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» имеет своей целью анализ перспектив и успешности научно-исследовательского проекта. Также в данном разделе разрабатываются механизмы управления и другие проектные решения этапа реализации проекта.

Достижение поставленной цели требует решения следующих задач:

- дать оценку коммерческому потенциалу проекта и перспективам его разработки;
- обозначить поэтапный план выполнения исследования;
- произвести расчёт бюджета исследования.

### 5.1 Технико-экономическое обоснование научно-исследовательской работы

Темой ВКР является «Структура, механические свойства и особенности поведения при деформации пористой керамики на основе диоксида циркония».

Разработка НТИ производится группой, состоящей из двух человек – руководителя и студента.

Наличие пор в материале обуславливает значительное изменение исходных характеристик материала, а также появление новых свойств. Поэтому необходимо экспериментально исследовать изменение характеристик и свойств материалов с пористой структурой.

Сравнение свойств керамических материалов с пористой и плотной структурами представлено в таблице 5.

Таблица 5 – Сравнение свойств керамических материалов с пористой и плотной структурами

Параметр	Керамика на основе диоксида циркония с плотной структурой	Керамика на основе диоксида циркония с пористой структурой
Механическая прочность	высокая	значительно ниже
Стойкость к коррозии и износу	есть	есть
Биоустойчивость	есть	есть
Контролируемая проницаемость	нет	есть
Плотность	высокая	низкая
Теплопроводность	высокая	низкая
Поведение при деформации	изучено	не изучено

Из сравнения следует, что пористые керамические материалы, несмотря на снижение механической прочности, обладают рядом преимуществ по сравнению с плотными керамическими материалами, поэтому исследование структуры, свойств и особенностей поведения при деформации керамических материалов с пористой структурой является перспективным направлением исследований.

## 5.2 Потенциальные потребители результатов исследования

Данный проект является инициативным и не имеет коммерческого потенциала. Проект выполнен в рамках научно-исследовательской работы для ИФПМ СО РАН. Проект обладает инновационным потенциалом, выраженным в изучении дополнительных свойств пористых керамических материалов на основе диоксида циркония, что позволяет расширить область их применения.

Потенциальными потребителями результатов исследования являются промышленные предприятия производящие и использующие различные системы фильтрации, предприятия, использующие огнеупорные материалы, а также компании, деятельность которых направлена разработку, создание и реализацию медицинских имплантов, протезов и т.п.

### 5.3 SWOT-анализ

Комплексный анализ внутренней и внешней среды научно-исследовательского проекта производится посредством SWOT-анализа. SWOT-анализ дает оценку сильных и слабых сторон проекта, его возможностей, угрозам внешней среды. В таблице 6 представлены сильные и слабые стороны, из которых следуют возможности и угрозы реализации данного проекта.

Таблица 6 – SWOT-анализ проекта

Сильные стороны	Возможности во внешней среде
С1. Наличие в лаборатории необходимого оборудования для исследования; С2. Возможность рентгеноструктурных исследований; С3. Наличие опыта работы с аналогичными исследованиями; С4. Подготовка образцов для исследования не требует специального оборудования.	В1. Возможность выявления незапланированных результатов, благоприятно влияющих на потребительские качества продукта; В2. Возможность заполнить неизученную нишу в этой области науки.
Слабые стороны	Угрозы внешней среды
Сл1. Трудоемкость значительные затраты времени на подготовку образцов; Сл2. Погрешность измерений, обусловленная использованием косвенных методов измерения; Сл3. Ручная обработка результатов; Сл4. Высокие требования к квалификации персонала.	У1. Несвоевременное финансовое обеспечение научного исследования со стороны заказчика; У2. Отсутствие спроса на результат исследования в случае отрицательного результата исследования; У3. Большой срок поставок исходных материалов, используемых при изготовлении образцов.

Следующим этапом является выявление соответствия сильных и слабых сторон проекта условиям внешней среды. Данный анализ соответствий (или несоответствий) необходим для оценки необходимости каких либо стратегических изменений. В таблице 7 представлены корреляции сильных сторон проекта и возможностей его реализации.

Таблица 7 – Сильные стороны исследования и возможности

Сильные стороны исследования					
Возможности проекта		С1	С2	С3	С4
	В1	+	+	+	-
	В2	+	+	+	-

Из таблицы 7 следует, что сильные стороны проекта соответствуют

возможностям реализации по параметрам:

V1C1C2C3

V2 C1C2C3

Возможность V1 взаимодействует с сильными сторонами C1C2C3 потому, что возможность обнаружения незапланированных результатов напрямую связана с техническим оснащением, а также с наличием опыта работы с подобными материалами у участников исследования.

