

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования «Казанский (Приволжский) федеральный университет»

Институт математики и механики им. Н. И. Лобачевского

На правах рукописи



ХАРИН НИКИТА ВЯЧЕСЛАВОВИЧ

**МЕТОДИКА ОЦЕНКИ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОРИСТЫХ  
МАТЕРИАЛОВ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ МЕТОДОМ ПОСЛОЙНОГО  
НАПЛАВЛЕНИЯ**

Специальность 1.1.8. «Механика деформируемого твердого тела»

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата физико–математических наук

Научный руководитель – к. ф.-м.н., доцент, Саченков О. А.

Казань – 2026

## Оглавление

Список сокращений .....	4
Введение.....	5
ГЛАВА 1 Актуальные проблемы изучения механических свойств пористых материалов и конструкций .....	18
1.1 Пористые материалы .....	18
1.2 Аналитические расчеты пористых конструкций .....	20
1.3 Численные расчеты пористых конструкций .....	22
1.4 Натурные эксперименты пористых конструкций.....	24
1.5 Устройства для проведения испытаний внутри компьютерного томографа.....	28
Выводы по главе 1.....	31
ГЛАВА 2 Моделирование и оценка механических свойств fdm-образцов с межслойной пористостью .....	33
2.1 Проблематика и постановка задачи. ....	33
2.2 Пороговые характеристики межслойной пористости.....	42
Выводы по главе 2.....	55
ГЛАВА 3 Система нагружения образцов для компьютерной томографии ....	57
3.1 Автоматизированная система нагружения образцов.....	57
3.2 Проектировочный расчет оснастки .....	58
3.2.1. Определение минимального диаметра шпилек .....	59
3.2.2. Определение характеристик винта.....	60
3.3 Комплектующие для оснастки .....	65
3.4 Программное управление оснастки.....	67
3.5 Описание оснастки .....	73
3.5.1 Композитные проставки.....	73

3.5.2 Процесс сборки оснастки .....	76
3.6 Верификация оснастки.....	79
3.7. Протокол испытаний .....	84
Выводы по главе 3.....	85
ГЛАВА 4 Методы обработки экспериментальных данных.....	86
4.1 Обработка цифрового двойника.....	86
4.1.1 Фильтрация .....	89
4.1.2 Сегментация.....	91
4.1.3 Реперные точки .....	93
3.2 Физико-механические характеристики.....	97
4.3 Метрологическое обеспечение .....	100
Выводы по главе 4.....	104
ГЛАВА 5 Пример использования: физический объем.....	104
5.1 Общее описание .....	104
5.2. Описание исследуемых образцов.....	106
5.3 Универсальная испытательная машина.....	107
5.4 Испытания при помощи компьютерного томографа .....	108
5.5. Численно-аналитическая оценка .....	108
5.7 Результаты .....	111
5.7.1. Испытания с использованием РКТ.....	111
5.7.2. Численные испытания .....	120
5.7.3 Натурные испытания .....	120
5.8 Обсуждение полученных результатов .....	124
Выводы по главе 5.....	126
Заключение .....	127
Список литературы .....	128

## **СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ**

РКТ – рентгеновский компьютерный томограф

МРТ - магнитно-резонансная томография

МКЭ – метод конечных элементов

НДС – напряженно-деформированное состояние

FDM – (fused deposition modeling) послойное наплавление

SLS – (selective laser sintering) селективное лазерное спекание

SLA – (stereolithography apparatus) стереолитография

SLM – selective laser melting, селективное лазерное плавление

LPBF – (laser beam powder bed fusion) выборочная лазерная плавка

## ВВЕДЕНИЕ

### Актуальность темы исследования

Развитие современных технологий, позволило создавать разные виды материалов, тем самым повышая качество получаемых изделий и конструкций. Применение неоднородных материалов позволило достичь уменьшения веса, при этом не уменьшая прочностные свойства изделий. Несмотря на многочисленные аналитические и экспериментальные методы, задача о создании новых методов определения механических свойств всё еще актуальна. Актуальность достигается за счет создания все более прогрессивных материалов, таких как композитные метаматериалы [120,134,141], композиты на основе ионных жидкостей и полимеров [37,149], биоактивное стекло [80,115,104], материалы растительного производства [76,92], высокотемпературные [87,49,100] и сверхтвердые материалы [57,60,131,145], материалы, создаваемые при помощи аддитивных технологий [53,133,36]. Классические методы анализа механических свойств материалов, как и традиционные натурные эксперименты, сталкиваются с ограничениями — они фокусируются на анализе поверхности таких структур. Это означает, что они предполагают идеальные условия производства конструкций. Идеальные условия подразумевают отсутствие дефектов, равномерность структуры и точное соблюдение технологических параметров производства таких изделий, что в реальности почти невозможно. [150,111,156]. Во время производства возможны расслоения, не проклей между слоями, образование микротрещин и другие подобные дефекты, которые могут проявить себя только во время эксплуатации [40,59,119,114]. В свою очередь сложность для классических методов вызывают и материалы с негомогенной геометрией. В основном ограничением служит неоднородность внутренней структуры каждого отдельного образца, что приводит к значительному разбросу получаемых механических характеристик. К примеру, авторами исследования [137] было

подробно рассказано о поведении титана при аддитивном производстве. Во время обработки и производства титановых образцов из Ti6Al4V, при помощи технологии селективного лазерного спекания (SLM), было показано, что возникают рубцы, отложения микрочастиц, которые влияют на физико-механические свойства итогового изделия. Авторами другого исследования было показано, что при производстве, при помощи выборочной лазерной плавки (LPBF), главным критерием качества является отсутствие так называемых брызг, которые возникают при контакте лазера с порошком. Такие брызги приводят к неоднородности структуры внутри изготавливаемого образца, что достаточно пагубно сказывается на физико-механических свойствах итоговой сборки или изделия [86]. У пластиков наблюдается другая проблема – во время производства при помощи послойного наплавления (FDM), у итоговых образцов появляются межслойные пустоты, которые могут влиять на механические свойства. Для решения этой проблемы используется термическая обработка, что в свою очередь может решить данную проблему, но возникает неоднородность плотности материала от нагрева и охлаждения слоев [42]. Такой метод позволяет избавиться от ряда недостатков, но может исказить итоговую внутреннюю структуру изделия.

Для определения внутренних дефектов и оценки качества изготавливаемых образцов применяются методы неразрушающего контроля. Одним из популярных методов такого контроля является рентгеновская компьютерная томография (РКТ). Большую популярность имеет за счет высокой детализации и возможности создания цифрового двойника. Однако такой метод не позволяет изучать изменение внутренней структуры под нагрузкой, без дополнительного использования специализированных устройств. Комплексный подход анализа изменения физико-механических структур важен для материалов со сложной внутренней структурой, используемых в различных отраслях промышленности.

Настоящая работа посвящена разработке математической модели для оценки эффективных механических свойств изделий, изготовленных методом послойного наплавления, а также её верификации на основе численных расчётов и натурных *in situ* экспериментов.

В настоящее время изменения физико-механических свойств совместно с нагружением образца, исследуются отечественными и зарубежными учеными, такими как: Николаев А.Л., Сукиязов А.Г., Зеленцов В.Б., Садырин Е.В., Айзикович С.М., Hufenbach W., Bohm R., Gude M., Berthel M., Horning A., Qian W., Wu S., Lei L., Hu Q., Liu C.

По данным на декабрь 2024 года, в международной базе ScienceDirect по ключевому запросу «X-ray tomography» обнаружено 15 126 публикаций за текущий год, 12 983 — за 2023 год и 13 005 — за 2022 год. Для сопоставимого термина «Рентгеновский компьютерный томограф» в российской научной библиотеке Elibrary зафиксировано существенно меньшее количество работ: 45 (2024), 64 (2023) и 58 (2022). Указанная динамика демонстрирует устойчивый рост применения рентгеновской компьютерной томографии в зарубежных исследованиях при сохранении умеренного интереса в отечественной науке.

Аналогичный тренд наблюдается при анализе запроса «Device for determining mechanical parameters»: глобальный массив ScienceDirect содержит 53 609 (2024), 40 385 (2023) и 35 579 (2022) статей, тогда как в Elibrary по формулировке «Устройство для определения механических свойств» представлено лишь 49 (2024), 52 (2023) и 77 (2022) публикаций. Полученные данные подтверждают возрастающую актуальность технологий анализа структурных характеристик материалов, что актуализирует необходимость углублённого изучения трансформации их внутренней архитектуры, особенно в контексте применения сетчатых структур и пористых материалов. Выводы подчёркивают значительный дисбаланс в исследовательской активности между международным и российским

научным сообществом, а также растущий спрос на методы неразрушающего контроля и анализа материалов.

### **Цель и задачи диссертационной работы:**

Целью данного исследования является разработка математической модели и методики оценки эффективных физико-механических свойств пористых материалов с учетом особенностей их внутренней структуры, изготовленных методом послойного наплавления.

