



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

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

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА МАГИСТРАНТА**

Тема работы
<b>Применение рентгеновской томографии для количественного анализа пористых металлических композитов</b>

УДК 539.26:669.018

Обучающийся

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4БМ1И	Батрагин Андрей Викторович		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ОМ ИШНПТ	Клименов В.А.	Д.Т.Н., профессор		

**КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:**

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент ОСГН ШБИП	Спицына Л.Ю.	К.Э.Н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент ООД ШБИП	Антоневич О.А.	К.Б.Н.		

**ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:**

Руководитель ООП/ОПОП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ОМ ИШНПТ	Панин С.В.	Д.Т.Н., профессор		

## ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОСВОЕНИЯ ООП

Код компетенции	Наименование компетенции
<b>Универсальные компетенции</b>	
<b>УК(У)-1</b>	Способен осуществлять критический анализ проблемных ситуаций на основе системного подхода, вырабатывать стратегию действий
<b>УК(У)-2</b>	Способен управлять проектом на всех этапах жизненного цикла
<b>УК(У)-3</b>	Способен организовывать и руководить работой команды, вырабатывая командную стратегию для достижения поставленной цели
<b>УК(У)-4</b>	Способен применять современные коммуникативные технологии, в том числе на иностранном языке, для академического и профессионального взаимодействия
<b>УК(У)-5</b>	Способен анализировать и учитывать разнообразие культур в процессе межкультурного взаимодействия
<b>УК(У)-6</b>	Способен определять и реализовывать приоритеты собственной деятельности и способы ее совершенствования на основе самооценки
<b>Общепрофессиональные компетенции</b>	
<b>ОПК(У)-1</b>	Способен решать производственные и/или исследовательские задачи, на основе фундаментальных знаний в области материаловедения и технологии материалов
<b>ОПК(У)-2</b>	Способен разрабатывать научно-техническую, проектную и служебную документацию, оформлять научно-технические отчеты, обзоры, публикации, рецензии
<b>ОПК(У)-3</b>	Способен участвовать в управлении профессиональной деятельностью, используя знания в области системы менеджмента качества
<b>ОПК(У)-4</b>	Способен находить и перерабатывать информацию, требуемую для принятия решений в научных исследованиях и в практической технической деятельности
<b>ОПК(У)-5</b>	Способен оценивать результаты научно-технических разработок, научных исследований и обосновывать собственный выбор, систематизируя и обобщая достижения в области материаловедения и технологии материалов, смежных областях
<b>Профессиональные компетенции</b>	
<b>ПК(У)-1</b>	Способен обоснованно (осмысленно) использовать знания основных типов металлических, неметаллических и композиционных материалов различного назначения, в том числе наноматериалов для решения профессиональных задач.
<b>ПК(У)-2</b>	Способен осуществлять рациональный выбор материалов и оптимизировать их расходование на основе анализа заданных условий эксплуатации материалов, оценки их надежности, экономичности и экологических последствий применения
<b>ПК(У)-3</b>	Способен осуществлять анализ новых технологий производства материалов и разрабатывать рекомендации по составу и способам обработки конструкционных, инструментальных, композиционных и иных материалов с целью повышения их конкурентоспособности
<b>ПК(У)-4</b>	Способен планировать и осуществлять экспериментальные исследования, анализировать и обрабатывать их результаты, делать выводы, составлять и оформлять отчеты по проведенным исследованиям

<b>ПК(У)-5</b>	Способен выполнять перевод технической литературы на иностранном языке, связанной с профессиональной деятельностью в области материаловедения
<b>ПК(У)-6</b>	Способен определять соответствие готового изделия заявленным потребительским характеристикам; прогнозировать и описывать процесс достижения заданного уровня свойств в материале
<b>ПК(У)-7</b>	Способен организовать проведение анализа и анализировать структуру новых материалов, адаптировать методики исследования свойств материалов к потребностям производства и разрабатывать специальные методики
<b>ПК(У)-8</b>	Способен моделировать процессы обработок и прогнозировать результаты их осуществления при различных режимах, с использованием стандартных пакетов компьютерных программ и средств автоматизированного проектирования



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

Школа Инженерная школа новых производственных технологий

Направление подготовки (ООП/ОПОП) Материаловедение и технологии материалов

Отделение школы (НОЦ) Отделение материаловедения

УТВЕРЖДАЮ:  
Руководитель ООП/ОПОП  
\_\_\_\_\_ Панин С.В.  
(Подпись) (Дата)

**ЗАДАНИЕ  
на выполнение выпускной квалификационной работы**

Обучающийся:

Группа	ФИО
4БМ1И	Батранин Андрей Викторович

Тема работы:

<b>Применение рентгеновской томографии для количественного анализа пористых металлических композитов</b>	
Утверждена приказом директора ИШНПТ	Приказ № 40-53/с от 09.02.2023

Срок сдачи студентом выполненной работы:	11.09.2023
--	------------

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

<b>Исходные данные к работе</b>	Объектом исследования являются образцы из пористого никелида титана, полученные методом СВС. Образцы подвергнуты сжимающей нагрузке и в разной степени деформированы. Необходимо выявить изменения в структуре образцов методом рентгеновской томографии высокого разрешения.
<b>Перечень разделов пояснительной записки подлежащих исследованию, проектированию и разработке</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Провести литературный обзор по объекту исследования и применению томографии к этому объекту.</li> <li>2. Провести качественный анализ томографических данных</li> <li>3. Предложить методику количественного анализа томографических данных.</li> <li>4. Систематизировать полученные результаты.</li> </ol>
<b>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</b> <i>(с указанием разделов)</i>	
<b>Раздел</b>	<b>Консультант</b>
Финансовый менеджмент	Спицына Л.Ю.
Социальная ответственность	Антоневич О.А.
Английский язык	Демьяненко Н.В.

<b>Названия разделов, которые должны быть написаны на иностранном языке:</b>	
1.1	Никелид титана
1.2	Пористый никелид титана
1.3	Метод рентгеновской томографии

<b>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</b>	30.01.2023
---	------------

**Задание выдал руководитель:**

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

**Задание принял к исполнению обучающийся:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4БМ1И	Батрагин Андрей Викторович		



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

Школа Инженерная школа новых производственных технологий  
Направление подготовки (ООП/ОПОП) Материаловедение и технологии материалов  
Уровень образования магистратура  
Отделение школы (НОЦ) Отделение материаловедения  
Период выполнения весенний семестр 2022 /2023 учебного года

**КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН  
выполнения выпускной квалификационной работы**

Обучающийся

Группа	ФИО
4БМ1И	Батрагин Андрей Викторович

Тема работы:

<b>Применение рентгеновской томографии для количественного анализа пористых металлических композитов</b>
--

Срок сдачи студентом выполненной работы:	11.09.2023
--	------------

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
...	<i>Выдача задания на ВКР</i>	...
...	<i>Изучение литературы по теме исследования</i>	...
	<i>Подготовка образцов</i>	
	<i>Проведение томографии образцов</i>	
	<i>Разработка методики количественного анализа томографических данных</i>	
	<i>Анализ полученных результатов</i>	
11.09.2023	<i>Оформление пояснительной записки ВКР и сдача работы на проверку</i>	

**СОСТАВИЛ:**

**Руководитель ВКР**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ОМ ИШНПТ	Клименов В.А.	Д.Т.Н., профессор		

**СОГЛАСОВАНО:**

**Руководитель ООП/ОПОП**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ОМ ИШНПТ	Панин С.В.	Д.Т.Н., профессор		

Обучающийся

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4БМ1И	Батрагин Андрей Викторович		

## РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 86 с., 26 рис., 27 табл., 47 источников, 1 прил.

Ключевые слова: компьютерная томография, пористый никелид титана, морфологический анализ, пористость.

Объектом исследования являются образцы из пористого никелида титана, полученные методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза.

Цель работы: разработка методики количественного анализа внутренней структуры пористого никелида титана с применением компьютерной томографии высокого разрешения.

В работе приведены основные сведения о пористом никелиде титана и областях его применения. Дано краткое описание метода лабораторной рентгеновской томографии и наработанные научным сообществом результаты по исследованию этим методом пористого никелида титана.

В экспериментальной части работы показан процесс получения томографических данных, их обработки для последующего анализа и методика количественного морфологического анализа. Приведены результаты применения методики к исследованным образцам.

В разделе «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» были проработаны ключевые экономические аспекты разрабатываемого научно-технического решения: определены основные конкурирующие технические решения, представлены цели проекта, описаны потенциальные потребители результата выполнения проекта, произведен расчет бюджета проекта, вовлеченность участников и календарный план выполнения разных этапов проекта, проведен анализ ресурсоэффективности проекта.

В разделе «Социальная ответственность» проанализированы вредные и опасные факторы на рабочем месте, установлено соответствие условий труда гигиеническим нормам, описаны меры по охране окружающей среды при выполнении работы.

## **Список сокращений и аббревиатур**

СТ – computed (computerized) tomography – компьютерная томография

СТІ – connectivity–tortuosity index – индекс связанности-разветвленности

micro-СТ – микротомография, томография высокого разрешения

VOI – volume of interest – выделенный объем для расчетов

КТ – компьютерная томография

микро-КТ - микротомография

СВС – самораспространяющийся высокотемпературный синтез

ПО – программное обеспечение



## Содержание

Введение	12
1. Основная часть	14
1.1 Никелид титана	14
1.2 Пористый никелид титана	15
1.3 Метод рентгеновской томографии	19
1.4 Исследуемые образцы и примененное оборудование	30
1.5 Качественный анализ внутренней структуры пористого нитинола	32
1.6 Количественный анализ внутренней структуры. Деформация образцов	35
1.7 Общий морфологический анализ	40
1.8 Морфологический анализ порового пространства и перемычек	42
1.9 Выводы по разделу	46
2. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	49
2.1 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	50
2.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования	50
2.1.2 Анализ конкурентных технических решений	51
2.1.3 SWOT - анализ	52
2.2 Инициация проекта	55
2.2.2 Цели и результаты проекта	55
2.2.3 Организационная структура проекта	55
2.2.4 Ограничения и допущения проекта	56
2.3 Планирование управления научно-техническим проектом	57
2.3.1 Контрольные события проекта	57

2.3.2 Календарный план проекта	57
2.4 Бюджет научно-технического исследования	59
2.4.1 Расчет материальных затрат научно-технического исследования	60
2.4.2 Расчет амортизации специального оборудования	60
2.4.3 Основная заработная плата исполнителей проекта	61
2.4.4 Дополнительная заработная плата исполнителей проекта	62
2.4.5 Отчисления на социальные нужды	63
2.4.6 Накладные расходы	63
2.4.7 Формирование бюджета проекта	63
2.5 Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования	64
2.6 Выводы по разделу	66
3. Социальная ответственность	69
3.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	69
3.2 Производственная безопасность	71
3.3 Производственные факторы, связанные с электрическим током, вызываемым разницей электрических потенциалов, под действие которого попадает работающий	72
3.4 Производственные факторы, связанные с повышенным уровнем ионизирующих излучений	72
3.5 Отсутствие или недостаток необходимого искусственного освещения	74
3.6 Производственные факторы, связанные с аномальными микроклиматическими параметрами воздушной среды на рабочем месте	76
3.7 Повышенный уровень шума	77
3.8 Статические перегрузки, связанные с рабочей позой	77
3.9 Экологическая безопасность	78

3.10 Безопасность в чрезвычайных ситуациях	79
3.11 Заключение по разделу «Социальная ответственность»	80
Заключение	81
Список использованных источников	82
Приложение А	87

## Введение

Рентгеновская томография высокого разрешения активно применяется в последнее десятилетие в разнообразных сферах научной и практической деятельности. Этот метод, называемый часто микротомографией или микро-КТ, дает обширную информацию о внутренней структуре исследуемых объектов благодаря высокой детализации и объемному представлению результата томографии.