Возможность V2 взаимодействует с C1C2C3 по причине того, что изучение малоизученных тем напрямую зависит от наличия необходимого оборудования, а также от квалифицированных специалистов.

Таблица 8 – Слабые стороны исследования и возможности

Слабые стороны исследования					
Возможности проекта		Сл1	Сл2	Сл3	Сл4
	V1	-	+	-	-
	V2	-	+	-	+

Из таблицы 8 следует, что слабые стороны проекта коррелируют с возможностями реализации по параметрам:

V1Сл2Сл4

V2Сл2Сл4

Возможности V1V2 взаимодействуют со слабыми сторонами Сл2Сл4 потому, что наличие погрешностей непосредственно влияет на полученный результат, а высокие требования к квалификации персонала подразумевают дополнительные затраты на обучение и оплату труда.

Таблица 9 – Сильные стороны исследования и угрозы

Сильные стороны исследования					
Угрозы		С1	С2	С3	С4
	У1	-	-	-	-
	У2	-	-	-	-
	У3	-	-	-	-

Из таблицы 9 следует, что сильные стороны проекта не соответствуют угрозам реализации.

Таблица 10 – Слабые стороны исследования и угрозы

Слабые стороны исследования					
Угрозы		Сл1	Сл2	Сл3	Сл4
	У1	+	-	-	-
	У2	-	+	-	-
	У3	+	-	-	-

Из таблицы 10 следует, что слабые стороны проекта соответствуют угрозам реализации по параметрам:

У1Сл1

У2Сл2

У3Сл1

Угроза У1и У3 взаимодействует со слабой стороной Сл1 потому, что несвоевременное финансовое обеспечение научного исследования со стороны заказчика, а также большой срок поставок исходных материалов может дополнительно затянуть время проведения исследования.

Угроза У2 взаимодействует со слабой стороной Сл2 потому, что наличие погрешностей измерений может повлиять на наличие спроса на результат исследований.

Анализ показал, что наибольшими угрозами исследованию является несвоевременное финансовое обеспечение научного исследования со стороны заказчика и большой срок поставок исходных материалов, которые оказывают значительное влияние на время проведения исследования.

Слабой стороной исследования являются высокие требования к квалификации персонала, обусловленные необходимостью работы на сложном оборудовании, ручной обработкой результатов, а также трудоемкостью подготовки образцов.

#### 5.4 Планирование комплекса работ по проведению НТИ

Для анализа трудоемкости выполнения НТИ используется экспертная оценка. Расчёт ведётся в человеко-днях, но, поскольку зависит от множества факторов, носит вероятностный характер. Этапы выполнения данной работы представлены в таблице 7.

Таблица 11 – Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№ работы	Содержание работы	Должность исполнителя
Разработка ТЗ на проектирование	1	Составление технической записки для НТИ	руководитель; инженер
<b>Проведение НТИ</b>			
Выбор направления исследования	2	Изучение литературы по соответствующей тематике	инженер
	3	Планирование проведения исследования	руководитель; инженер
Теоретические и экспериментальные исследования	4	Изготовление и подготовка образцов для исследования	инженер
	5	Исследование образцов: твердость, вязкость разрушения, структура, фазовый состав	руководитель, инженер
	6	Анализ полученных в результате исследования результатов	инженер
Обобщение и оценка результатов	7	Оценка эффективности полученных результатов	руководитель; инженер
	8	Составление пояснительной записки	инженер

#### 5.4.1 Определение трудоемкости работ

Для определения трудоёмкости работ используется опытно-статистический метод расчёта ожидаемого времени выполнения работ в человеко-днях по формуле

$$t_{ож\ i} = \frac{3 \cdot t_{\min\ i} + 2 \cdot t_{\max\ i}}{5} \quad (12)$$

Где  $t_{ож\ i}$  - ожидаемая трудоемкость выполнения  $i$ -ой работы, чел.-дн.;

$t_{\min\ i}$  - минимально возможная трудоемкость выполнения заданной  $i$ -ой работы (оптимистическая оценка: в предположении наиболее благоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн.;

$t_{\max\ i}$  - максимально возможная трудоемкость выполнения заданной  $i$ -ой работы (пессимистическая оценка: в предположении наиболее неблагоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн.