Достижение цели планируется осуществить путем решения следующих задач:

— построение феноменологической математической модели для определения эффективных механических свойств материалов с учетом межслойных дефектов, возникающих при изготовлении методом послойного наплавления;

— оценка адекватности математической модели в рамках численных экспериментов с использованием методов механики сплошных сред и конечных элементов;

— разработка алгоритма проведения натурных испытаний и обработки данных рентгеновской компьютерной томографии для анализа структурных изменений под нагрузкой для верификации предлагаемой математической модели;

— проведение верификации математической модели на основе *in situ* испытаний с комбинированным использованием рентгеновской томографии.

### **Материалы и методы исследования**

Для решения поставленных задач в диссертационной работе используются основные подходы механики сплошных сред, численных методов и экспериментов. Математическая формулировка основана на известных методах и теории упругости в статической постановке. Для проектирования оснастки использовались законы механики деформируемого

твердого тела и принципы конструирования испытательных машин. Для обработки данных, полученных рентгеновским компьютерным томографом, использовались математические методы обработки сигналов и компьютерного зрения. При обработке результатов использовались методы математической статистики. Экспериментальное исследование *in situ* проводились на компьютерном рентгеновском томографе Phoenix V|tome|X S240. Верификация разработанной оснастки проводилась в экспериментах на универсальной испытательной машине УТС 110М-100. Изготовление образцов для проведения экспериментов осуществлялось при помощи аддитивных технологий (3Д принтеры Anycubic photon mono X и QUDI plus II).

### **Научная новизна**

—Разработана математическая модель для оценки эффективных упругих свойств материалов с учетом межслойных дефектов, возникающих при аддитивном производстве методом послойного наплавления;

—на основе разработанной математической модели предложена инженерная формула для количественной оценки влияния межслойных дефектов, возникающих при аддитивном производстве методом послойного наплавления, на эффективные механические свойства и показана ее область применимости;

—предложен метод анализа неоднородных материалов под сжимающими нагрузками с использованием рентгеновской компьютерной томографии и разработана экспериментальная оснастка и методика проведения *in situ* испытаний;

—в экспериментах *in situ* подтверждена разработанная математическая модель и полученная на ее основе инженерная формула для количественной оценки влияния межслойных дефектов, возникающих при аддитивном производстве методом послойного наплавления, на эффективные механические свойства в обозначенной области применимости.

### **Достоверность и обоснованность**

Достоверность результатов исследования обеспечивается использованием сертифицированного оборудования, корректной постановкой задач, строгим соблюдением экспериментальных процедур, а также верификацией полученных данных с помощью численного моделирования и данных экспериментов. Построенная математическая модель основана на применении строгих математических методов. Программное обеспечение для анализа данных, полученных с компьютерного томографа, разработано на основе современных алгоритмов обработки изображений с обеспечением математической строгости, что позволяет получать результаты высокой точности.

### **Теоретическая значимость работы**

Теоретическая значимость работы заключается в построении математической модели для оценки влияния дефектов, возникающих при производстве методом послойного наплавления, на механические свойства изделий, а также в развитии методов анализа материалов с неоднородной внутренней структурой под действием внешнего нагружения, и изучение зависимости механических свойств их внутренней структуры. Разработанные алгоритмы и модели позволяют определять эффективные упругие характеристики пористых материалов, описывать изменения их микроструктуры под действием внешних сил. Полученные зависимости и методики могут быть использованы при проектировании материалов с заданными свойствами для применения в различных областях техники и медицины.

### **Практическая значимость работы**

Практическая значимость работы состоит в определении области применимости полученной инженерной формулы, позволяющей скорректировать значения механических свойств изделий из учета его последующего изготовления методом послойного наплавления, а также в

разработке методики, позволяющей проводить комплексную оценку физико-механических характеристик пористых материалов под нагрузкой с использованием компьютерной томографии. Данная методика может быть использована для контроля качества и стандартизации пористых материалов, применяемых в машиностроении, строительстве и медицине, в том числе для диагностики и анализа прочностных характеристик медицинских имплантатов. Разработанная оснастка и программный комплекс могут быть внедрены в производственные процессы, что позволит улучшить контроль качества изделий и повысить их долговечность и безопасность.

### **Положения, выносимые на защиту**

— Математическая модель для оценки эффективных механических свойств пористых материалов, изготовленных методом послойного наплавления, с учетом влияния межслойных дефектов на упругие характеристики; (пункт 4)

— инженерная формула для количественной оценки эффективные механические свойства при наличии межслойных дефектов, возникающих при аддитивном производстве методом послойного наплавления, и область применимости формулы; (пункт 4)

— новый экспериментальный метод исследования деформирования материалов, изготовленных методом послойного наплавления, включающий в себя оснастку и протокол проведения *in situ* испытаний, совмещённых со сканированием рентгеновским компьютерным томографом; (пункт 13)

— результаты анализа численных и натурных *in situ* экспериментов, показывающие влияние межслойной и макропористости на изменение эффективных механических свойств и внутреннюю структуру материалов, изготовленных методом послойного наплавления, под действием сжимающей нагрузки; (пункт 1, 5)

## **Апробация работы**

Основные положения и полученные в диссертационной работе результаты докладывались и обсуждались на следующих научных конференциях и симпозиумах:

— XXXI Международный симпозиум «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» имени А.Г. Горшкова, Кременки МАИ, 2025;

— Международный научный симпозиум Неравновесные процессы в сплошных средах, Пермь, 2024;

— 14-я Всероссийская научная конференция с международным участием «Механика композиционных материалов и конструкций, сложных и гетерогенных сред» им. И.Ф. Образцова и Ю.Г. Яновского, Москва, Российская Академия Наук, 2024;

— XVI Всероссийская конференция по испытаниям и исследованиям свойств материалов "ТестМат" по тематике: "Неразрушающий контроль и техническая диагностика в авиационной промышленности", Москва, НИЦ "Курчатовский институт", 2024;

— XXX Международный симпозиум «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» имени А.Г. Горшкова, Кременки МАИ, 2024;

— Тридцатая международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика», НИУ «МЭИ», Москва, 2024

— International conference advanced mechanics: structure, materials, tribology, Самарканд, Самаркандский государственный университет, 2024;

— Международный научный симпозиум Неравновесные процессы в сплошных средах, Казань КФУ, 2024;

— XXIX международный симпозиум “Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред” имени А.Г. Горшкова, Кременки МАИ, 2023;

— Международный форум Передовые цифровые и производственные технологии, Санкт-Петербург, Петербургский Политех, 2023.

### **Публикации**

Основные результаты диссертационного исследования опубликованы в 20 научных работах. Из них 2 статьи вышли в журналах, включенных в Перечень ВАК Минобрнауки РФ, относящиеся к направлению 1.1.8 «Механика деформируемого твердого тела» [21,17], 1 статья в журнале, включенная в Перечень ВАК Минобрнауки РФ [20]. Также 2 публикации опубликованы в изданиях, индексируемых в базах данных Web of Science, Scopus [30,75]. Помимо этого, получен 1 патент на изобретение [9], зарегистрировано 4 программы для ЭВМ [15,14,6,13] и опубликовано 10 тезисов докладов [16,2,22,4,18,19,5,23,1,3].

### **Личный вклад автора**

Соискателем лично разработаны постановки задач, построены все математические модели в рамках решения вышеуказанных научных задач, проведена численная реализация и осуществлены экспериментальные натурные испытания с последующим анализом результатов, что выражается в следующем:

— проведен обзор литературы, обзор имеющихся решений оснасток для проведения испытаний совместно с компьютерным томографом;

— разработана феноменологическая математическая модель для оценки влияния межслойных дефектов, возникающих при производстве методом послойного наплавления, на эффективные механические свойства изделий;

— получена инженерная формула, позволяющая скорректировать значения эффективных механических свойств изделий из учета наличия дефектов, связанных с изготовлением методом послойного наплавления, и определена область применимости формулы;

— разработана численная модель и проведены численные расчеты спроектированных образцов;

— создана оснастка и протокол экспериментальных *in situ* исследований, совмещенных со сканированием рентгеновским компьютерным томографом;

— изготовлены образцы для проведения натурных экспериментов

— проведены экспериментальные исследования на разработанной *in situ* оснастке;

— на основе результатов были получены зависимости изменения механических параметров

— проанализированы результаты численных и экспериментальных исследований, проведена верификация разработанной математической модели и инженерной формулы.