Микро-КТ широко применяется в современном материаловедении, являясь ценным инструментом в исследовании разнообразных композиционных материалах, а также изделий, полученных аддитивными методами.

По мере развития программного обеспечения и роста вычислительных мощностей современных компьютеров, томография стала не только методом визуализации внутренней структуры, но и инструментом количественного анализа внутренней структуры. Получая на основе томограмм цифровые объемные модели объектов исследования, можно провести подробный морфологический анализ сложных пространственных структур. В последние годы микро-КТ вошло в число основных методов, применяемых в материаловедении [1].

В данной работе методом микро-КТ исследовались лабораторные образцы пористого никелида титана ( $\text{NiTi}$ ), полученные методом СВС. Данные сплавы нашли широкое применение в качестве имплантационных материалов [2]. Это связано с тем, пористые сплавы на основе  $\text{NiTi}$  обладают уникальными вязкоупругими свойствами при внешних нагрузках, подобными поведению биологических тканей [3]. Важной характеристикой пористых материалов является морфология порового пространства, так как она определяет функциональные свойства материала при его работе в живых тканях. Томография позволяет провести морфологическое описание без разрушения образцов, используя цифровые модели, полученные по результатам томографического сканирования.

В связи с тем, что в организме на костную ткань действуют преимущественно сжимающие нагрузки, ряд образцов был подвергнут испытаниям на сжатие. Для разных образцов испытания проводились до получения определенной остаточной

пластической деформации. Целью данной работы было установление взаимосвязи степени пластической деформации с изменениями внутренней структуры, которые можно зафиксировать методом рентгеновской томографии.

В ходе работы решались следующие вопросы:

- какие морфологические свойства могут характеризовать пористую структуру;
- как деформация сказывается на внутренней структуре пористого никелида титана;
- как происходит разрушение под действием сжимающих нагрузок.

И хотя, с одной стороны, микро-КТ повсеместно используется в современном материаловедении, а с другой стороны пористый никелид титана давно применяется в медицине, работ посвященных применению томографии для этих материалов крайне мало. Данное исследование ставит своей целью частично восполнить этот пробел.

## 1. Основная часть

### 1.1 Никелид титана

Никелид титана, также известный как нитинол, представляет собой интерметаллид титана и никеля, в котором доли элементов примерно равны. В разных источниках указываются разные формулы: как NiTi, так и TiNi. Данный материал известен, прежде всего, благодаря своей сверхэластичности и наличием эффекта памяти формы. Эффект памяти формы в металлических сплавах был открыт в середине XX века советскими материаловедом Г.В. Курдюмовым и Л.Г. Хандром как явление термоупругого равновесия при фазовых превращениях мартенситного типа [4]. Данное явление также известно как эффект Курдюмова.

Эффект памяти формы основан на мартенситном бездиффузионном полиморфном превращении. В случае системы никель-титан данный переход может происходить при низких температурах (например, при комнатной) в зависимости от химического состава и действующих механических напряжений. Мартенситное превращение характеризуется обратимостью, гистерезисом прямого и обратного перехода [5].

Нитинол стал активно применяться в разных областях техники с 1960-х годов, когда было освоено его получение в промышленных масштабах. Сплавы на основе системы никель-титан наряду с выраженным эффектом памяти формы отличает высокая механическая прочность в сочетании с высокой коррозионной стойкостью. Данные сплавы часто используют в качестве уплотнителей в соединениях, в качестве датчиков в различных приборах, в преобразователях тепловой энергии в механическую и во многих других случаях [6].

Позже, в 1970-х началось использование никелида титана в медицине для создания имплантатов самого разного назначения. Изделия из нитинола применяются в челюстно-лицевой хирургии, офтальмологии, в сердечно-сосудистой медицине, в травматологии и в других областях [3]. Нитинол выгодно отличается от применявшихся ранее титановых сплавов и нержавеющей стали высокой стойкостью при динамических нагрузках в условиях агрессивной химической среды, которую представляет собой организм.

## 1.2 Пористый никелид титана

Применение сплавов на основе никелида титана в медицинской практике успешно происходит уже несколько десятков лет. Основное назначение изделий из этих материалов – создание имплантатов. Ключевым преимуществом этих материалов является их биосовместимость с тканями человека. Отдельно специалисты выделяют следующие характеристики данных материалов [3]:

- гистерезисное поведение материала;
- отсутствие химической реакции на введение материала в ткани организма;
- изменение формы при изменении напряжения и температуры;
- демпфирующее соответствие свойств материала характеристикам тканей;
- пористо-проницаемые свойства материала, соответствующие свойствам тканей организма;
- соответствие капиллярности и смачиваемости структур материала характеристикам тканей;
- способность материала инкубировать клеточные культуры и создавать условия для их роста в проницаемой структуре имплантата, а после имплантации поддерживать функцию органа;
- усталостная прочность материала;
- отсутствие проблем стерилизации материала и имплантатов.

Отдельную большую группу составляют пористые сплавы системы Ni-Ti. Несмотря на комплекс полезных физико-механических и химических свойств, имплантаты из цельного нитинола имеют существенные недостатки, такие как слабая межфазная связь и разница в модулях Юнга нитинола и костной ткани. Эти недостатки преодолеваются путем получения мелкопористой структуры нитинола, при которой свойства могут варьироваться в некоторых пределах. Достигается это путем изменения объема пор, их формы и размера [7].

Для производства изделий из пористого нитинола применяют различные техники порошковой металлургии, а в последнее время и аддитивные методы. Из ряда применяемых техник метод самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) отличается относительной простотой и экономичностью. Кроме того,

данный метод позволяет варьировать пористость и характерный размер пор в довольно широких пределах [8, 9]. Внешний вид заготовок, полученных методом СВС, приведен на рисунке 1.



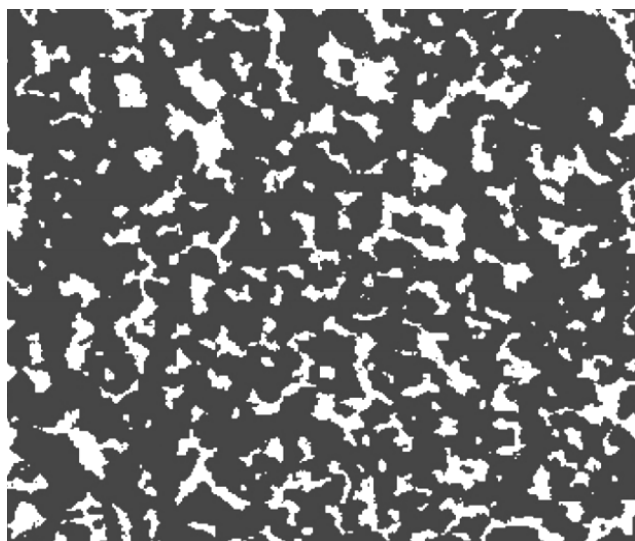
Рисунок 1 – Заготовки из никелида титана, полученные методом СВС

В пористом материале поровое пространство приобретает важное функциональное значение. В процессе функционирования имплантата оно заполняется живыми тканями организма и питающими тканевыми жидкостями. Пористый никелид титана имеет пористость 50–80% от объема образца. При этом поры представляют собой сплошные поровые каналы. До 5% объема пор приходится на закрытые поры, т.е. окруженные металлической матрицей. При такой степени пористости морфологическое описание пор сводится к определению размеров поперечных сечений поровых каналов.

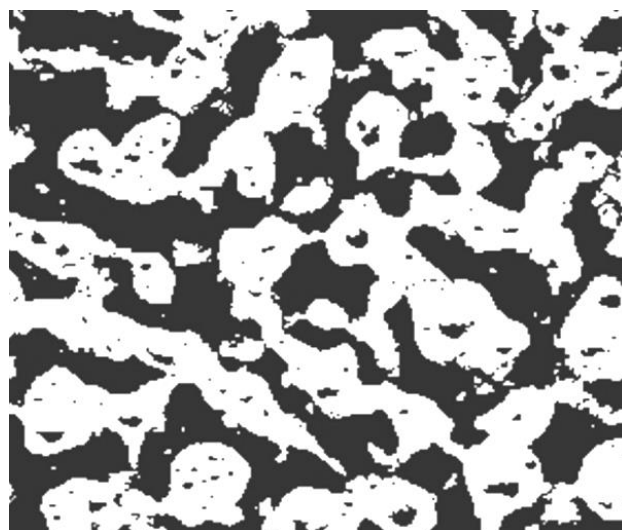
Качественно данные материалы можно разделить на мелкопористые и крупнопористые, которые значительно отличаются морфологией. Наглядно структура приведена на рисунке 2 [3].

При использовании СВС-метода морфологию порового пространства можно изменять в довольно широких пределах, меняя параметры режима синтеза, пропорции исходных порошков, проводя термообработку.





а)



б)

Рисунок 2 – Микрошлифы мелкопористого (а) и крупнопористого NiTi

Типичные физико-механические свойства пористого нитинола, полученного методом СВС, приведены в таблице 1 [9].

Таблица 1 – Физико-механические свойства пористого нитинола

Характеристика	Значение
Плотность, г/см <sup>3</sup>	5,85
Пористость, %	60–75
Размер поры, мкм	0,1–200
Проницаемость (вода/глицерин), м <sup>2</sup>	$(0,27/62) \times 10^{-9}$
Температура плавления, °С	1310
Предел прочности, МПа	100–500
Удлинение до разрыва, %	5–7
Температура фазового перехода, °С	-180 – 50

Образцы, исследуемые в данной работе, были получены двумя методами СВС: в открытом и в закрытом реакторе. Процедура синтеза в разных типах реакторов различается, что приводит к отличиям в структуре образцов. Характерное распределение размера пор и толщин металлических стенок приведено на рисунке 3 [10]. Данные результаты получены с использованием оптической металлографии по

шлифам. Типичные геометрические характеристики образцов приведены в таблице 2.