Для установления продолжительности работы в рабочих днях используем формулу:



$$T_{pi} = \frac{t_{ожi}}{Ч_i} \quad (13)$$

где  $T_{pi}$  - продолжительность одной работы, раб. дн.;

$t_{ожi}$  - ожидаемая трудоемкость выполнения одной работы, чел.-дн.;

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

Для удобства построения календарного план-графика, длительность этапов в рабочих днях переводится в календарные дни и рассчитывается по следующей формуле:

$$T_{ki} = T_{pi} \cdot k \quad (14)$$

Где  $T_{ki}$  - продолжительность выполнения одной работы, календ. дн.;

$T_{pi}$  - продолжительность одной работы, раб. дн.;

$k$  – коэффициент календарности, предназначен для перевода рабочего времени в календарное.

Коэффициент календарности рассчитывается по формуле:

$$k = \frac{T_{КГ}}{T_{КГ} - T_{ВД} - T_{ПД}} \quad (15)$$

Где  $T_{КГ}$  – количество календарных дней в году;

$T_{ВД}$  – количество выходных дней в году;

$T_{ПД}$  – количество праздничных дней в году.

Определим длительность этапов в рабочих днях и коэффициент календарности:

$$k = \frac{T_{КГ}}{T_{КГ} - T_{ВД} - T_{ПД}} = \frac{365}{365 - 108 - 10} = 1,48 \quad (16)$$

Длительность этапов в рабочих днях. Следует учесть, что расчетную величину продолжительности работ  $T_K$  нужно округлить до целых чисел.

#### 5.4.2 Техническая готовность НТИ

Техническая готовность исследования отражает то, насколько

выполнены запланированные этапы или работа. Численно показатель технической готовности выражается как отношение продолжительности работ, выполненных на момент исчисления этого показателя, к общей запланированной продолжительности работ, при этом следует учесть, что период исследования составляет примерно 6 месяцев, студент-дипломник выступает в качестве основного исполнителя.

Для выделения удельного значения отдельной работы из общей продолжительности работ используется формула:

$$Y_i = \frac{T_{pi}}{T_p} \cdot 100\% \quad (17)$$

где  $Y_i$  – удельное значение каждой работы в %;

$T_{pi}$  – продолжительность одной работы, раб.дн.;

$T_p$  – суммарная продолжительность работ, раб.дн.

Техническую готовность индивидуальной работы определим по формуле:

$$\Gamma_i = \frac{\sum_{i=1} T_{pi}}{T_p} \cdot 100\% \quad (18)$$

где  $\sum_{i=1} T_{pi}$  – нарастающая продолжительность на момент выполнения  $i$ -той работы. [17]

Результаты расчетов приведены в таблице 12.

Таблица 12 – Временные показатели проведения НТИ

№ раб.	Исполнители	Продолжительность работ						
		t <sub>min</sub> чел- дн.	t <sub>max</sub> чел- дн	t <sub>ож</sub> чел- дн	T <sub>p</sub> раб.дн	T <sub>к</sub> кал.дн	У <sub>i</sub> , %	Г <sub>i</sub> , %
1	Орлова Е.С. - инженер Севостьянова И.Н. - руководитель	2	3	2	1	2	1	1
2	Орлова Е.С. - инженер	18	27	22	22	32	23	25
3	Орлова Е.С. - инженер Севостьянова И.Н. - руководитель.	4	8	6	3	4	3	28
4	Орлова Е.С. - инженер	32	40	35	35	52	38	65
5	Орлова Е.С. - инженер Севостьянова И.Н. - руководитель.	22	28	24	12	18	13	78
6	Орлова Е.С. - инженер	8	12	10	10	14	10	89
7	Орлова Е.С. - инженер Севостьянова И.Н. - руководитель.	8	12	10	5	7	5	94
8	Орлова Е.С. - инженер	4	8	6	6	8	6	100

#### 5.4.3 Построение графика работ

Диаграммы Ганта, или иначе ленточные диаграммы, используются для удобного и наглядного представления календарного плана работ. В текущей работе диаграмма Ганта представлена в виде горизонтального ленточного графика проведения ВКР (таблица 9), на котором каждая работа представлена отрезками, протяженными во времени и имеющими дату начала и окончания выполнения.

Таблица 13 состоит из столбцов, разбитых на месяцы и недели, за которые происходит выполнение ВКР. Ячейки, закрашенные определенным цветом, отражают вид работы и ее исполнителя. У каждого исполнителя свой цвет.