В работе [17] лично разработано и верифицировано автоматизированное устройство для одноосного сжатия образцов, позволяющего проводить механические испытания с одновременной съёмкой внутри рентгеновского компьютерного томографа. Показано, что устройство обеспечивает воспроизводимое нагружение, малые погрешности измерения силы и корректную сегментацию томографических данных, что делает возможным анализ внутренней структуры материалов под нагрузкой. В работе [21] автору принадлежит разработанный экспериментальный метод исследования деформирования материалов с применением созданной оснастки для компьютерного томографа. В результате работы показал изменение объемной деформации и относительное изменение объема в зависимости от сжимающей нагрузки, полученные результаты согласуются с

основными выводами диссертационной работы. Акифьев К.Н. занимался подготовкой изготовленных образцов для проведения испытаний внутри компьютерного томографа; Стаценко Е.О. проводил рентгеновскую компьютерную томографию образцов; Семенова Е.В. занималась подготовкой текста работы; Саченков О.А. принимал участие в обсуждении результатов, полученных на основе проведения натурных испытаний; Большаков П.В. занимался курированием процесса производства и проведения эксперимента. В работе [20] автору принадлежит экспериментальное исследование с помощью разработанной оснастки для компьютерного томографа. В результате получил аппроксимирующие кривые, описывающие влияние направления эллиптичности на эффективный модуль упругости, предел пропорциональности, а также верхний и нижний пределы текучести; Акифьев К.Н. занимался первичной обработкой томограмм; Спиридонова К.О. проводила подготовку образцов для проведения эксперимента; Хамзин Д.Э. проводил эксперименты на универсальной испытательной машине; Стаценко Е.О. проводил рентгеновскую компьютерную томографию образцов; Большаков П.В. принимал участие в обсуждении результатов, полученных на основе проведения натурных испытаний и испытаний с компьютерным томографом. В работе [30] автору принадлежит проведение численных экспериментов, анализ полученных результатов, показавший зависимость эффективных модулей упругости от эллиптичности и размера пор; Большаков П.В. занимался проведением численных расчетов; Акифьев К.Н. подготовкой моделей для проведения численных расчетов; Кучумов А.Г. выполнял математическую постановку задач; Стаценко Е.О. подготовкой моделей для проведения численных расчетов; Зильбершмидт В.В. принимал участие в обсуждении результатов. В работе [75] автору принадлежит проведение экспериментальных исследований с использованием разработанной оснастки для компьютерного томографа. В результате получил зависимость эффективного модуля упругости от ориентации макропоры и размеров

межслойных пор, а также применил методику учета межслойных пор для коррекции эффективных модулей упругости в численных расчетах. Результаты показали, что применение такой методики учета межслойных пор обеспечивает соответствие между численными и экспериментальными данными, особенно в зоне пластической деформации, где вклад межслойных пор существенно снижается ввиду их закрытия.; Акифьев К.Н. занимался обработкой полученных томограмм и получением физико-механических характеристик; Спиридонова К.О. осуществляла подготовку разработанной оснастки и её настройки для проведения эксперимента; Стаценко Е.О. проводил рентгеновскую компьютерную томографию образцов; Семенова Е.В. занималась обработкой томограмм для получения тензора структуры и дальнейшего анализа пористости; Большаков П.В. занимался проектированием образцов и принимал участие в обсуждении результатов; Саченков О.А. принимал участие в обсуждении результатов. В работе [9] автору принадлежит патентный поиск аналогов, написание текста патента, разработка принципиальной схемы работы оснастки, разработка методики обработки получаемых томограмм, полученных с использованием разработанной оснастки. В работах [15,14] автор выполнял тестирование программных алгоритмов, обсуждение архитектурных особенности программного кода. В работах [6,13] автор занимался реализацией численных алгоритмов по определению свойств по данным компьютерной томографии.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертационная работа общим объемом 149 страниц состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы, включающего 157 источников. Текст иллюстрируется 50 рисунками и 10 таблицами.

### **Содержание работы**

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, ее научная новизна, практическая значимость, сформулированы цели и

задачи исследования, приведены основные положения, выносимые на защиту.

**Первая глава** диссертации имеет обзорный характер и описывает современное состояние и виды исследования неоднородных структур, а также способы изготовления и анализа физико-механических характеристик.

Во **второй главе** диссертационной работы выделены характерные возникающие дефекты при производстве и построена феноменологическая математическая модель, проведены численные эксперименты по моделированию влияния межслойной пористости.

В **третьей главе** диссертационной работы представляется запатентованная оснастка для проведения экспериментов *in situ* внутри компьютерного томографа, за счет приложения внешней сжимающей нагрузки.

В **четвертой главе** представлены используемые методы анализа структуры компьютерной модели, полученной при помощи рентгеновского компьютерного томографа.

В **пятой главе** представлены результаты использования оснастки для одного базисного элемента, представляющий из себя куб с порой, произведенного при помощи аддитивных технологий, а именно послойного наплавления пластика.

В **заключении** сформулированы основные результаты диссертации.

## ГЛАВА 1

# АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИЗУЧЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОРИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ И КОНСТРУКЦИЙ

Глава имеет обзорный характер и посвящена комплексному исследованию пористых материалов. В ней рассматриваются способы формирования пористых структур как традиционными методами, так и современными аддитивными технологиями. Описаны аналитические и численные методы расчёта физико-механических свойств. Рассматриваются экспериментальные подходы исследования пористых и неоднородных образцов. Подчёркивается необходимость комплексного подхода для исследования пористых материалов.

### 1.1 Пористые материалы

Пористый материал – это твердое тело, содержащее в своем объеме пространство в виде полостей, каналов или пор, заполненных другим веществом, как правило жидкостью или газом. Существует множество способов создания таких материалов, в том числе вспениванием [132,155,82], спеканием электрическим током [55], шликерным способом [106], формированием волокон двух типов [153,46], методом выжигания одного из компонентов [35] и аддитивными технологиями [52,105,66,96]. Полученные таким образом материалы можно классифицировать в зависимости от размера пор и разделить на следующие категории: макропористый, межслойных пористый и микропористый. Сами же поры можно классифицировать на закрытые и открытые. Открытые поры представляют собой каналы, выходящие на грань материала, то есть контактируют с внешней средой, в свою очередь закрытые поры не имеют контакта с ней. Закрытые поры в основном образуются во время производства, такие образования классифицируются, как дефект конструкции [103,72]. Наличие пористости, особенно закрытой, невозможно отследить во время производства, в основном их можно обнаружить, только после изготовления. Наличие такого рода дефекта может негативно сказаться на прочностных

свойствах всей конструкции и выявляются при помощи ультразвукового сканирования [122,95,69], микроскопии [129] или компьютерной томографии [116,140,39].

Современные методы производства, а именно аддитивные технологии, позволяют в короткие сроки производить пористые структуры и изделия со сложной геометрией. Популярными методами производства аддитивной печати выступает стереолитография (SLA) [128,117], FDM [77,1], SLS [81,79], селективное лазерное плавление (SLM) [29,147]. Недостатком такого производства служит появление двухфазного материала. Изделия, изготовленные с помощью FDM печати, имеют межслойную закрытую пористость. Это связано с появлением пустот между слоями при изготовлении [98,45]. В случаях SLM и SLS печати двухфазность достигается за счет нерасплавленного материала, который остается внутри изделия [139,138]. При производстве изделий при помощи SLA печати возникают поры, связанные с не полимеризованной фотополимерной смолой. Во избежание остатков незастывшей фотополимерной смолы в закрытых порах, в модель структуры добавляют открытый канал, для извлечения смолы [154]. Такой же эффект, при производстве, имеют и композиционные материалы. Для избежания появления пористости между армирующим наполнителем и связующим веществом используют вакуумное формование. Такой метод позволяет уменьшить количество пор между фазами, но не избавляет от них полностью. В данном случае армирующий наполнитель воспринимает действующую на изделие нагрузку, а связующие вещество перераспределяет нагрузку внутри изделия, в то время закрытые поры, находящиеся внутри, мешают перераспределять нагрузку внутри материала [90].

Таким образом, основной проблемой, связанной с изготовлением пористых материалов, является образование закрытых пор и межфазных

дефектов в процессе их производства, что негативно влияет на механические и прочностные свойства изделия в целом.

## **1.2 Аналитические расчеты пористых конструкций**

Аналитический метод исследования позволяет определять физико-механические свойства пористых материалов, но для этого необходимо знать геометрические характеристики изучаемого объекта. В случае пористых материалов это означает, что нужно знать распределение пор внутри материала.

Одним из популярных методов анализа неоднородных материалов, таких как пористые или композитные структуры, является использование методов представительных объемов, благодаря которым можно определить эффективные упругие свойства. Этот метод позволяет свести сложную внутреннюю структуру изделия (например, наличие пор, включений или неоднородностей) к модели сплошной среды. В такой модели материал рассматривается как однородный, а его свойства усредняются и пересчитываются с учетом особенностей микроструктуры. В результате модель демонстрирует схожую картину деформации и механического поведения под нагрузкой, что упрощает анализ и расчеты, сохраняя при этом высокую точность описания реального изделия. Так как в этом методе материал рассматривается как однородная среда, то он игнорирует возможные возникающие дефекты на микроуровне. Другими словами, такая модель никак не рассматривает взаимодействие между внутренними порами, трещинами или включениями. Таким образом, данный метод будет менее точным при высокой пористости или большом количестве дефектов. Существует множество методов расчета эффективных упругих свойств таких как: Морри-Танака [28], Максвелла-Гарнетта [93], Фойгта-Ройсса и Хашина-Штрикмана [121].

Для быстрого и удобного расчета механических свойств многофазных материалов широко используется инженерный подход, известный как

правило смесей. Основная идея этого метода заключается в том, что механические характеристики материала напрямую зависят от объемной доли его компонентов. Такой подход удобен своей простотой, но применимость формулы ограничена, и возможна только при равномерном распределении фаз внутри объема. Правило смеси также применяется для анализа расслоения композита [125], термического расслоения внешних покрытий [107], прогнозирования свойств растяжения/сжатия [157].