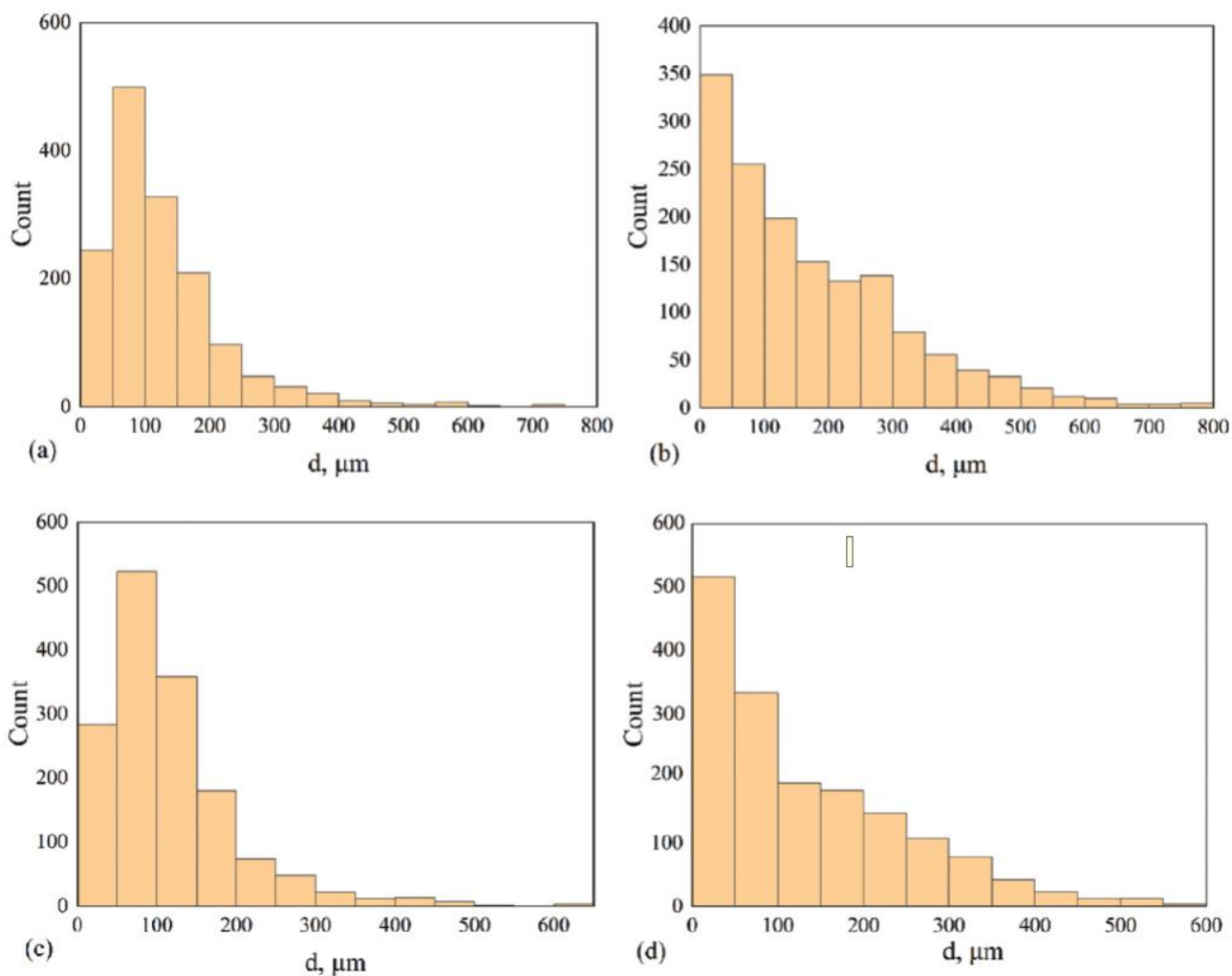


Рисунок 3 – Гистограммы толщин стенок (а, с) и диаметров пор (b, d) в образцах, полученных методом СВС в закрытом (а, b) и в открытом (с, d) реакторе [10]

Таблица 2 – Геометрические характеристики образцов пористого никелида титана, полученного методом СВС

Вид СВС	Толщина стенок, мкм	Диаметр пор, мкм	Пористость, %
закрытый реактор	92-124	159-179	64-66
открытый реактор	84-114	124-137	60-62

Подводя итог данному подразделу отметим, что работы по исследованию и совершенствованию протезов из никелида титана ведутся широко и в разных направлениях. Здесь можно выделить такие области, как улучшение биосовместимости [11], изучение физических и механических свойств [12, 13], повышение эффективности производства пористого нитинола [7, 14], а также новые подходы к производству протезов [15, 16].

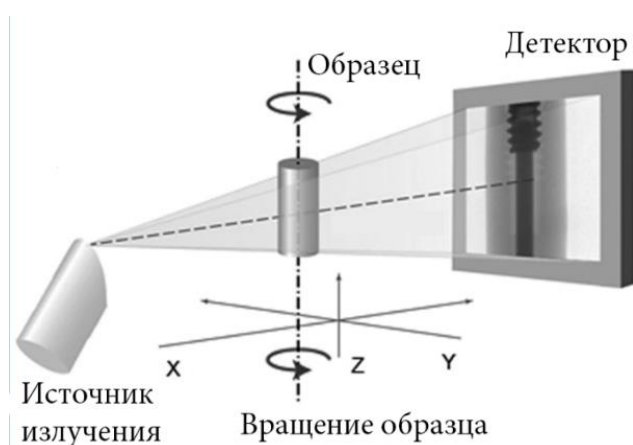
### **1.3 Метод рентгеновской томографии**

Рентгеновская или компьютерная томография изначально разрабатывалась для медицинской диагностики и в первые десятилетия своего применения фокусировалась исключительно на медицине. По мере развития рентгеновской техники сложилась возможность более широкого применения данной техники неинвазивной диагностики. Не медицинское применение компьютерной томографии называют промышленной или лабораторной рентгеновской томографией. Принцип техники остался неизменным, поменялась лишь техническая реализация. Ключевым изменением стало существенное повышение пространственной детализации. Если в медицинских исследованиях достаточно пространственного разрешения на уровне одного миллиметра [17], то в современных лабораторных и промышленных установках, как правило, добиваются разрешения на уровне нескольких микрометров, а в некоторых случаях и сотен нанометров [18]. В связи с этим одно из устоявшихся названий данного метода – микротомография. Далее по тексту термины «рентгеновская томография», «компьютерная томография» и «микротомография» будут использоваться как синонимы, если не оговорено иное.

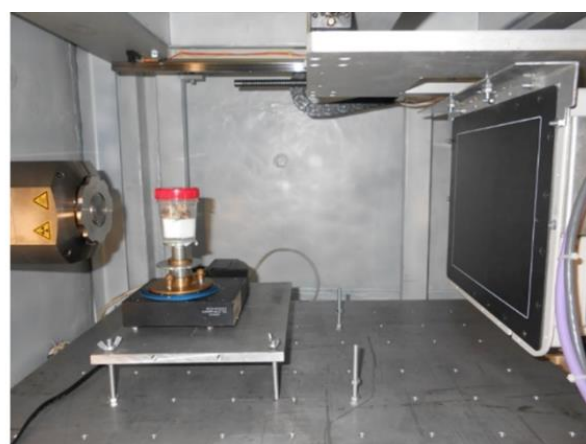
Параллельно развитию небольших рентгеновских установок, реализующих томографических метод, данная техника широко применяется на крупных научных установках – синхротронах, которые на данный момент обеспечивают самые передовые результаты с применением рентгеновской томографии [19].

Здесь кратко опишем метод микротомографии, реализуемый с применением лабораторных установок.

Чаще всего в лабораторных и промышленных томографах реализуется геометрическая схема с коническим пучком излучения (рисунок 4). Расходящийся пучок излучения от рентгеновского аппарата проходит через объект исследования и регистрируется матричным детектором излучения. Использование расходящегося пучка, при условии малого размера фокального пятна на аппарате, позволяет варьировать увеличение рентгеновского изображения на детекторе, тем самым регулируя детализацию томографических данных. Данная геометрическая схема не лишена недостатков, однако обеспечивает высокую производительность томографии при достаточно хорошем качестве томографических изображений.



а)



б)

Рисунок 4 – Геометрическая схема томографа с коническим пучком (а) и рабочее пространство томографа ОРЕЛ-МТ, на котором проводились данные исследования (б)

В процессе сбора данных объект исследования последовательно поворачивается на небольшой угол, производится регистрация в этом ракурсе и данные сохраняются на управляющий компьютер. После получения отдельных снимков, называемых также проекционными снимками или теневыми проекциями, производится реконструкция томографических сечений, которые представляют собой изображения внутренней структуры объекта исследования в направлении, перпендикулярном оси вращения объекта. Весь процесс показан на схеме ниже (рисунок 5).

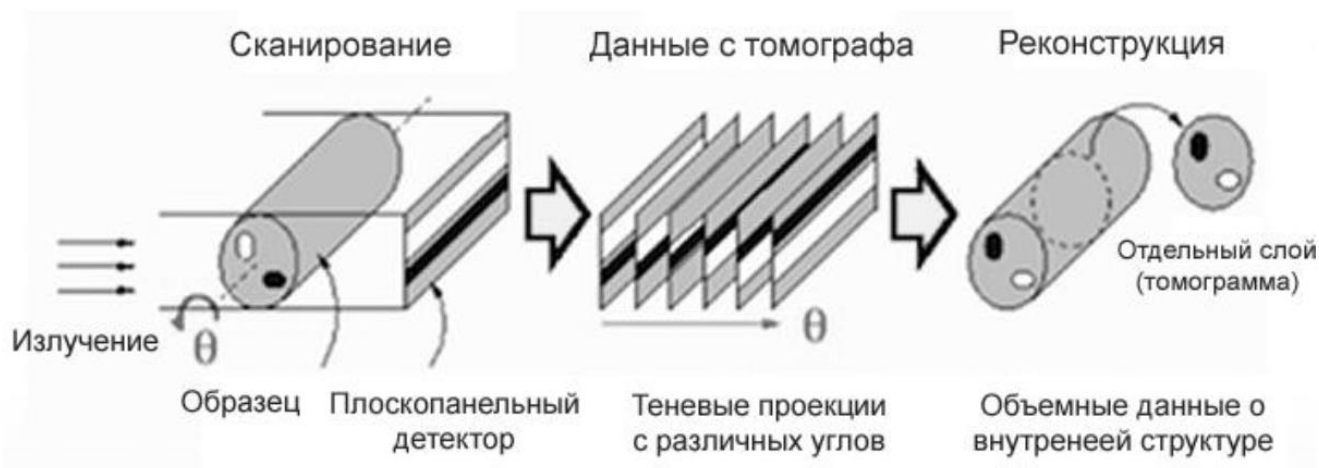


Рисунок 5 – Процесс получения томографических данных

Для процесса томографии важны параметры режима сканирования, которые определяются свойствами объекта исследования: его размером, плотностью и химическим составом. Основные параметры режима таковы:

- ускоряющее напряжение на рентгеновском аппарате;
- сила тока анода;
- геометрическое увеличение;
- угловой шаг сканирования;
- число теневых проекций;
- время экспозиции одной проекции;
- наличие металлического фильтра.

После реконструкции набор томограмм, также называемый сетом, подвергается сегментации и последующему количественному анализу. Данный этап будет рассмотрен подробнее в следующем подразделе.

В связи с тем, что в настоящее время реализаций и сфер применения рентгеновской томографии сложился целый спектр, в данной работе томография будет рассмотрена более узко, а именно в приложении к исследованию пористых материалов на основе никелида титана.

Одна из первых работ, в которой применяется компьютерная томография для исследования пористости никелида титана, вышла в печать в 2010 году [20]. Авторы использовали коммерчески доступный в то время томограф компании «Skyscan»

(ныне компания «Bruker micro-CT») и продемонстрировали возможность регистрировать поры размером более 10 мкм. При этом можно проводить количественный анализ пористости, например, получать распределение пор по размерам. Авторы исследовали влияние пост-обработки образцов из нитинола импульсом тока на конечную пористость. С помощью микротомографии авторам удалось установить влияние пост-обработки на пористость в диапазоне от 10 мкм до 100 мкм. Также в работе приведена трехмерная визуализация томографического сета, т.е. набора отдельных томограмм, сложенных в единый массив. Иллюстрация из работы [20] приведена на рисунке 6.