Таблица 13– Календарный график проведения НТИ

Этап	Вид работы	Исполнители	$T_k$	Февраль	Март	Апрел ь	Май	Июнь
1	Составление технической записки для НТИ	Орлова Е.С. Севостьянова И.Н.	2					
2	Изучение литературы по соответствующей тематике	Орлова Е.С.	32					
3	Планирование проведения исследования	Орлова Е.С. Севостьянова И.Н.	4					
4	Изготовление и подготовка образцов для исследования	Орлова Е.С.	52					
5	Исследование образцов: твердость, вязкость разрушения, структура, фазовый состав	Орлова Е.С. Севостьянова И.Н.	18					
6	Анализ полученных в результате исследования результатов	Орлова Е.С.	14					
7	Оценка эффективности и полученных результатов	Орлова Е.С. Севостьянова И.Н.	7					
8	Составление пояснительной записки	Орлова Е.С.	8					

– инженер, – руководитель, научный сотрудник.

График выполнения работ учитывает выходные и праздничные дни. Таким образом, суммарное количество рабочих дней на выполнение данного проектирования 114: 114 у инженера и 42 у руководителя, научного сотрудника.

#### 5.4.4 Расчет бюджета затрат на НИИ

Затраты на НИИ являют собой все производственные формы потребления денежных средств, а также материальных ценностей, выраженных в денежном эквиваленте, служащих непосредственному достижению производственной цели.

При расчёте сметы расходов учитываются затраты на приобретение необходимого оборудования и текущие расходы.

Себестоимость работы формируется из затрат, которые, в свою очередь, группируются по следующим экономическим элементам:

$$K_{\text{проекта}} = I_{\text{мат}} + I_{\text{ат.техн}} + I_{\text{зп}} + I_{\text{соц.отч.}} + I_{\text{накл.расх.}} + I_{\text{прочие}} \quad (19)$$

Здесь  $I_{\text{мат}}$  – материальные затраты, включающие стоимость материалов и сырья, необходимого при изготовлении продукции.

В данной работе использовался керамический порошок  $ZrO_2$ -5.5вес.% $Y_2O_3$ .

Таблица 14 – Материальные затраты

Наименование	Единица измерения	Количество	Цена за ед., руб.	Затраты на материалы, руб.
Керамический порошок $ZrO_2$ -5.5вес.% $Y_2O_3$	кг	1	835,	835,0
Итого				835,0

Также для исследования потребовалось оборудование, расчет затрат на которое представлен в таблице 15.

Таблица 15 – Расчет бюджета затрат на приобретение спецоборудования для научных работ

Материалы и оборудование	Ед. изм.	Срок службы, год	Кол-во, ед	Цена за ед, руб	Затраты, руб
Гидравлическом пресс ПГ50	шт	15	1	707616	0,0
Воздушная печь	шт	10	1	707616	0,0
Мешалка барабанного типа	шт	5	1	42800	0,0
Муфельной высокотемпературная печь Р310 ЛНТ 02/17	шт	10	1	444411	0,0
Весы электронные HL-100	шт	3	1	8000	0,0
Микроскоп «Альтами МЕТ 1М»	шт	5	1	276000	0,0
«СуперВиккерс»	шт	30	1	60000	0,0
Растровый электронный микроскоп VEGA 3TESCAN	шт	25	1	1699200	0,0
Instron-1185	шт	10	1	1000000	0,0
Компьютер	шт	5	1	18449	0,0
ДРОН-3	шт	60	1	477538	0,0
Итого:					0,0

При проведении исследования приобретать вышеперечисленные приборы не потребовалось так, как они уже имеются в ИФПМ СО РАН, следовательно, их стоимость не учитывается в бюджете и графа затрат равна нулю.

Амортизация основных фондов – сумма амортизационных отчислений на полное восстановление основных производственных фондов, вычисленная исходя из их балансовой стоимости и утвержденных норм амортизации. Учёту амортизации подлежит оборудование сроком использования более года и стоимостью за единицу оборудования более 100 тыс. руб.

Расчёт амортизации оборудования  $I_{ам.обор}$  ведется по следующей формуле:

$$I_{ам.обор} = \left( \frac{T_{исп.обор}}{365} \right) \cdot K_{обор} \cdot H_a \quad (20)$$

где  $T_{исп.обор}$  – время использования оборудования;

365 – количество дней в году;

$K_{\text{обор}}$  – стоимость оборудования;

$H_a$  – норма амортизации.

$$H_a = \frac{1}{T_{\text{с.с.обор.}}} \quad (21)$$

где  $T_{\text{с.с.обор.}}$  – срок службы оборудования.

$$I_{\text{ам.исп.уст}} = \left( \frac{T_{\text{исп.уст}}}{365} \right) \times K_{\text{исп.уст.}} \times H_a = \left( \frac{21}{365} \right) \times 4900000 \times \left( \frac{1}{10} \right) = 28191,78 \text{ руб.}$$

Результаты расчета амортизации оборудования представлены в таблице 16.