Одним из ключевых инструментов для анализа влияния включений на механические характеристики материала является тензор Эшелби. Основной идеей данного подхода служит связывание деформаций существующих пор в изделии с деформацией самого изделия, при этом учитывает разницу в упругих свойствах. Такой подход эффективен для описания изделий с простой геометрией пор (сферы, эллипсоиды). Однако, данный подход не учитывает взаимодействие между пор во время деформирования изделия, что в свою очередь даёт ограничение на концентрацию таких включений. Такой подход в основном используется для описания механических свойств композитов [142, 62].

В классической механике пороупругости распространенным методом служит модель Био. Она используется как в статических, так и в динамических задачах [97]. Одной из главных особенностей данной модели является учет связи между твердым скелетом пористого тела и флюидом, заполняющий поры. Такой учет позволяет оценить напряженно-деформированное состояние системы и оценить перераспределение флюида при внешних нагрузках. Данная модель применяется при наличии флюидной фазы материала и температурных эффектов, которые влияют на физико-механические свойства [41]. Также данная модель применяется для решения задач фильтрации и деформации пористых сред, используется для прогнозирования поведения геологических объектов, таких как водоносные горизонты и нефтяные пласты [130,50]. Кроме горных пород и грунтов,

данная модель также применяется и для других материалов таких как: пористые звукопоглощающие материалы [84], бетонные конструкции [78], биологических ткани [56], пеноматериалы [102], композитные материалы [31], стекловолокна и полимерные гели [32].

Аналитические методы исследования, такие как использование эффективных упругих свойств, правило смесей, тензор Эшелби и модель Био, позволяют определять физико-механических свойства пористых и композитных материалов. Эти методы позволяют упростить сложные задачи, что значительно облегчает расчеты и прогнозирование поведения материала под нагрузкой. Однако такие подходы имеют ряд упрощений, которые не всегда могут учесть сложную микроархитектуру реального изделия. В связи с этими упрощениями, для верификации получаемых результатов, существует необходимость в численных и экспериментальных методах. Численные методы позволяют учитывать сложную микроструктуру материала, взаимодействие между включениями и нелинейные эффекты, что делает их более универсальными и точными. Экспериментальные методы, в свою очередь, предоставляют реальные данные о поведении материала под нагрузкой, которые могут быть использованы для калибровки и проверки как аналитических, так и численных моделей.

### **1.3 Численные расчеты пористых конструкций**

В настоящее время численное моделирование пористых материалов и конструкций имеет множество различных методов. Каждый метод имеет ряд своих особенностей. Классическими методами позволяющие анализировать напряженно-деформированное состояние материалов и конструкций с разными граничными условиями является метод конечных элементов (МКЭ) и метод граничных элементов (МГЭ). Такие методы используются для моделирования поведения биологических тканей [94], композитных материалов [47], термогидромеханических задач в насыщенных пористых средах с трещинами [101] и в других сферах [47,146,143]. Эти методы

наиболее эффективно применяются для анализа сложной геометрии, учета нелинейных эффектов, оценки многофакторных систем, например, теплопередача. При анализе пористых материалов и расчета их механических характеристик существует ряд проблем. Точное моделирование таких изделий требует не только мелкой сетки, что увеличивает вычислительные затраты, но и корректной формулировки граничных условий на границе между материалом и порой. Несмотря на данные недостатки, существует ряд исследований, где МКЭ применяется и для описания напряженно-деформированного состояния объектов с межслойной пористостью, при этом показывая достоверный результат, который согласуется с экспериментальными данными [89,123]. Но в основном для решения задач с межслойной пористостью и микропористостью применяется молекулярная динамика [135,108]. Данный метод подходит для моделирования химических реакций, исследования наноматериалов и наноструктур.

В последние годы для исследования материалов со сложной архитектурой или многомасштабным распределением пор стали развиваться дополнительные подходы. Например, метод конечных разностей и метод дискретных элементов. Такие методы позволяют моделировать поведение материалов и конструкций с многослойной структурой и разным характером и видом пор, при этом учитывать взаимодействие пор и флюида внутри материала. В основном такие подходы применяются в двухфазных материалах с поровым течением жидкости [88,74,27].

Численные подходы позволяют эффективно анализировать напряженно-деформированное состояние изделий с различной пористостью. Однако эти методы зависят от точности заданных параметров материала, граничных условий и моделей, описывающих взаимодействие между фазами. Экспериментальные исследования предоставляют данные о реальном поведении материала под нагрузкой, что позволяет проверить адекватность

численных моделей, уточнить их параметры и выявить возможные расхождения.

#### **1.4 Натурные эксперименты пористых конструкций**

Натурные испытания играют главную роль в верификации результатов, полученных при помощи численных и аналитических методов. Другими словами, испытания являются неотъемлемой частью исследования, отвечая на вопрос о применимости тех или иных моделей и методов в реальных условиях, тем самым оценивая точность и применимость выведенных моделей и методов, а также позволяют откорректировать методы для нахождения более точного решения. Стоит отметить, что такие испытания особенно важны для материалов с комплексной, неоднородной структурой, такие как пористые материалы, потому что их физико-механические свойства достаточно сложно описать, так как они зависят от множества факторов.

Главная особенность натурных испытаний – оценка реального объекта исследования. Но в случае с пористыми материалами или конструкциями со сложной внутренней структурой, затруднительно наблюдать за процессом деформирования, так как основные физико-механические изменения происходят в основном внутри изделия.

Современное развитие технологий позволяет оценивать состояния различных материалов и конструкций внутри материала. Эксперименты с применением методов неразрушающего контроля позволяют оценить состояние деталей во время эксплуатации, таким образом можно выявить дефекты на ранних стадиях деформирования. Для обнаружения дефектов композитов, биоразлагаемых материалов или участков трубопровода используется ультразвуковой контроль или акустико-эмиссионный контроль [148,63,85]. Оба метода используют акустические волны для оценки состояния материалов и конструкций. Такой подход позволяет в полевых условиях оценить состояние конструкции, а также контролировать состояние в реальном времени. Ультразвуковой контроль позволяет определить

местоположение и размер дефектов, в то время как акустико-эмиссионный контроль не позволяет точно локализовать место дефекта. Главным недостатком такого исследования служит чувствительность к свойствам материалов, таких как плотность, структура и наличие включений. Использование методов акустико-эмиссионного контроля для материалов с высокой плотностью, сложной структурой или множеством не могут точно определить характер дефекта, за счет сложного распространения акустических волн. Немаловажным фактором служит и проходимость акустической волны. Такие волны могут проникать на определенную глубину, что ограничивает применения метода у материалов с высоким коэффициентом затухания.

Для быстрой оценки состояния используется термографический контроль [83,65]. Дефекты в материалах и конструкциях изменяют тепловое распределение внутри материала, таким образом можно быстро и визуально оценить местоположение дефекта. Такой метод используется как контроль качества при производстве композиционных материалов. Данный метод недостаточно чувствителен для обнаружения мелких дефектов на микроуровне. Вкупе с ограничением глубины проникновения для толстостенных материалов или материалов с низкой теплопроводностью данный метод используется в основном для определения дефектов на поверхности изделия.

Для выявления поверхностных дефектов используется капиллярный контроль [126]. За счет капиллярных сил флуоресцентная жидкость проникает в поверхностные дефекты, тем самым давая возможность их обнаружению. Такой способ позволяет обнаружить дефекты на поверхности, но с другой стороны это длительный процесс, который имеет ограничения на поверхность материала. Данный метод не подходит для объектов со сложной формой, например, изогнутыми поверхностями, так как равномерное нанесение индикаторной жидкости в таком случаи и удаление её излишков –

затруднительно. В многослойных материалах или композитах капиллярный контроль может быть неэффективен за счет скрытых дефектов между слоями материала.

Одним из методов неразрушающего контроля является рентгенографический контроль [109], который позволяет обнаружить внутренние дефекты в материале с высокой точностью, за счет своей разрешающей способности. Рентгеновский контроль требует специального оборудования: излучатель, детектор, защитные экраны. В связи с этим применение в полевых условиях затруднительно. Его использование ограничено преимущественно в лабораторных или производственных условиях. При анализе изделий сложной формы, например, с внутренними полостями, сложно получить удовлетворительное изображение дефектов из-за наложения теней или искажений при съемке. Еще одним недостатком служит тот факт, что дефект может быть образован параллельно направлению рентгеновского луча, например, трещина.

Для преодоления некоторых ограничений традиционного рентгеновского контроля применяется рентгеновский компьютерный томограф (РКТ). Этот метод позволяет создать полный цифровой двойник исследуемого изделия, представляющий собой точную трехмерную компьютерную модель образца. Цифровой двойник учитывает все возможные отклонения и неточности, возникающие в процессе изготовления конструкции. В идеальном случае компьютерная модель, созданная на этапе проектирования, должна полностью соответствовать цифровому двойнику. Однако на практике достичь такого соответствия невозможно из-за технологических погрешностей производства. Благодаря этому оценка напряженно-деформированного состояния (НДС) цифрового двойника может быть более точной по сравнению с компьютерной моделью, так как позволяет учесть имеющиеся дефекты [127, 144]. Как правило, РКТ является стационарной установкой, что ограничивает применение в полевых условиях.

Также применение РКТ имеет ограничение по исследуемым материалам. Некоторые материалы имеют высокую плотность или толщину, что в свою очередь негативно влияет на поглощение рентгеновского излучения, приводящая к снижению качества цифрового двойника или появлению артефактов.