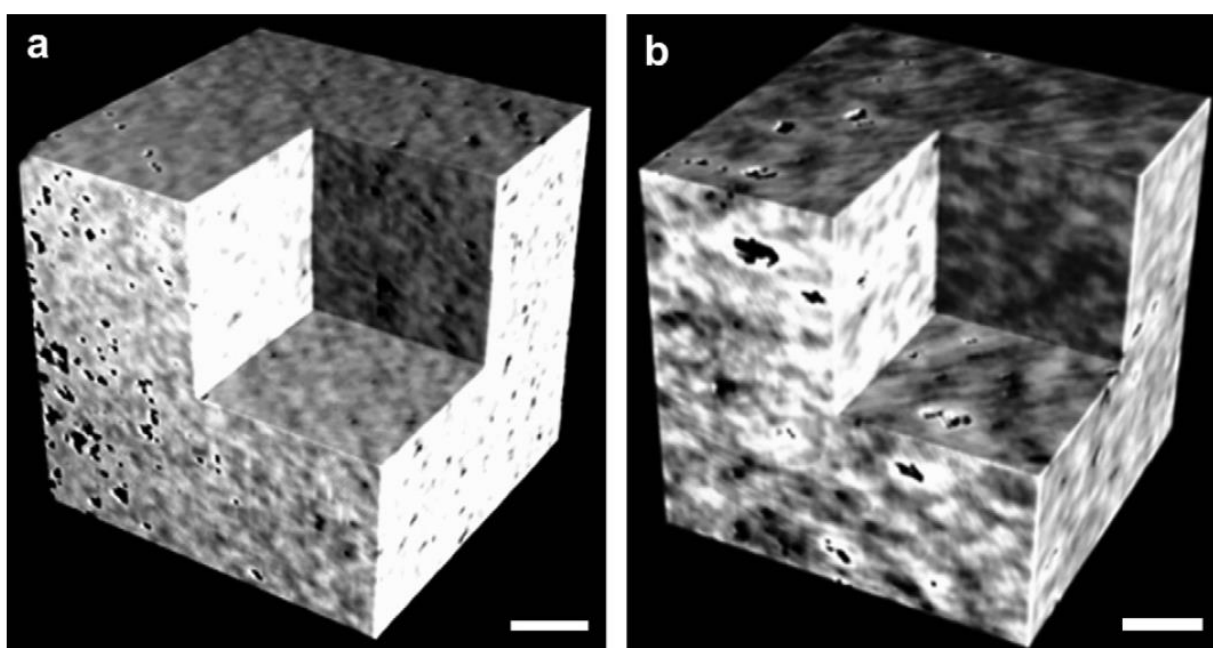


Рисунок 6 – Объемный вид томографических данных образцов никелида титана, полученного методом а) горячего прессования и б) реакционного синтеза. Размер шкалы – 100 мкм

В 2015 году опубликована работа, в которой сделана первая попытка охарактеризовать пористый нитинол, полученный методом СВС [21]. В работе указывается на важность морфологического описания пористости и возможность метода микротомографии решать эту задачу, однако приведены результаты только по одному образцу, имеющему к тому же малый размер. Очевидно, что каких-то серьезных выводов при отсутствии выборки сделать невозможно. Из достоинств

данной работы можно отметить высокую детализацию томографии. Размер вокселя в исследовании составил 3,54 мкм, что было на пределе возможностей томографов того времени. В исследовании также был использован прибор ранее упомянутой компании Skyscan. Также авторам удалось визуализировать строение поровых каналов в исследуемом образце.

На рисунке 7 приведена иллюстрация из работы [21], где авторы указывают на строение порового пространства, видимое при данном пространственном разрешении. Отдельные томограммы, выбранные на разной высоте образца призваны показать микропоры, размер которых не превышает 20 мкм, а также закрытые и открытые поры. Закрытыми порами называют поры, которые окружены материалом матрицы, в то время как открытые имеют выход наружу и соприкасаются с окружающим воздухом. Микропоры, судя по всему, относятся к закрытым порам.

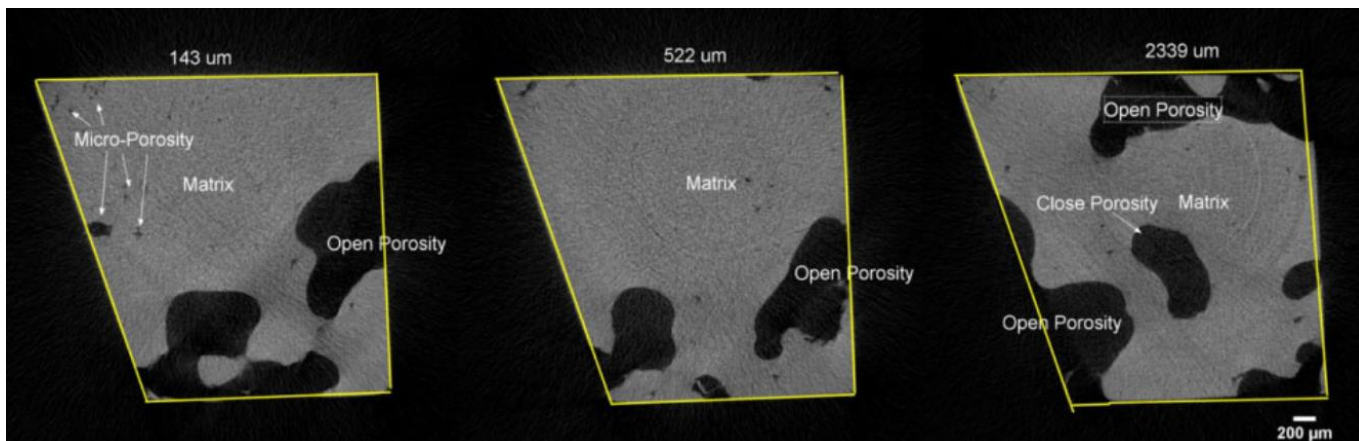


Рисунок 7 – Отдельные сечения в образце пористого никелида титана, иллюстрирующие структуру порового пространства. Желтым цветом обозначены границы образца, отделяющие его от воздуха. Темные области внутри границы считаются порами

На рисунке 8 приведена объемная визуализация фаз образца, полученная путем бинаризации томографических данных. Данная операция представляет собой выделение отдельных объектов или фаз на изображениях. Результатом является цифровой объект или модель.

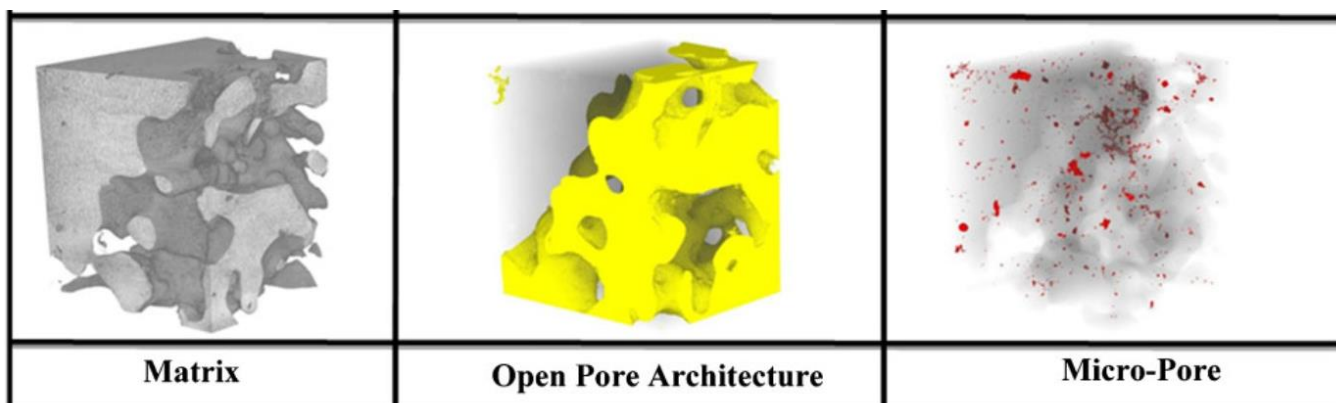


Рисунок 8 – Визуализация образца пористого титанола по результатам микротомографии: серый цвет – металлическая матрица, желтый цвет – поровое пространство, красный цвет – микропоры. Размер образца: 2,9×2,45×3,54 мм<sup>3</sup>

Кроме этого, в рассматриваемой работе был произведен расчет размера закрытых пор по исследуемому объему образца, построено распределение открытых пор по размеру и занимаемому объему, а также построено распределение пор по степени сферичности. Сферичность – это безразмерный показатель, описывающий близость геометрической формы объекта к идеальной сфере. Полная сферичность равна одному, а максимально далекая от сферы форма, например, узкий, вытянутый цилиндр, будет показывать число, близкое к нулю.

В рассматриваемой работе авторы попытались связать пористость с механическими свойствами материала. По их оценкам пористость неоднородна по объему полного образца, синтезированного методом СВС, что приводит к вариации модуля упругости до значений 4 ГПа, что составляет проценты от модуля упругости монолитного никелида титана, значения которого лежат в пределах 40-100 ГПа [3].

Геометрическая структура порового пространства довольно сложна. Авторы работы [21] предложили интересное методическое решение для качественного описания степени разветвленности поровых каналов. Они вводят понятие «индекс связанности-разветвленности», который вычисляется по следующей формуле:

$$CTI = \exp\left(\frac{1}{\alpha} \cdot \frac{n_J}{n_J + n_L}\right),$$



где  $n_L$  – число связей,  $n_J$  – число соединений,  $n_B$  – число ответвлений (веток) и  $\alpha = n_L/n_B$ .

Рисунок 9 поясняет геометрические элементы, используемые при расчете данного индекса.



Рисунок 9 – Геометрические элементы для расчета индекса «связанность-разветвленность»

Сама процедура получения геометрических элементов из томографических данных достаточно сложна. Авторы назвали этот подход «идеализированной скелетонизацией», когда внутри поровых каналов прокладываются ломаные линии, ответвления и соединения которых образуют своего рода скелет порового пространства. На примерах, приведенных в статье [21], показано, что значения индекса СТІ для небольших рассмотренных областей варьируется в пределах от одного до десяти. На рисунке 10 приведен пример результата скелетонизации и значения индекса СТІ для некоторых областей исследованного образца.

Хотя предложенная идея может быть использована для описания структуры порового пространства, сами авторы не предлагают алгоритма для реализации этого подхода в трехмерном пространстве, ограничиваясь расчетом в небольшом объеме с обработкой отдельных плоских слоев. Дальнейшего развития эта работа, насколько можно судить, не получила.