Таблица 16 – Расчет величины амортизационных отчислений

Тип оборудования	Стоимость, руб.	Срок эксплуатации, лет	Срок использования в НТИ, кал.дн.	Амортизационные отчисления, руб.
Гидравлическом пресс ПГ50	707616	3	8	516,98
Воздушная печь	185000	2	18	17448,07
Муфельной высокотемпературная печь Р310 ЛНТ 02/17	444411	2	8	4870,26
Микроскоп «Альтами МЕТ 1М»	276000	3	5	1260,27
Растровом электронном микроскопе VEGA 3TESCAN	1699200	2	3	6983,01
Instron-1185	1000000	1	4	10958,9
ДРОН-3	477538	10	9	392,5
Итого:				42429,99

Расчёт заработной платы ведётся с учётом занятости в работе каждого исполнителя, а также районного и тарифного коэффициентов.

Затраты на оплату труда состоят из следующих пунктов:

- выплаты заработной платы за фактически выполненную работу;
- выплаты стимулирующего характера по системным положениям;

- выплаты по районным коэффициентам;
- компенсации за неиспользованный отпуск;
- другие виды выплат.

Таблица 17 – Расчет основной заработной платы

Этапы	Исполнители по категориям	Трудоемкость, чел.-раб.дн.	З/п по тарифу (окладам) с учётом РК, руб.	З/п, приходящаяся на один чел.-дн., руб.	Итоговая з/п
1-8	Инженер (УВП, 1 кв. уровень)	117	10470,0	498,5	58332,8
1,2,5,7	Руководитель (научный сотрудник, к.т.н)	42	47530,0	2263,3	95060,0
Итого:					153392,9

В таблице 18 представлена смета бюджета затрат на НТИ.

Таблица 18 – Расчет бюджета затрат НТИ

Наименование статьи	Сумма, руб.	Порядок расчета
Материальные затраты НТИ	835,00	Таблица 10
Затраты на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ	42429,99	Таблица 11, таблица 12
Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	153392,9	Таблица 13
Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы	18407,14	$(осн.З.П.) \cdot 0,12$
Отчисления на социальные нужды	46557,8	$(осн.З.П. + доп.З.П.) \cdot 0,271$
Накладные расходы	43408,76	$(сумма пунктов 1-5) \cdot 0,16$
Бюджет затрат НТИ	314713,53	сумма всех затрат

Анализ данного исследования показал, что оно состоит из 8 этапов. Время проведения исследования по расчетам составило 5 месяц из них суммарное количество рабочих дней 114: 114 у инженера и 42 у руководителя, научного сотрудника.

Расчет бюджета показал, что итоговые затраты на проведение исследования составили около 315 тысяч рублей.



## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ

1. Орлова Е.С., Скрипняк В. В., Чулков А. О., Козулин А. А. «Исследование с визуализацией методом ИК термографии процесса деформирования и разрушения образцов сплава Ti-45 мас.%Nb в крупнокристаллическом и ультрамелкозернистом состоянии» // Sibtest 2017: Сборник тезисов IV международной конференции по инновациям в неразрушающем контроле SibTest (27–30 июня 2017г.) / под ред. А.В. Юрченко; Томский политехнический университет – Томск: Изд-во ТПУ, 2017.–124 с.

2. Орлова Е.С., Скрипняк В.В., Чулков А.О., Козулин А.А., Белявская О.А. «Исследование процесса деформирования и разрушения образцов сплава Ti-45 мас.%Nb в различных структурных состояниях методом инфракрасной термографии» // Всероссийская конференция молодых ученых-механиков, 5 – 15 сентября 2017 г., Сочи, «Буревестник» МГУ. Тезисы докладов. – М.: Издательство Московского университета, 2017. – 122 с.

3. Орлова Е.С., Ерошенко А.Ю., Белявская О.А. «РЭМ исследование поверхностей разрушения деформированных образцов титан-ниобиевого сплава в различных структурных состояниях» // Международная конференция с элементами научной школы для молодежи «Современные технологии и материалы новых поколений» 09 - 13 октября 2017 г. г. Томск, Россия