Для анализа состава материалов и выявления дефектов на микроуровне широко используется спектрометрия [48]. Этот метод основан на изучении взаимодействия вещества с электромагнитным излучением, что позволяет определить химический состав, структуру и свойства материала. Спектрометры могут работать в различных диапазонах (например, инфракрасном, ультрафиолетовом, рентгеновском) и применяться для контроля качества, исследования горных пород, анализа композитов и биологических материалов. Спектрометрия позволяет получать точные данные о составе материала, включая наличие примесей, дефектов или неоднородностей. Данный метод имеет чувствительность к исследуемому материалу, например, с высокой отражающей способностью, что ведет за собой искажение спектральных данных. В основном данный метод используется в комбинации с другими методами неразрушающего контроля.

Магнитно-резонансная томография (МРТ) — это метод неразрушающего контроля, который позволяет исследовать внутреннюю структуру материалов и объектов с высокой точностью [67]. МРТ основан на явлении ядерного магнитного резонанса, что делает его особенно полезным для изучения мягких тканей, биологических образцов, композитов, полимеров и других материалов с низкой плотностью. Этот метод широко применяется в медицине для диагностики заболеваний, а также в материаловедении для анализа внутренних дефектов, таких как трещины, пустоты, расслоения и неоднородности. Существенный недостаток такого метода – ограничение по исследуемым материалам. В основном с его помощью исследуют различные не металлические структуры [25].

Методы неразрушающего контроля позволяют оценивать состояние материалов и конструкций без их разрушения. Одним из наиболее точных методов для обнаружения дефектов является РКТ. Данный метод позволяет создавать цифровой двойник исследуемого изделия, что помогает выявить отклонения от проектной модели, а также с его помощью, можно численно оценить НДС.

Несмотря на ограничение по исследуемым материалам, РКТ является точным и информативным методом неразрушающего контроля. В настоящее время разработаны специальные оснастки, для проведения сканирования образцов совместно с механическими испытаниями, что в свою очередь позволяет анализировать образование различных видов дефектов, появляющиеся только при эксплуатации изделия. Такие установки полезны для изучения материалов со сложной структурой, таких как композиты, пористые материалы или биосовместимые полимеры. Данный вид испытаний открывает новые возможности для разработки новых моделей оценки прочности, а также улучшение процессов проектирования и производства.

### **1.5 Устройства для проведения испытаний внутри компьютерного томографа**

С развитием методов неразрушающего контроля наибольшую популярность набирает РКТ [136,34]. Его популярность обусловлена высокой разрешающей способностью вкупе с получением данных о структуре материала во всех исследуемых точках. Использование РКТ позволяет получить цифровой двойник текущего состояния материала или конструкции, но не позволяет оценить его изменение при внешней нагрузке. Для оценки внутренних изменений под действием внешней нагрузки изготавливаются оснастки для проведения испытания совместно со съемкой внутри РКТ. Такие оснастки должны учитывать особенность работы РКТ, а именно его габариты камеры и отсутствие артефактов от силового каркаса во время рентгеновского сканирования. В свою очередь оснастки должны

соответствовать прочностным свойствам, т.е. должны выдерживать необходимые нагрузки и обеспечивать равномерное нагружение без вмешательства в процесс сканирования.

В настоящее время известны технические решения, позволяющие провести натурный эксперимент совместно с РКТ. В опубликованных патентах наблюдается сложность конструкции, что ведет за собой проблемы ремонтпригодности [11,10,64,110]. Немаловажным фактором является отсутствие методики обработки получаемых данных с компьютерной томографии [11,64]. В изобретениях [11,10,64] область съемки закрыта или частично закрыта, что препятствуют исследованию образцов. Открытость рабочей зоны авторской оснастки позволяет не только снимать образцы больших габаритов, но и гарантирует отсутствие артефактов на получаемой компьютерной модели. Технические решения [12,11] предназначены только для исследования внешней поверхности, а не внутренней структуры материала или конструкции. Также немаловажно отметить автоматизированное и равномерное нагружения, с возможностью записи в файл диаграмм, в авторском устройстве, что отсутствует в следующих изобретениях [12,11,10,64,8].

При анализе каждого изобретения, в частности, можно выявить следующее. Так, техническое решение [12] позволяет восстановить геометрические данные о нагруженной поверхности, но не позволяет производить структурный и механический анализ в объеме образца. В отношении изобретения [11] устройство позволяет визуализировать деформированное состояние поверхности материала в области упругих деформаций, но не позволяет производить структурный и механический анализ по всему объему образца. Изобретение [10] позволяет оценивать изменения внутренней структуры образца, при этом изменение структуры оценивается изменением плотности материала в исследуемой зоне или сечении, но не позволяет оценивать механические свойства, что существенно

сужает область применения по назначению по сравнению с авторским техническим решением. Изобретение [64] позволяет оценивать изменения внутренней структуры образца, но явно не позволяет оценивать механические свойства. Указанные недостатки известного изобретения существенно сужают область применения по назначению по сравнению с заявленным техническим решением, т.к. в описательной части известного изобретения не представлена информация о том, что, собственно, подразумевается под внутренней структурой образца – плотность, пористость, поле перемещений, деформаций, тензор структуры или упругих констант, или иные не идентифицированные как таковые параметры. Общность изложения измерения внутренней структуры не позволяет оценить область конкретной применимости известного изобретения в практических исследованиях для конкретного квалифицированного заказчика. Изобретение [8] позволяет оценивать изменение внутренней структуры образцов и конструкций, а также оценить механические свойства. Главным недостатком данного изобретения служит приложение сжимающей нагрузки на образец, который не обеспечивает равномерность приложения, так как передача нагрузки на образец осуществляется за счет поочередного завинчивания гаек. Изобретение [110] позволяет оценивать изменение внутренней структуры образцов и конструкций, а также механические свойства. Главным недостатком данного изобретения служит максимальная прикладываемая сила, которая составляет 1000 Н, что накладывает ряд ограничений на получение механических свойств материалов и конструкций.

На сегодняшний день существуют серийные установки, которые позволяют проводить исследования образцов на сжатие непосредственно внутри РКТ. Среди ведущих компаний, производящих такое оборудование, можно выделить Tescan (Чехия) и KlarBerg (Германия). Данные компании специализируются на создании решений для неразрушающего контроля, включая рентгеновские системы и приборы для испытаний материалов.

Несмотря на это, данные решения имеют ряд ограничений. Малый диапазон нагрузок. У Tescan до 2кН, у KlarBerg до 1 кН. Для многих материалов, особенно в исследованиях механики деформируемых твердых тел, такие нагрузки недостаточны. Для металлов, композитов или жестких полимеров требуются нагрузки на порядок выше для моделирования реальных условий эксплуатации [44,73]. Малый размер зоны исследования образцов. Максимальный допустимый размер исследования составляет до 30мм. Это ограничивает возможности анализа крупных объектов или компонентов, которые необходимы для изучения материалов с градиентными свойствами [68,151], биомеханических систем [73] или многослойных структур.

Современные установки для проведения механических испытаний совместно с РКТ представляют собой инструмент для исследования внутренней структуры и механических свойств материалов в реальном времени. Однако они имеют ряд существенных недостатков, которые ограничивают их применение. Максимальные нагрузки существующих установок ограничиваются в 2кН, что недостаточно для исследования многих материалов. Размер исследуемых образцов ограничен 30мм, что делает невозможным анализ крупных объектов. Большинство существующих патентов не предусматривает автоматизированный процесс нагружения, что затрудняет проведение воспроизводимых экспериментов. Для преодоления данных ограничений требуется разработка нового технического решения, которое позволит расширить возможности неразрушающего контроля, а также обеспечит точное и детальное исследования материалов и конструкций в условиях, приближенных к реальным. Такой подход особенно важен для разработки новых видов материалов, а также при оптимизации конструкции.

### **Выводы по главе 1**

В главе 1 показано, что современные технологии производства развиваются, тем самым улучшая качество конечной продукции, снижая их вес и повышая прочностные характеристики. Однако задача нахождения

механических свойств остается актуальной, особенно для новых типов материалов. Традиционные методы определения механических свойств имеют ряд ограничений при оценке сложных структур и гетерогенных материалов, таких как материалов, созданных при помощи аддитивных технологий. Дефекты, возникающие во время производства, такие как трещины, расслоения и возникновение пористости – негативно сказываются на физико-механические свойства, и проявляются только на этапе эксплуатации. Для выявления таких дефектов требуются современные подходы контроля качества. Наиболее информативным в этом случае является метод РКТ, совмещенный с проведением испытаний, так как в этом случае можно определить взаимосвязь между структурными и механическими свойствами. Но, существующие решения в этой не обладают достаточной исследовательской полнотой.

## **ГЛАВА 2**

# **МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОЦЕНКА МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ FDM-ОБРАЗЦОВ С МЕЖСЛОЙНОЙ ПОРИСТОСТЬЮ**

Данная глава посвящена построению математической модели оценки влияния межслойной пористости, возникающей при аддитивном производстве (в частности, при FDM печати) на эффективные механические свойства. В главе произведен анализ технологии FDM печати, выделены характерные возникающие дефекты при производстве и построена феноменологическая математическая модель. Показано, что наиболее характерная форма межслойной пористости – это тонкие и вытянутые поры. На основе подхода гомогенизации показано, что учет влияния таких пор может быть разложен аддитивно, определены предельные значения безразмерных параметров формы пор, позволяющие использовать формулу смеси для оценки их вклада в эффективные механические свойства. Отдельно проведены численные эксперименты для различных распределений межслойной пористости с и без наличия крупной центральной поры. Результаты численных экспериментов подтвердили полученные аналитические оценки.