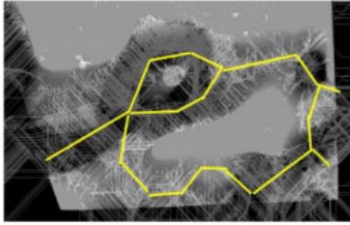



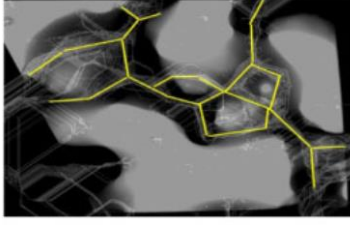



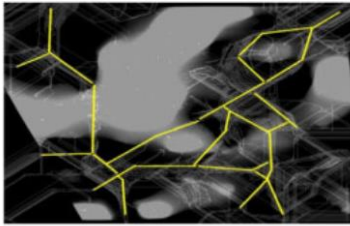



1538 – 1883		Branch	Link	Junction	1.54
					
		21	12	4	
2293 – 2580		Branch	Link	Junction	5.23
					
		25	8	9	
2935 – 3280		Branch	Link	Junction	8.76
					
		30	8	11	

Рисунок 10 – Пример расчета индекса «связанность-разветвленность» для разных областей пористого никелида титана. Желтым цветом выделены линии «скелета» поровых каналов. В правой части приведены данные по геометрическим элементам и результат расчета индекса СТИ

В работе [22] рентгеновская томография с использованием синхротронного излучения помогла выявить поведение пористого никелида титана под действием сжимающих нагрузок, характерных для работы имплантата в организме. Вместо порошкового сплава, который обычно используется для изготовления настоящих имплантатов, была использована модель, специальным образом изготовленная методом селективной лазерной печати (рисунок 11).

Напечатанный образец сжимали и одновременно снимали рентгеновские изображения для последующей томографии. Кроме этого, анализировали поведение образца при нагреве от 15 до 37 °С, что соответствует температурам фазового перехода в нитиноле. В процессе нагрева наблюдали за деформированным образцом, который постепенно восстанавливал форму. Изменения формы

регистрировались в реальном времени и учитывались при томографической реконструкции. Данный подход используют на синхротронных станциях для проведения томографии *in situ* при изучении различных процессов в их динамике. Высокая светимость синхротрона позволяет набирать достаточно данных для томографии за небольшое время, например, за несколько секунд. Этим томография на синхротронных источниках выгодно отличается от реализации с применением рентгеновских аппаратов, которые имеют светимость на несколько порядков меньше при соответствующем увеличении времени набора данных.

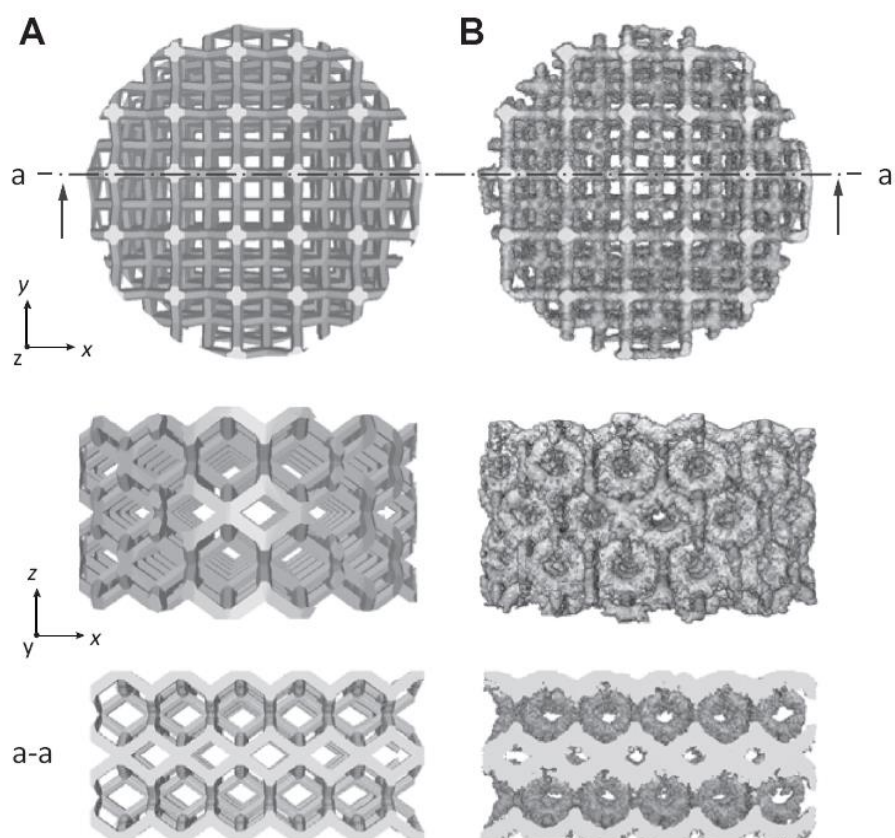


Рисунок 11 – CAD-модель имплантата, по которой печатали образец (колонка А) и цифровая модель образца после томографии (колонка В) как приведено в работе [22]

Используя томографию *in situ*, авторам удалось локализовать деформации, а также процесс восстановления формы образца из нитинола в процессе нагрева. Кроме этого, в рассматриваемой работе было использовано математическое моделирование с учетом эффекта памяти формы и сверхпластичности. Расчет модели хорошо совпал с результатами наблюдений с помощью томографии.

На рисунке 12 изображен элемент цифровой модели образца, полученные на основании томографических данных.

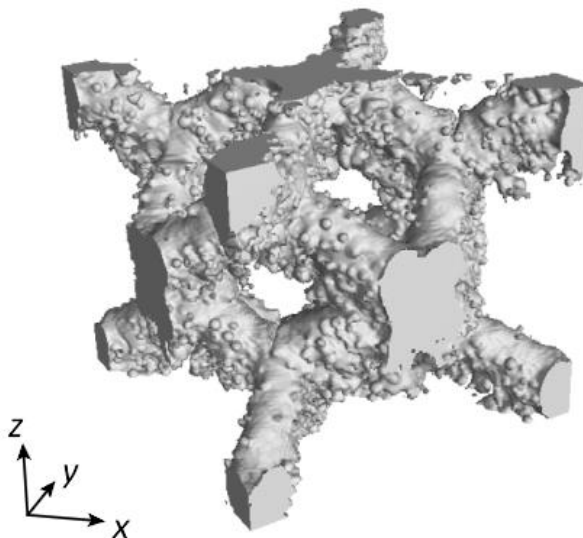


Рисунок 12 – Элемент цифровой модели образца размером  $2 \times 2 \times 2$  мм<sup>3</sup>, с размером вокселя 13 мкм, полученный из томографических данных и используемый в анализе авторами работы [22]

Используя томографию с разрешением по температуре и времени, авторам удалось определить механизм деформации в никелиде титана с искусственно воссозданной пористостью и установить, что степени деформации 6% соответствуют локальные деформации сжатия и растяжения до уровня 15%.

В работах [23, 24] томография была использована для построения цифровых моделей реального пористого нитинола, полученного методом СВС. На рисунке 13 показана томограмма и цифровая модель, полученная из томографического сета [23]. Полученные модели далее использовались в конечно-элементном моделировании, которое показало концентрацию напряжений и локализацию деформаций при квазистатическом сжатии модели. Для конечно-элементного моделирования был использован фрагмент меньшего размера, вырезанный из центрально части полной цифровой модели. Фрагмент с нанесенной конечно-элементной сеткой показан на рисунке 14.

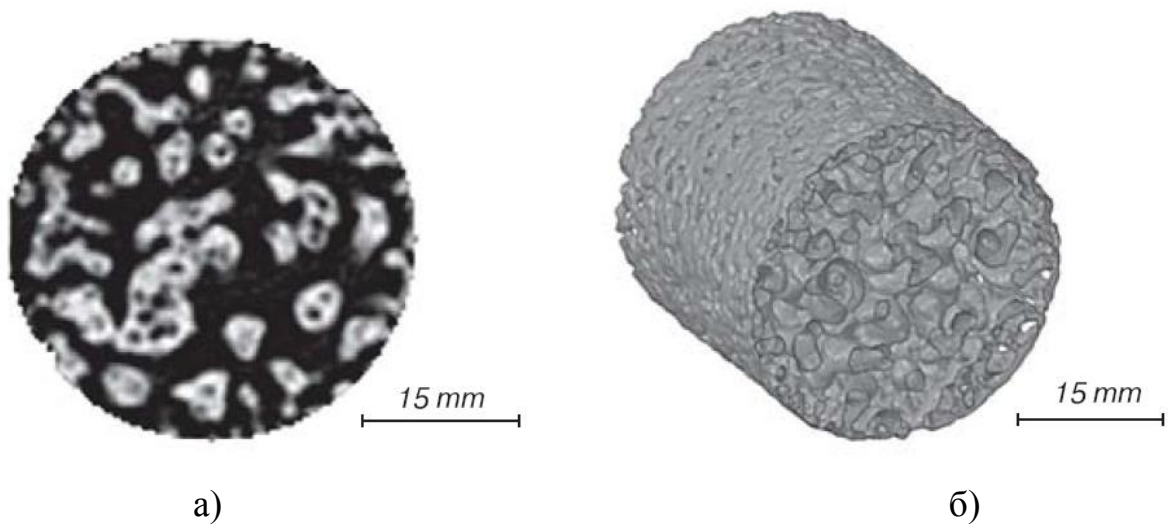


Рисунок 13 – Томограмма пористого никелида титана (а) и цифровая модель из томографических данных (б) как показано в работе [23]

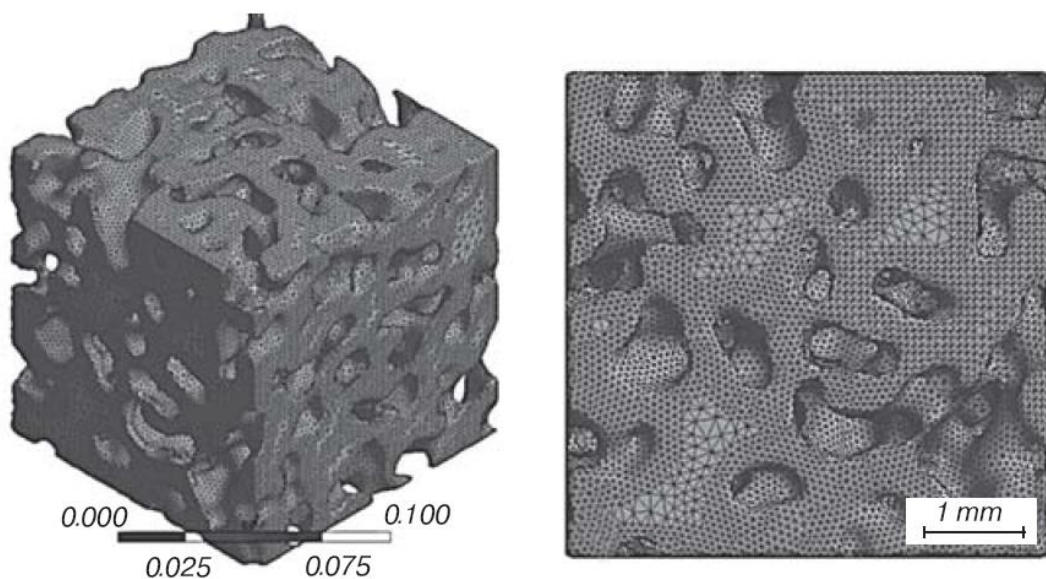


Рисунок 14 – Твёрдая модель пористого нитинола с разбиением на конечные элементы из работы [23]

В данном подразделе показаны типичные задачи, которые можно решать с применением микротомографии в области исследования структуры и поведения пористого никелида титана.