### **2.1 Проблематика и постановка задачи.**

В процессе изготовления деталей методом аддитивных технологий, в частности FDM-печати, неизбежно формируется межслойная пористость. Характерной особенностью этого вида пористости является её вытянутая, близкая к игловидной (или эллипсоидальной), форма. Подобная геометрия пор обусловлена недостаточной адгезией между наплавленными слоями, вследствие чего в межслойных областях возникают протяжённые пустоты (Рисунок 2.1).

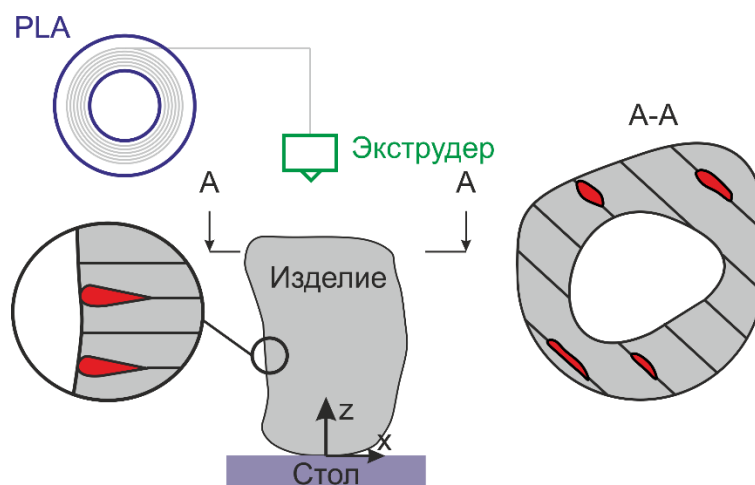


Рисунок 2.1 Схематичное изображение принципа FDM-печати. Красным цветом выделена межслойная пористость.

Наличие таких дефектов, представляющих собой внутренние полости, приводит к существенному снижению механических характеристик напечатанного образца. При этом следует учитывать, что укладка материала в процессе FDM-печати осуществляется послойно с чередованием направлений (как правило, под углом  $\pm 45^\circ$ ), что дополнительно влияет на характер и ориентацию возникающей пористости (Рисунок 2.2). Таким образом, ключевой характеристикой, определяющей механическое поведение FDM-изделий, является распределение пор, имеющих преимущественно вытянутую (эллипсоидальную) форму.

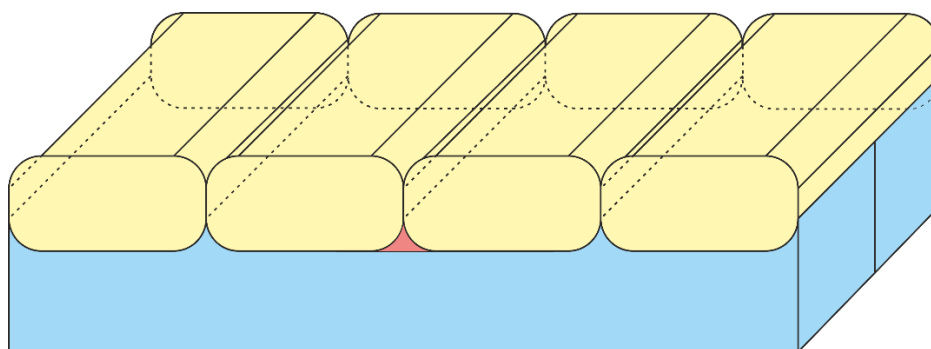


Рисунок 2.2 Схематичное изображение слоёв при FDM-печати. Красным цветом выделена область межслойной пористости.

Наряду с протяжёнными игловидными порами, возникающими из-за недостаточной межслойной адгезии, в структуре материала могут

встречаться и локальные точечные (изотропные) дефекты. Такие дефекты формируются, например, вследствие неравномерного вытекания расплава или локальных нарушений траектории экструдера. Несмотря на меньшие размеры, их статистическое распределение по объёму образца также способно существенно влиять на его механические свойства. В связи с этим в дальнейшем моделировании рассматриваются оба типа дефектов — протяжённые и локальные, что позволяет более полно воспроизвести реальную структуру FDM-изделий.

Особое внимание при моделировании уделяется максимальным геометрическим параметрам дефектов, которые лимитируются технологическими характеристиками FDM-процесса. Поскольку межслойная пористость формируется в областях, определяемых толщиной и шириной наплавленного филамента, максимальный поперечный размер дефекта не может превышать диаметр сопла экструдера (Рисунок 2.3). В данной работе используется сопло экструдера диаметром 0.2 мм, что накладывает верхнее ограничение на размер микроскопического масштаба  $u$  и размер представительного объёма, а также на максимальный диаметр рассматриваемых игловидных пор.

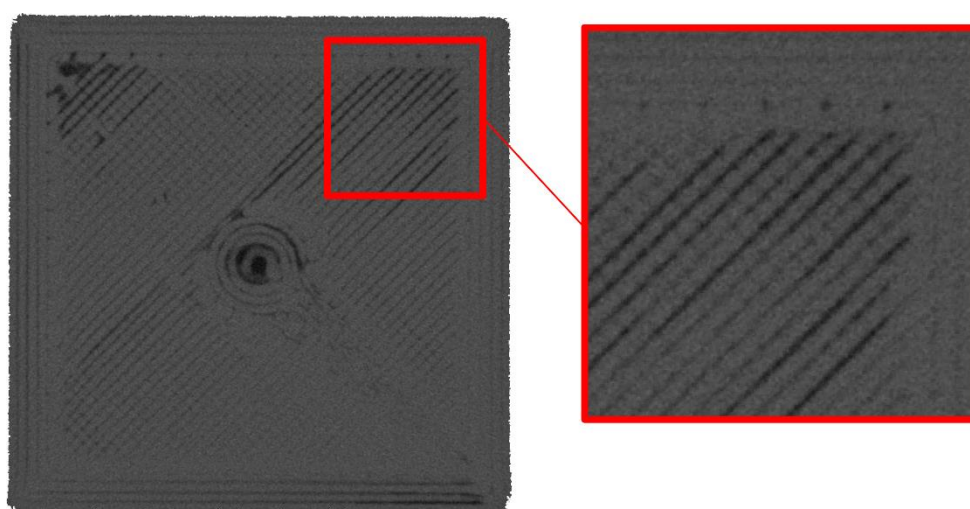


Рисунок 2.3 Пример протяженных дефектов

Таким образом, ключевой характеристикой, определяющей механическое поведение FDM-изделий, является анизотропное распределение пор, имеющих преимущественно вытянутую (эллипсоидальную) форму, при этом максимальный поперечный размер этих дефектов ограничен диаметром сопла экструдера, составляющим 0.2 мм.

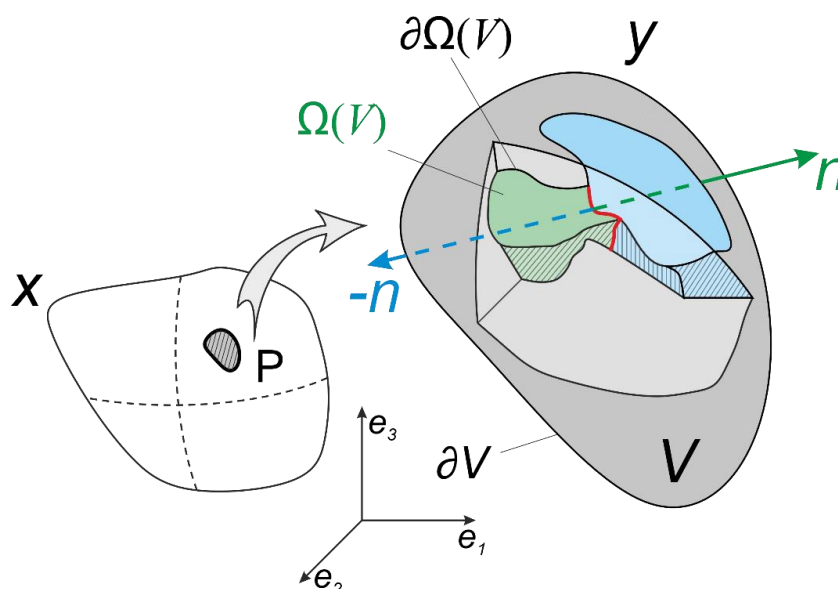


Рисунок 2.4 Представительный объем

Для описания описанной гетерогенной среды будем использовать два различных масштаба. Макроскопический, обозначаемый как  $x$ , и микроскопический, обозначаемый как  $y$  (Рисунок 2.4). Микроскопический масштаб  $y$  соразмерен с размером представительного объёма  $V$  (Рисунок 2.4). Тогда математическая задача осреднения будет выглядеть следующим образом:

$$\begin{aligned}\sigma^* &= \langle \sigma \rangle = \frac{1}{V} \int_V \sigma(x, y) dy, \\ \varepsilon^* &= \langle \varepsilon \rangle = \frac{1}{V} \int_V \varepsilon(x, y) dy,\end{aligned}\tag{2.1}$$

где  $V$  – объем представительного объема, а интегрирование подразумевается по микроскопическому масштабу.

Данное выражение определяет оператор усреднения  $\langle \cdot \rangle$ , который позволяет получить макроскопическую величину путём интегрирования микроскопической величины по объёму  $V$  представительного объема, что является ключевым шагом в установлении макроскопических связей в рамках принципа гомогенности Хилла-Манделя.

В рамках двух масштабного подхода все микроскопические поля, характеризующие флуктуации, предполагаются  $y$ -периодическими. Перемещения  $\mathbf{u}(x,y)$  и напряжения  $\boldsymbol{\sigma}(x,y)$  раскладываются в асимптотические ряды. Для линейной теории упругости вектор перемещений  $\mathbf{u}$  на двух масштабах раскладывается как:

$$\vec{u}(x, y) = \vec{u}^*(x) + \vec{u}'(y), \quad (2.2)$$

где  $\vec{u}^*(x)$  — вектор макроскопического перемещения, а  $\vec{u}'(y)$  — вектор флуктуационного перемещения, которое является  $y$ -периодическим и имеет нулевое среднее на представительном объёме:  $\langle \vec{u}' \rangle_V = 0$ .

Таким образом локальная деформация представляет собой сумму тензора макроскопической деформации  $\boldsymbol{\varepsilon}^*(\vec{u}^*)$  и тензора флуктуационной деформации  $\boldsymbol{\varepsilon}'(\vec{u}')$ :

$$\boldsymbol{\varepsilon}(u) = \boldsymbol{\varepsilon}^*(\vec{u}^*) + \boldsymbol{\varepsilon}'(\vec{u}'), \quad (2.3)$$

Макроскопическую и флуктуационную деформацию определяется следующим образом:

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\varepsilon}^* &= \frac{1}{2} (\nabla_x \vec{u}^* + (\nabla_x \vec{u}^*)^T), \\ \boldsymbol{\varepsilon}' &= \frac{1}{2} (\nabla_y \vec{u}' + (\nabla_y \vec{u}')^T). \end{aligned} \quad (2.4)$$

Задача о поиске флуктуационных смещений  $\vec{u}'$  решается на уровне представительных объемов. В предположении отсутствия объемных сил и в силу локального  $y$ -периодического характера флуктуаций, задача равновесия для локальных флуктуаций сводится к следующему виду:

$$\begin{cases} \boldsymbol{\sigma}(\mathbf{y}) = \mathbf{C}(\mathbf{y}) : \boldsymbol{\varepsilon}(\mathbf{y}) = \mathbf{C}(\mathbf{y}) : [\boldsymbol{\varepsilon}^* + \boldsymbol{\varepsilon}'(\vec{\mathbf{u}}'(\mathbf{y}))] \\ \operatorname{div} \boldsymbol{\sigma} = 0 \\ \text{граничные условия} \end{cases} \quad (2.5)$$

В случае заданных  $\boldsymbol{\sigma}^*$  и  $\boldsymbol{\varepsilon}^*$ , задача о поиске флуктуационных смещений сводится к следующему виду:

$$\begin{cases} \operatorname{div}(\mathbf{C}(\mathbf{y}) : \boldsymbol{\varepsilon}^*) = -\operatorname{div}(\mathbf{C}(\mathbf{y}) : \boldsymbol{\varepsilon}(\vec{\mathbf{u}}'(\mathbf{y}))) \\ \text{граничные условия} \end{cases} \quad (2.6)$$

Данная постановка соответствует классической задаче периодической гомогенизации для кусочно-постоянной среды. Как показал Сюке [124], решение задачи для флуктуационного поля обладает важным свойством линейности относительно наложенных макродеформаций. Это означает, что локальные флуктуации  $\boldsymbol{\varepsilon}(\vec{\mathbf{u}}^*)$  являются линейной функцией от усреднённой макроскопической деформации  $\boldsymbol{\varepsilon}^*$ . В силу этого средняя деформация может быть разложена на шесть элементарных тензоров макродеформации, каждый из которых соответствует базисному симметричному тензору второго ранга.

Поскольку данная задача (2.6) является линейной, её решение может быть разложено, используя принцип суперпозиции, как линейная комбинация шести независимых компонент тензора деформации:

$$\begin{aligned} \vec{\mathbf{u}}'(\mathbf{y}) = & \vec{\mathbf{u}}^{11}(\mathbf{y})\boldsymbol{\varepsilon}_{11}^* + \vec{\mathbf{u}}^{22}(\mathbf{y})\boldsymbol{\varepsilon}_{22}^* + \vec{\mathbf{u}}^{33}(\mathbf{y})\boldsymbol{\varepsilon}_{33}^* + 2\vec{\mathbf{u}}^{12}(\mathbf{y})\boldsymbol{\varepsilon}_{12}^* \\ & + 2\vec{\mathbf{u}}^{13}(\mathbf{y})\boldsymbol{\varepsilon}_{13}^* + 2\vec{\mathbf{u}}^{23}(\mathbf{y})\boldsymbol{\varepsilon}_{23}^* = \sum_{k=1}^3 \sum_{l=1}^3 \vec{\mathbf{u}}^{kl}(\mathbf{y})\boldsymbol{\varepsilon}_{kl}^*, \end{aligned} \quad (2.7)$$

где  $\vec{\mathbf{u}}^{kl}$  – это характеристические перемещения, полученные путем решение задачи (2.6) при заданных макроскопических деформаций, при этом:

$$\boldsymbol{\varepsilon}_{kl} = \frac{1}{2}(\vec{\mathbf{e}}_k \otimes \vec{\mathbf{e}}_l + \vec{\mathbf{e}}_l \otimes \vec{\mathbf{e}}_k), \quad (2.8)$$

где  $\mathbf{e}_i$  – единичные ортогональные базисные вектора.

Таким образом, для осевой деформации ( $k=l$ ), например, для  $k=l=1$ , тензор деформаций будет:

$$\varepsilon_{11} = \frac{1}{2}(\vec{e}_1 \otimes \vec{e}_1 + \vec{e}_1 \otimes \vec{e}_1) = \vec{e}_1 \otimes \vec{e}_1 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad (2.9)$$

что соответствует макроскопическому растяжению вдоль первой координатной оси.

В случае, когда индексы не совпадают ( $k \neq l$ ), к примеру для  $k = 1, l = 2$ , тензор деформации примет вид:

$$\varepsilon_{12} = \frac{1}{2}(\vec{e}_1 \otimes \vec{e}_2 + \vec{e}_2 \otimes \vec{e}_1) = \begin{pmatrix} 0 & 1/2 & 0 \\ 1/2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}. \quad (2.10)$$

Тогда, полагая что  $\varepsilon^{ij} = \varepsilon(\vec{u}^{ij}(y))$ , и подставляя в (2.7), получим следующее:

$$\begin{aligned} \varepsilon'(\vec{u}') &= \varepsilon^{11}\varepsilon^*_{11} + \varepsilon^{22}\varepsilon^*_{22} + \varepsilon^{33}\varepsilon^*_{33} + 2\varepsilon^{12}\varepsilon^*_{12} + 2\varepsilon^{13}\varepsilon^*_{13} \\ &+ 2\varepsilon^{23}\varepsilon^*_{23} = \sum_{k=1}^3 \sum_{l=1}^3 \varepsilon(\vec{u}^{kl}(y)) \varepsilon^*_{kl}, \end{aligned} \quad (2.11)$$

тогда уравнение (2.11) можем представить в виде:

$$\varepsilon'(\vec{u}') = \varepsilon(\vec{u}^{kl}(y)) : \varepsilon^*, \quad (2.12)$$

здесь тензор  $\varepsilon(\vec{u}^{kl}(y))$  стоит понимать как тензор четвертого ранга  $\varepsilon_{ijkl}$ , где первая пара индексов отвечает за компоненты тензора деформаций, а вторая пара индексов определяет тип граничных условий согласно (2.6) и (2.8).

Подставляя (2.12) в выражение (2.3), получаем:

$$\varepsilon(u) = \varepsilon^* + \varepsilon(\vec{u}^{kl}(y)) : \varepsilon^* = \left( I + \varepsilon(\vec{u}^{kl}(y)) \right) : \varepsilon^*, \quad (2.13)$$

где  $I$  – единичный тензор четвертого ранга.