#### 1.4 Исследуемые образцы и примененное оборудование

Порошки никелида титана марки ПН45Т55ОМ, никеля марки ПНК ОТ-4, титана марки ПТОМ-2 были смешаны между собой в соответствующих навески концентрациях. После этого проводили процедуру уплотнения путем автоматического отстукивания колбы с частотой 5 ударов в минуту в течение 1 часа. Уплотнение протекало в кварцевой колбе диаметра 30 мм и длиной 300 мм, сама колба служит реактором в печи. Перед поджогом образцов печь для СВЧ наполняли аргоном, который препятствует окислению порошков во время нагрева. Инициировали СВ-синтез электрической дугой, предварительно выдержав в печи до стабильной температуры 520 °С. После протекания синтеза образцы охлаждали погружением в воду комнатной температуры. Верхние слои удаляли на токарном станке резцом. СВС проводили в закрытом и в открытом реакторе [10]. В данной работе акцент сделан на изучении структуры образцов из открытого реактора. Образцы из закрытого реактора приведены для сравнения.

Исследуемые образцы вырезались электроэрозионным способом из одной заготовки. Размеры образцов составляли 6×3×3 мм<sup>3</sup>. Внешний вид одного из образцов приведен на рисунке 15.

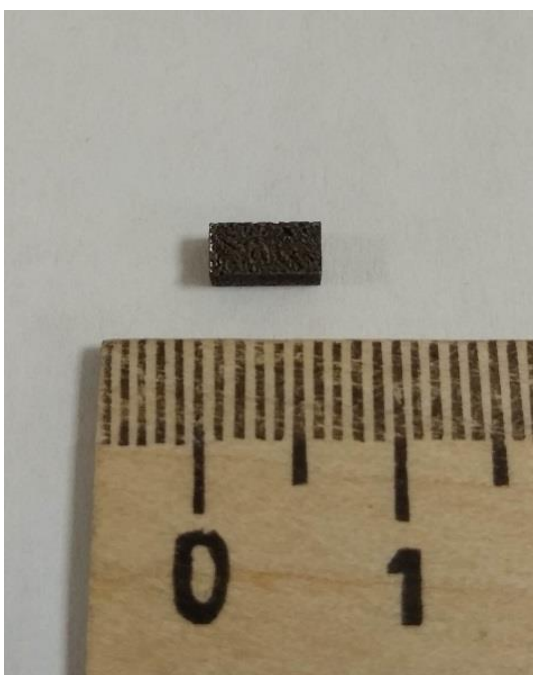


Рисунок 15 – Один из исследованных образцов

Образцы подвергались сжатию на машине INSTRON 3386 со скоростью 0,005 1/с до достижения определенной остаточной деформации. Соответствующие значения деформации для разных образцов составили 2%, 5%, 10% и 15%. Кроме деформированных образцов для томографии был использован и недеформированный образец.

Томографические данные получали на рентгеновском микрокомпьютерном томографе ОРЕЛ-МТ, собранном в Томском политехническом университете [25]. Томограф оснащен острофокусным рентгеновским аппаратом XWT 160-ТС (производитель X-RAY WorX, Германия), плоскопанельным рентгеновским детектором PaxScan-2520V (производитель Varian, США) и системой позиционирования объекта исследования. Томограф использует коническую геометрию рентгеновского пучка. О данной схеме сканирования было сказано ранее.

Полученные рентгеновские изображения (проекции) обрабатываются специализированным программным обеспечением (ПО) с целью получения томограмм – плоских срезов, перпендикулярных оси вращения. Основные характеристики использованного томографа приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Основные характеристики томографа ОРЕЛ-МТ

Рентгеновский аппарат	XWT 160-ТС (X-RAY WorX, Германия)
Анодное напряжение, кВ	20 – 160
Анодный ток, мкА	5 – 1000
Фокусное пятно, мкм	1,4
Детектор	PaxScan-2520V (Varian, США)
Размер пикселя, мкм	127
Рабочая область детектора, мм	193x242
Размер детектора, пикселей	1900x1516
Поворотная система	MS208Ec (Германия)
Минимальный угловой шаг, °	0,007

Томография проводилась при следующих параметрах сканирования: ускоряющее напряжение – 100 кВ; ток анода – 30 мкА; угловой шаг –  $0,3^\circ$ ; число рентгеновских проекций – 1200, экспозиция кадра – 0,6 с, размер вокселя томограмм – 3,175 мкм.

Для томографической реконструкции, визуализации и анализа полученных данных применялось программное обеспечение компании Bruker-microCT [26]. Для реконструкции применялась программа NRecon, версия 1.7.1.6, для анализа – программа CT Analyzer, версия 1.13.5.1.

Реконструкция проводилась с одинаковыми параметрами для достижения сопоставимости результатов. Результатом реконструкции является набор сечений, называемый сетом, который представляет полный объем объекта исследования.

Для проведения последующего количественного анализа томографические сеты были предварительно подготовлены. В связи с большим размером полученных сетов – порядка 1 Гб каждый – они пережимались с коэффициентом 2, при этом объем данных сокращался в 8 раз. В полученных сетях размер вокселя, т.е. элементарной ячейки объема, становился равен 6,35 мкм. Кроме этого, из сетов были выделены меньшие области, заключенные в объеме образцов. Сделано это для того, чтобы исключить из расчетов окружающий воздух, оставив только материал образца. Такой уменьшенный сет называется областью интереса или volume of interest, VOI. Размер VOI составил  $2,54 \times 2,54 \times 2,54 \text{ мм}^3$ . В этом объеме проводились все последующие вычисления.

### **1.5 Качественный анализ внутренней структуры пористого нитинола**

Прежде чем приступать к количественному анализу структуры, отметим качественные особенности пористой структуры нитинола. Как говорилось ранее, метод СВС позволяет в широких пределах менять структуру металлического каркаса и, соответственно, порового пространства. Если взглянуть на строение образцов, полученных в открытом и закрытом реакторе, можно увидеть явные различия в их структуре (рисунок 16).



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

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
4БМ1И	Батранину Андрею Викторовичу

<b>Школа</b>	<b>ИШНПТ</b>	<b>Отделение школы (НОЦ)</b>	Отделение материаловедения
<b>Уровень образования</b>	Магистратура	<b>Направление/специальность</b>	22.04.01 Материаловедение и технологии материалов

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

1. <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	<i>Бюджет проекта – не более 206 000 руб., в т.ч. затраты по оплате труда – не более 116 400 руб. Трудоемкость проекта – не более 51 чел.-дня Тарифные ставки исполнителей по штатному расписанию ТПУ.</i>
2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	<i>Значение показателя интегральной ресурсоэффективности – не менее 4 баллов из 5.</i>
3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	<i>Отчисления на страховые взносы – 30%.</i>

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

1. <i>Оценка коммерческого и инновационного потенциала НТИ</i>	<i>Определение целевого рынка, его сегментирование. Анализ конкурентных решений.</i>
2. <i>Планирование процесса управления НТИ: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок</i>	<i>Составление календарного плана проекта. Определение бюджета НИ 1. Расчёт материальных затрат НИ 2. Расчет затрат на специальное оборудование для научных работ 3. Основная заработная плата исполнителей 4. Отчисления на социальные нужды 5. Накладные расходы</i>
3. <i>Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности</i>	<i>Определение эффективности на основе расчёта: 1. Интегральный финансовый показатель. 2. Интегральный показатель ресурсоэффективности. 3. Интегральный показатель эффективности</i>

**Перечень графического материала:**

1. <i>Карта сегментирования рынка</i>
2. <i>Оценка конкурентоспособности технических решений</i>
3. <i>График проведения и бюджет НТИ</i>
4. <i>Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НТИ</i>

<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>
доцент ОСГН ШБИП ТПУ	Спицына Любовь Юрьевна	К.Э.Н.		

**Задание принял к исполнению студент:**

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
4БМ1И	Батранин Андрей Викторович		

## **2. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение**

Тема: «Применение рентгеновской томографии для количественного анализа пористых металлических композитов»

Цель работы: разработка методики количественного анализа внутренней структуры пористого никелида титана с применением компьютерной томографии высокого разрешения.

В процессе исследования проводились: рентгеновская томография образцов из пористого никелида титана, анализ внутренней структуры с применением специализированного программного обеспечения, обработка результатов в табличной форме в программах Excel, Matlab, анализ существующих исследований пористого никелида титана с применением рентгеновской томографии.

В поиске источников финансирования для проведения научного исследования и реализации его результатов, необходима оценка коммерческой ценности работы. При этом разработчики должны представлять реальное состояние и перспективы проводимых ими научных исследований. Помимо улучшения технических параметров по сравнению с предыдущими разработками необходимо оценить научное исследование с точки зрения коммерческой привлекательности для конечного потребителя.

Целью выполнения данного раздела выпускной квалификационной работы является формирование навыков оценки результатов научной работы и поиск источников финансирования для проведения научного исследования. Для достижения обозначенной цели необходимо решить следующие задачи:

- Оценка коммерческого потенциала научно-исследовательской работы и ее перспективы.
- Определение возможных альтернатив проведения научных исследований, отвечающих современным требованиям в области ресурсоэффективности и ресурсосбережения.
- Планирование научно-исследовательских работ.
- Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования.

## **2.1 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения**

### **2.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования**

Пористый никелид титана широко применяется в производстве медицинских имплантатов. Существуют разные технологии изготовления имплантатов. Одной из самых экономичных и гибких считается технология СВС [9]. Данную технологию давно применяют в Сибирском физико-техническом институте, где и были произведены образцы, используемые в данном исследовании. Работы по совершенствованию технологии изготовления имплантатов ведутся до сих пор. В основе прогресса технологии лежат знания о внутренней структуре пористого никелида титана и о его физических, механических и химических свойствах в условиях реальной эксплуатации в теле пациента.

Для проведения исследований самого материала используют широкий спектр научных инструментов – оптическая, электронная микроскопия, дифракционный анализ, метод корреляции изображений и т.д. Рентгеновская томография также применяется, но значительно реже. Причины этого состоят в меньшей распространенности самих томографических установок, подходящих для исследования материалов такой сложной внутренней структуры, и в сложности обработки и интерпретации томографических данных.

При этом рентгеновская томография дает полную картину о механическом строении пористого материала и может значительно обогатить понимание механизма деформации под нагрузкой, установить анизотропию механических свойств в привязке к внутреннему строению, прояснить картину разрушения материала и ряд других моментов, которые недоступны остальным научным методам исследований.

Разработка метода анализа томографических данных пористого никелида титана будет полезна производителям имплантатов, потребителям этой продукции, т.е. медицинским учреждениям, применяющим эти имплантаты, а также научному сообществу в целом. Графически потенциальные потребители представлены на карте сегментирования (рисунок 26).

		Вид деятельности		
		Технология изготовления имплантатов	Эксплуатация имплантатов	Применение пористых материалов в целом
Вид организации	Производители имплантатов			
	Медицинские учреждения			
	Научные организации (материаловедение)			

Рисунок 26 – Карта сегментирования рынка применения метода рентгеновской томографии для исследований пористого никелида титана

Рисунок 26 показывает, что разные виды организаций могут иметь потенциальный интерес к повышению эксплуатационных свойств имплантатов из пористого никелида титана. Производители могут получить дополнительный инструмент для управления технологией, поскольку томография наглядно показывает изменения внутренней структуры материала. Научные организации могут применить разрабатываемую методику к другим пористым материалам, которые достаточно широко применяются в настоящее время.

### 2.1.2 Анализ конкурентных технических решений

Поскольку настоящая работа посвящена разработке методики исследования, целесообразно провести сравнение разрабатываемого решения с существующими, апробированными методами исследования пористых материалов. Для сравнения выберем следующие конкурирующие методы: оптическая микроскопия («О»), электронная микроскопия («Э») и рентгеновская томография с применением синхротронного излучения («С»). Разрабатываемая методика маркируется «Т». Оценочная карта конкурентных решений приведена в таблице №.

Расчет коэффициентов производится по формуле:

$$K = \sum B_i \cdot b_i,$$

где  $B_i$  – вес соответствующего критерия,  $B_i$  – балл критерия в диапазоне от 1 до 5, где большему значению соответствует более сильная позиция. Результаты расчета приведены в таблице 6.

Таблица 6 – Оценочная карта конкурентных технических решений

Критерий оценки	Вес (В)	Баллы				Конкурентоспособность			
		Б <sub>Т</sub>	Б <sub>О</sub>	Б <sub>Э</sub>	Б <sub>С</sub>	К <sub>Т</sub>	К <sub>О</sub>	К <sub>Э</sub>	К <sub>С</sub>
Технические критерии оценки ресурсоэффективности									
Трудоемкость	0,1	5	3	2	5	0,5	0,3	0,2	0,5
Возможность оцифровки	0,15	5	3	4	5	0,75	0,45	0,6	0,75
Неинвазивность	0,15	5	3	2	4	0,75	0,45	0,3	0,6
Репрезентативность данных	0,15	5	3	3	5	0,75	0,45	0,45	0,75
Энергоэкономичность	0,05	4	5	4	1	0,2	0,25	0,2	0,05
Квалификация персонала	0,05	4	5	3	2	0,2	0,25	0,15	0,1
Экономические критерии оценки ресурсоэффективности									
Конкурентоспособность	0,1	4	5	3	1	0,4	0,5	0,3	0,1
Уровень проникновения на рынок	0,05	3	5	4	1	0,15	0,25	0,2	0,05
Стоимость основных средств	0,1	3	5	2	1	0,45	0,75	0,3	0,15
Стоимость эксплуатации	0,1	4	5	3	1	0,6	0,75	0,45	0,15
Итого:	1					4,4	3,9	2,9	3,1

Расчет показывает, что метод томографии, реализуемый в лабораторных условиях, с учетом критериев, значимых для настоящей работы, имеет наибольший балл конкурентоспособности.

### 2.1.3 SWOT - анализ

Для проведения комплексного анализа проекта воспользуемся SWOT-анализом. SWOT-анализ – это выявление сильных (S – strengths) и слабых (W – weaknesses) сторон исследуемого объекта, что описывает внутреннюю среду, а также возможностей (O – opportunities) и угроз (T – threads) внешней среды. Он проводится в три этапа. На первом этапе определяются сильные и слабые стороны проекта, а также выявляются возможности и угрозы для реализации проекта, которые проявились или могут появиться в его внешней среде, приведены в таблице 7.

Таблица 7 – SWOT-матрица проекта

<b>Strengths (сильные стороны)</b>	<b>Weaknesses (слабые стороны)</b>
S1. Отсутствие пробоподготовки S2. Тест-объекты не подвергаются воздействию S3. Высокая производительность метода при получении результатов S4. Трехмерные данные об объекте исследования	W1. Дорогостоящее оборудование W2. Сложность интерпретации данных W3. Необходимость специализированного ПО для обработки данных
<b>Opportunities (возможности)</b>	<b>Threads (угрозы)</b>
O1. Прямое создание цифровых моделей тест-объектов O2. Прямое наблюдение деформации после механических испытаний O3. Широкий набор геометрических измерений внутренней структуры	T1. Отсутствие проработанной методики аттестации материалов T2. Ограничения на геометрические размеры тест-объектов T3. Отсутствие отечественных аналогов применяемого оборудования и ПО

На втором этапе на основании SWOT-матрицы строятся матрицы возможностей и угроз, позволяющие оценить эффективность проекта, а также надёжность его реализации. Соотношения параметров представлены в таблицах 8–11.

Таблица 8 – Матрица проекта «Сильные стороны – возможности»

		Сильные стороны			
		<b>S1</b>	<b>S2</b>	<b>S3</b>	<b>S4</b>
Возможности	<b>O1</b>	-	+	-	+
	<b>O2</b>	+	+	-	+
	<b>O3</b>	-	-	-	+

Таблица 9 – Матрица проекта «Слабые стороны – возможности»

		Слабые стороны		
		<b>W1</b>	<b>W2</b>	<b>W3</b>
Возможности	<b>O1</b>	-	-	+
	<b>O2</b>	-	-	+
	<b>O3</b>	-	+	+

Таблица 10 – Матрица проекта «Сильные стороны – угрозы»

		Сильные стороны			
		<b>S1</b>	<b>S2</b>	<b>S3</b>	<b>S4</b>
Угрозы	<b>T1</b>	-	-	-	+
	<b>T2</b>	-	+	+	+
	<b>T3</b>	-	-	-	+

Таблица 11 – Матрица проекта «Слабые стороны – угрозы»

		Слабые стороны		
		W1	W2	W3
Угрозы	T1	+	+	+
	T2	-	-	-
	T3	+	-	+

На заключительном этапе проводится сам SWOT-анализ, которые выявляет самые сильные связи между всеми параметрами. Результат приведен в таблице 12.

Таблица 12 – SWOT-анализ научно-исследовательского проекта

	<p><b>Сильные стороны:</b>                      S1. Отсутствие пробоподготовки                      S2. Тест-объекты не подвергаются воздействию                      S3. Высокая производительность метода при получении результатов                      S4. Трехмерные данные об объекте исследования</p>	<p><b>Слабые стороны:</b>                      W1. Дорогостоящее оборудование                      W2. Сложность интерпретации данных                      W3. Необходимость специализированного ПО для обработки данных</p>
<p><b>Возможности:</b>                      O1. Прямое создание цифровых моделей тест-объектов                      O2. Прямое наблюдение деформации после механических испытаний                      O3. Широкий набор геометрических измерений внутренней структуры</p>	<p><b>S2S4O1O2</b>                      S1O3                      S4O3</p>	<p>W3O3                      W3O1O2O3</p>
<p><b>Угрозы:</b>                      T1. Отсутствие проработанной методики аттестации материалов                      T2. Ограничения на геометрические размеры тест-объектов                      T3. Отсутствие отечественных аналогов применяемого оборудования и ПО</p>	<p>S2S3T2                      S4T1T2T3</p>	<p><b>W1W3T1T3</b>                      W2T1</p>

В таблице 12 жирным шрифтом выделены наиболее коррелирующие между собой параметры. Так, видно, что отсутствие воздействия на исследуемый объект положительно связано с возможностью создания цифровых двойников этих объектов.

Кроме этого, уязвимой стороной проекта являются слабая методическая проработка, зависимость от импортного оборудования и программного обеспечения для реализации метода.

## 2.2 Инициация проекта

В рамках процессов инициации определяются изначальные цели и содержание и фиксируются начальные финансовые ресурсы. Определяются внутренние и внешние заинтересованные стороны проекта, которые будут взаимодействовать и влиять на общий результат выполняемого проекта.

### 2.2.2 Цели и результаты проекта

Перед определением целей перечислим заинтересованные стороны проекта (таблица 13).

Таблица 13 – Заинтересованные стороны проекта

<b>Заинтересованные стороны проекта</b>	<b>Ожидание заинтересованных сторон</b>
Производители материалов и имплантатов	Установление связи между внутренней структуры и механическими свойствами
Потребители имплантатов	Повышение долговечности и биосовместимости имплантатов
Томский политехнический университет	Возможности научной коллаборации с лабораторией новых медицинских материалов ТГУ
Обучающийся	Повышение навыков в анализе томографических данных

### 2.2.3 Организационная структура проекта

Для выполнения проекта создается рабочая группа, состав которой, а также роли и функции участников представлены в таблице 14.



Таблица 14 – Рабочая группа проекта

№ п/п	ФИО, место работы, должность	Роль в проекте	Функции	Трудозатраты, раб. дни
1	Батрагин Андрей Викторович, студент гр. 4БМ1И	обучающийся (О)	проведение исследований, подготовка ВКР	45
2	Глазков Анатолий Васильевич, вед. инж. РКНЛ РКД ИШНКБ	исполнитель (И)	проведение томографии, подготовка образцов	4
3	Клименов Василий Александрович, профессор ОМ ИШНПТ	руководитель (Р)	планирование работы, проверка работы	2
			Итого:	51

Помимо обучающегося и научного руководителя в проекте принимал участие сотрудник Российско-китайской научной лаборатории радиационного контроля и досмотра, на базе которой установлен томограф, использованный для получения данных.

#### 2.2.4 Ограничения и допущения проекта

Ограничения проекта – это все факторы, которые могут послужить ограничением степени свободы участников команды проекта, а также «границы проекта» – параметры проекта или его продукта, которые не будут реализованы в рамках данного проекта. Эта информация представлена в таблице 15.

Таблица 15 – Ограничения проекта

Фактор	Ограничения
Бюджет проекта	206 000 рублей
Источник финансирования	НИ ТПУ
Сроки проекта	01.02.2023 – 10.09.2023
Фактическая дата утверждения плана управления проектом	10.02.2023
Плановая дата завершения проекта	18.09.2023

Ввиду занятости обучающегося в период подготовки и сдачи ВКР, сроки представления работы были сдвинуты.

## 2.3 Планирование управления научно-техническим проектом

Планирование управления проектом служит для определения общего содержания работ, уточнения целей и разработки алгоритма действий для достижения установленных целей.

План управления проектом включает следующие элементы:

контрольные события проекта;

план проекта;

бюджет проекта.

### 2.3.1 Контрольные события проекта

При выполнении работы и оформлении ВКР следует ориентироваться на следующие контрольные события, отображенные в таблице 16

Таблица 16 – Контрольные события проекта

№ п/п	Контрольное событие	Дата	Результат
1	Утверждение темы ВКР	09.02.2023	Приказ об утверждении темы
2	Производственная практика	30.01– 11.03.2023	Отчет по производственной практике
3	Преддипломная практика	13.03– 20.05.2023	Отчет по преддипломной практике
4	Готовая записка ВКР	11.09.2023	Отчет о проверке ВКР
5	Защита ВКР	18.09.2023	Решение ГАК

### 2.3.2 Календарный план проекта

Контрольные события проходят параллельно этапам выполнения исследовательской работы, календарный план которой представлен в таблице 17.

Таблица 17 – Календарный план проекта

<b>№ п/п</b>	<b>Название этапа</b>	<b>Длительность, дней</b>	<b>Дата начала работ</b>	<b>Дата окончания работ</b>	<b>Состав участников</b>
1	Выбор направления исследования	5	30.01	03.02	обучающийся руководитель
2	Составление технического задания	2	03.02	04.02	обучающийся руководитель
3	Изучение литературы	14	05.02	23.02	обучающийся
4	Подготовка образцов к исследованию	10	24.02	05.03	обучающийся исполнитель
5	Проведение томографии образцов	14	06.03	19.03	исполнитель обучающийся
6	Первый доклад на научном семинаре	1	01.04	01.04	обучающийся руководитель
7	Анализ результатов	20	02.04	21.04	обучающийся
8	Второй доклад на семинаре	1	10.05	10.05	обучающийся руководитель
9	Написание пояснительной записки	20	10.08	29.08	обучающийся
10	Проверка ВКР	5	10.09	14.09	обучающийся руководитель

Для большей наглядности календарный план часто иллюстрируют диаграммой Ганта. Данные из календарного плана (таблица 17) представлены также в таблице 18.

Таблица 18 – Календарный план-график проекта

№	Вид работ	Исполни-тели	Т, кал. дн	Продолжительность работ															
				фев			март			апр			май			авг		сент	
				1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2		
1	Выбор направления исследования	О, Р	5	■	●														
2	Составление технического задания	О, Р	2	■	●														
3	Изучение литературы	О	14		■	■	■												
4	Подготовка образцов к исследованию	О, И	10				■	■	■										
5	Проведение томографии образцов	О, И	14					■	■	■									
6	Первый доклад на научном семинаре	О, Р	1									■	●						
7	Анализ результатов	О	20									■	■	■					
8	Второй доклад на семинаре	О, Р	1											■	●				
9	Написание пояснительной записки	О	20													■	■	■	
10	Проверка ВКР	О, Р	5															■	●

■ - обучающийся    ● - руководитель    □ - исполнитель

## 2.4 Бюджет научно-технического исследования

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

- материальные затраты научно-исследовательской работы (НИР);
- затраты на специальное оборудование для экспериментальных работ;
- основная заработная плата исполнителей темы;

- дополнительная заработная плата исполнителей темы;
- отчисления на социальные нужды;
- накладные расходы.

#### 2.4.1 Расчет материальных затрат научно-технического исследования

Данная статья включает затраты на покупку материалов, используемых при выполнении проекта. Результаты расчета представлены в таблице 19.

Таблица 19 – Материальные затраты

Наименование	Цена за ед., руб.	Количество	Сумма, руб.
Порошок ПНК ОТ-4	5000	1 кг	5000
Порошок ПТОМ-2	4500	1 кг	4500
Бумага офисная	400	1 уп.	400
<b>Итого:</b>			<b>9900</b>

Прочие затраты, такие как электроэнергия, содержание помещений и оборудования, не относятся к материальным затратам. Их учет приведен ниже.

#### 2.4.2 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, которая рассчитывается по формуле:

$$H_A = \frac{1}{n},$$

где  $n$  – срок планируемой эксплуатации в годах.

- амортизация оборудования, рассчитываемая по формуле:

$$A = \frac{H_A S}{12} m,$$

где  $S$  – итоговая сумма, тыс. руб.,  $m$  – время использования в проекте в месяцах.

Расчет амортизационных затрат приведен в таблице 20.

Таблица 20 – Расчет амортизационных затрат

Наименование	Стоимость оборудования, тыс. руб.	Срок эксплуатации, лет	$H_A$ , %	Время использования в проекте	Отчисления, руб.
Рентгеновский томограф	20 000	25	0,04	0,1	6667
Реактор для СВС синтеза	500	5	0,2	0,1	833
Электроэрозионный станок	4 000	10	0,1	0,1	3333
Персональный компьютер	100	5	0,2	4	6666
<b>Итого:</b>					<b>17 499</b>

### 2.4.3 Основная заработная плата исполнителей проекта

В данном разделе рассчитывается заработная плата обучающегося (на должности инженера), научного руководителя и исполнителя (на должности младшего научного сотрудника).

Основная заработная плата одного работника рассчитывается по следующей формуле:

$$Z_{осн} = Z_{дн} \cdot T_P,$$

где  $Z_{дн}$  – среднедневная заработная плата, руб.,  $T_P$  – продолжительность работ, выполняемых работниками в проекте.

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{дн} = \frac{Z_M M}{F_D},$$

где  $Z_M$  – месячный должностной оклад работника, руб.,  $F_D$  – действительный годовой фонд рабочего времени (в 2023 году составил 247 рабочих дней),  $M$  –

количество месяцев работы без отпуска в течение года. Причем  $M = 11,2$  месяца при пятидневной рабочей неделе и отпуске 24 рабочих дней,  $M = 10,4$  месяца при шестидневной рабочей неделе и отпуске 48 рабочих дней.

Месячный должностной оклад работника определяется по формуле

$$Z_M = Z_B(k_{np} + k_D) k_P,$$

где  $Z_B$  – базовый оклад, руб.,  $k_{np}$  – премиальный коэффициент (равен 1),  $k_D$  – коэффициент доплат и надбавок (равен 0,2),  $k_P$  – районный коэффициент (равен 1,3).

Для задействованных в проекте участников расчет основной заработной платы приведен в таблице 21.

Таблица 21 – Расчет основной заработной платы исполнителей

Исполнители	З <sub>Б</sub> , руб.	$k_{np}$	$k_D$	$k_P$	З <sub>М</sub> , руб.	З <sub>дн</sub> , руб.	Т <sub>р</sub> , раб. дн.	З <sub>осн</sub> , руб.
Обучающийся (инженер)	20000	1	0,2	1,3	31200	1414,74	45	63663,30
Исполнитель (млад. науч. сотр.)	25000	1	0,2	1,3	39000	1768,42	4	7073,68
Руководитель (профессор)	50000	1	0,2	1,3	78000	3536,84	2	7073,68
Итого:								77810,66

#### 2.4.4 Дополнительная заработная плата исполнителей проекта

В данной статье учитывают суммы выплат в дополнение к основной заработной плате, куда входят отчисления на отпуск, доплаты за выслугу лет и прочее. Установим коэффициент дополнительной заработной платы равным 15%. Тогда размер дополнительных заработных плат участников будет рассчитываться по формуле

$$Z_{доп} = k_{доп} \cdot Z_{осн}.$$

В таблице 22 приведены расчеты дополнительной заработной платы и общий размер выплат на оплату труда исполнителей проекта.

Таблица 22 – Заработная плата исполнителей проекта

<b>Заработная плата</b>	<b>Обучающийся</b>	<b>Руководитель</b>	<b>Исполнитель</b>
Основная	63663,30	7073,68	7073,68
Дополнительная	9549,50	1061,05	1061,05
Итоговая	73212,80	8134,73	8134,73
<b>Итого:</b>			89482,26

#### **2.4.5 Отчисления на социальные нужды**

Величина отчислений на социальные нужды в 2023 году составляет 30% от суммы полной (итоговой) заработной платы, согласно п. 3 статьи 425 НК РФ [47]. Для рассчитанной заработной платы (таблица 22) сумма отчислений составит 26844,68 руб.

#### **2.4.6 Накладные расходы**

Поскольку работа выполняется с использованием материальных активов университета, необходимо включить в бюджет накладные расходы, покрывающие затраты на содержание помещений, обслуживание оборудования и инфраструктуры.

Размер накладных расходов установим на уровне 80% от суммы основной заработной платы участников проекта (таблица 22). Таким образом, размер накладных расходов составит 62248,53 руб.

#### **2.4.7 Формирование бюджета проекта**

Рассчитав все статьи расходования средства для выполнения научно-технической работы, формируется бюджет исследования. Результат калькуляции бюджета приведен в таблице 23.

Таблица 23 – Калькуляция плановой себестоимости НИР по теме «Применение рентгеновской томографии для количественного анализа пористых металлических композитов»



Наименование статьи	Сумма, руб.	Примечание
Материальные затраты	9900	пункт 1.4.1
Амортизация специального оборудования	17499	пункт 1.4.2
Основная заработная плата исполнителей	77810,66	пункт 1.4.3
Дополнительная заработная плата исполнителей	11671,60	пункт 1.4.4
Отчисления на социальные нужды	26844,68	пункт 1.4.5
Накладные расходы	62248,53	пункт 1.4.6
Бюджет затрат	<b>205974,47</b>	

Калькуляция показывает фактические затраты, проведенные всеми непосредственными и опосредованными участниками проекта.

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

Определить эффективность научно-технического исследования можно путем расчета интегрального показателя эффективности. Он состоит из двух компонент: интегрального финансового показателя и интегрального показателя ресурсоэффективности.

Интегральный финансовый показатель рассчитывается путем соотношений бюджетов нескольких вариантов исполнения проекта по формуле

$$I_F^P = \frac{F_{pi}}{F_{max}}, \quad (8)$$

где  $F_{pi}$  – стоимость  $i$ -го варианта исполнения,  $F_{max}$  – наибольшая стоимость исполнения проекта, включая аналоги.

Для сравнения бюджетов рассмотрим два альтернативных варианта выполнения проекта с применением стороннего оборудования. Вариант №1 заключается в проведении томографии на установке V|tome|X S 240 производства General Electric, который находится в Приволжском федеральном университете в г. Казань. Вариант №2 состоит в проведении томографии на синхротроне КИСИ-Курчатов в Москве. Данное оборудование обеспечит качество томографии на

сопоставимом уровне, при этом бюджет возрастает за счет командировки обучающегося и оплаты услуг по получению данных.

Ориентировочно бюджет варианта №1 составит 350 000 руб., а варианта №2 – 380 000 руб. Тогда интегральные финансовые показатели составят:

- для текущего проекта:  $206000/380000 = 0,54$ ;
- для варианта №1:  $350000/380000 = 0,92$ ;
- для варианта №2: 1,00.

Для расчета интегрального показателя ресурсоэффективности необходимо сравнить варианты исполнения проекта по некоторым ключевым критериям. Каждый критерий имеет свой весовой коэффициент  $a_i$  и определенный балл  $b_i$  в диапазоне от 1 до 5. Расчет проводится по формуле

$$I_m = \sum a_i \cdot b_i.$$

Критерии и исходные данные для расчета данного показателя приведены в таблице 24.

Таблица 24 – Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

Объекты исследования Критерии	Весовой коэффициент параметра	Текущий проект	Вариант №1	Вариант №2
Доступность оборудования	0,2	5	2	2
Энергосбережение	0,15	5	5	2
Материалоемкость	0,15	5	5	4
Качество получаемых данных	0,25	4	4	5
Наличие специализированного ПО	0,25	5	5	4
Интегральный показатель ресурсоэффективности	1	4,75	4,15	3,55

На основании двух вычисленных интегральных показателей рассчитывается общий интегральный показатель каждого  $i$ -го варианта исполнения проекта,

который равен отношению показателя ресурсоэффективности к показателю финансовой эффективности:

$$I_{\text{эф}i} = \frac{I_i^P}{I_i^{\Phi}}$$

Затем, соотнеся полученные общие интегральные показатели, получим сравнительную эффективность всех вариантов. Результат сравнения приведен в таблице 25.

Таблица 25 – Сравнительная эффективность вариантов реализации проекта

Показатель	Текущий проект	Вариант №1	Вариант №2
Интегральный финансовый	0,54	0,92	1
Интегральный ресурсоэффективности	4,75	4,15	3,55
Общий интегральный	8,80	4,51	3,55
Сравнительная эффективность	1	0,51	0,40

Сравнительная эффективность наглядно показывает различия между вариантами выполнения проекта различными способами и учитывает интегрально ресурсоемкость вариантов.

## 2.6 Выводы по разделу

В разделе «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» были проработаны ключевые экономические аспекты разрабатываемого научно-технического решения. Были определены основные конкурирующие технические решения, доступные на рынке и проанализировано место на рынке предлагаемого решения. Были представлены цели проекта, описаны потенциальные потребители результата выполнения проекта.

Был произведен расчет бюджета проекта, вовлеченность участников и календарный план выполнения разных этапов проекта.

С целью оценки ресурсоэффективности проекта было проведено сравнение предложенного решения с другими возможными путями реализациями проекта.