Перепишем (2.13) следующим образом:

$$\begin{aligned} \varepsilon(u) &= \mathbf{D} : \varepsilon^*, \\ D_{ijkl} &= \left( I_{ijkl} + \varepsilon_{ij}(\vec{u}^{kl}(y)) \right), \end{aligned} \quad (2.14)$$

$$I_{ijkl} = \frac{1}{2}(\delta_{ik}\delta_{jl} + \delta_{il}\delta_{jk}).$$

Тогда средние напряжения можно представить следующим образом:

$$\boldsymbol{\sigma}^* = \langle \boldsymbol{\sigma} \rangle = \langle \mathbf{C} : \boldsymbol{\varepsilon}(\vec{u}) \rangle = \langle \mathbf{C} : \mathbf{D} \rangle : \boldsymbol{\varepsilon}^* = \mathbf{C}^{hom} : \boldsymbol{\varepsilon}^*. \quad (2.15)$$

А значит, тензор упругих констант для представительного объема можно представить как:

$$\mathbf{C}^{hom} = \langle \mathbf{C} : \mathbf{D} \rangle. \quad (2.16)$$

Аналогичным образом, тензор податливости  $\mathbf{S}$  может быть выведен через усреднение, основанное на поле характеристических напряжений, которое решается в задаче с наложением макроскопического напряжения:

$$\boldsymbol{\varepsilon}^* = \langle \boldsymbol{\varepsilon} \rangle = \langle \mathbf{S} : \mathbf{A} \rangle : \boldsymbol{\sigma}^* = \mathbf{S}^{hom} : \boldsymbol{\sigma}^*, \quad (2.17)$$

и получим выражение для тензор податливости представительного объема:

$$\mathbf{S}^{hom} = \langle \mathbf{S} : \mathbf{A} \rangle. \quad (2.18)$$

Из классического курса механики сплошной среды известно, что  $\mathbf{C}^{hom}$  и  $\mathbf{S}^{hom}$  являются обратными тензорами друг к другу в пространстве  $\mathbb{R}^6$ . Однако, для неоднородных сред в условиях предлагаемой сплошной модели усреднение вложений это утверждение в общем смысле не выполняется. Мандель и Хилл [91, 61] показали, что для кусочно-постоянных сред будет верна следующая оценка:

$$\mathbf{C}^{hom} : \mathbf{S}^{hom} = \mathbf{I} + O((d/l)^3), \quad (2.19)$$

где  $d$  – наибольший линейный диаметр дефекта, а  $l$  – характерный линейный размер представительного объема  $V$ .

Таким образом, для практического использования и корректного определения механических характеристик необходимо оценить погрешность, связанную с выбором размера представительного объема. Эффективные свойства будут сходиться к истинным, если характерный размер представительного элемента значительно превышает характерный размер неоднородности.

Рассмотрим представительный элемент, который обладает неким вложением – порой, которую в последующем будем называть макропора. Учитывая, что элемент будет изготовлен методом FDM, то в нем дополнительно возникнут поры (в последующем будем их называть микропоры), связанные с особенностью технологии изготовления. При отсутствии микро- и макропористости напряжения и деформации выражаются следующим образом:

$$\boldsymbol{\sigma}^0 = \mathbf{C} : \boldsymbol{\varepsilon}^0, \quad (2.20)$$

где  $\boldsymbol{\sigma}^0$  и  $\boldsymbol{\varepsilon}^0$  – тензор напряжений и деформаций образца без дефектов и проектировочных пор.

Из-за наличия пор поле деформаций неоднородно и справедливо следующее выражение:

$$\boldsymbol{\varepsilon}^0 = \langle \boldsymbol{\varepsilon} \rangle = \frac{1}{V} \int_V \boldsymbol{\varepsilon} dv = \frac{1}{V} \int_{\partial V} \frac{1}{2} (\vec{n} \otimes \vec{u} + \vec{u} \otimes \vec{n}) ds. \quad (2.21)$$

Воспользуемся аддитивным разложением средних напряжений:

$$\boldsymbol{\sigma}^* = \langle \boldsymbol{\sigma} \rangle = \boldsymbol{\sigma}^0 + \boldsymbol{\sigma}^P, \quad (2.22)$$

где  $\boldsymbol{\sigma}^P$  – это тензор напряжений, возникающий от наличия пор.

Применяя принцип взаимности для расчета дополнительной деформации, вызванной пористостью, получим условие на границе с порой (Рисунок 2.3):

$$\vec{t} = \begin{cases} \vec{n} \cdot \delta \boldsymbol{\sigma}^0 & \text{на } \delta V \\ -\vec{n} \cdot \delta \boldsymbol{\sigma}^0 & \text{на } \delta \Omega \end{cases} \quad (2.23)$$

И линейное перемещение:

$$\vec{u}^0 = \vec{x} \cdot \boldsymbol{\varepsilon}^0. \quad (2.24)$$

Тогда среднее напряжение может быть представлено как:

$$\boldsymbol{\sigma}^* = \frac{1}{V} \int_{\partial V} \vec{t} \otimes \vec{x} ds = \boldsymbol{\sigma}^0 - \mathbf{C} : \frac{1}{V} \int_{\partial \Omega} \frac{1}{2} (\vec{n} \otimes \vec{u} + \vec{u} \otimes \vec{n}) ds. \quad (2.25)$$

А значит, можно получить выражение для напряжений, возникающих от наличия пор:

$$\boldsymbol{\sigma}^P = -\mathbf{C}:\boldsymbol{\varepsilon}^P. \quad (2.26)$$

Подставляя (2.20) и (2.10) в (2.17), получим:

$$\mathbf{C}^{hom}:\boldsymbol{\varepsilon}^0 = \boldsymbol{\sigma}^0 + \boldsymbol{\sigma}^P = \mathbf{C}:\boldsymbol{\varepsilon}^0 - \mathbf{C}:\boldsymbol{\varepsilon}^P, \quad (2.27)$$

Таким образом, в случае линейного поведения вложений представительного объема, эффективная деформация тоже линейна. В рассматриваемом случае, когда присутствуют поры разного масштаба, предлагается аддитивно разложить деформации, связанные с наличием различных пор:

$$\boldsymbol{\varepsilon}^P = \boldsymbol{\varepsilon}^M + \boldsymbol{\varepsilon}^{IT}, \quad (2.28)$$

где  $\boldsymbol{\varepsilon}^M$  – тензор деформаций от макропоры,  $\boldsymbol{\varepsilon}^{IT}$  – тензор деформации от микропористости.

Тогда, используя закон Гука получим:

$$\boldsymbol{\sigma}^P = -\mathbf{C}:\boldsymbol{\varepsilon}^P = -\mathbf{C}:(\boldsymbol{\varepsilon}^M + \boldsymbol{\varepsilon}^{IT}) = -\mathbf{C}:\boldsymbol{\varepsilon}^M - \mathbf{C}:\boldsymbol{\varepsilon}^{IT}. \quad (2.29)$$

А выражение, связывающее деформации вложений примут вид:

$$\mathbf{C}^{hom}:\boldsymbol{\varepsilon}^0 = \mathbf{C}:\boldsymbol{\varepsilon}^0 - \mathbf{C}:\boldsymbol{\varepsilon}^M - \mathbf{C}:\boldsymbol{\varepsilon}^{IT} \quad (2.30)$$

Таким образом, в рамках линейной теории упругости вклад проектировочной поры и межслойных дефектов аддитивен. Это означает, что механические свойства материала можно рассматривать как результат суперпозиции двух независимых механизмов ослабления: макропоры и межслойных пустот.

## 2.2 Пороговые характеристики межслойной пористости

На первом этапе выполнена оценка влияния одиночной игловидной поры на механические свойства кубического образца (Рисунок 2.5). В целях упрощения моделирования геометрия поры была описана в безразмерной форме с использованием двух параметров:  $\lambda$  – параметр эллиптичности,

определяемый как отношение меньшей полуоси  $b$  к большей полуоси  $a$  эллипсоида, и  $\beta$  – относительный размер поры, представляющий собой отношение большей полуоси  $a$  к размеру грани куба  $2h$ . В ходе численных расчетов параметры  $\lambda$  и  $\beta$  варьировались, после чего определялись эффективные механические характеристики полученного кубического элемента.

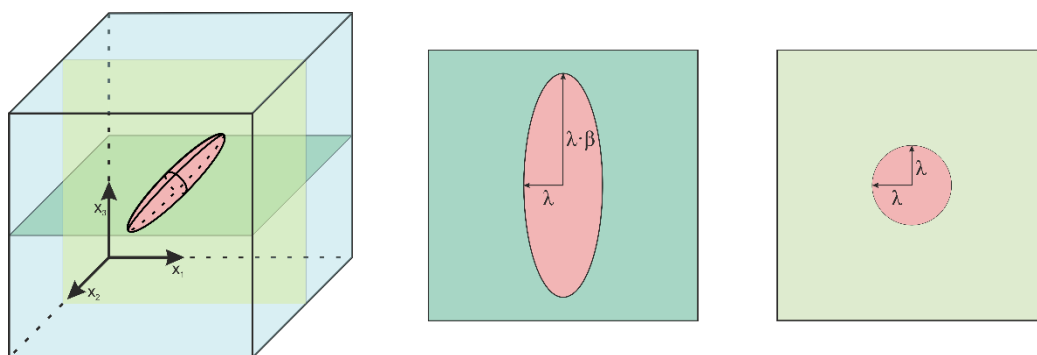


Рисунок 2.5. Одиночный межслойный дефект.

Моделирование и вычисления проводились с использованием специализированного программного обеспечения [14, 6], реализующего метод конечных элементов. Механическое поведение системы описывалось в рамках линейной задачи упругости:

$$\begin{cases} \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} = 0 \\ \boldsymbol{\varepsilon}(\vec{u}) = \frac{1}{2}(\nabla \vec{u} + \nabla \vec{u}^T). \\ \boldsymbol{\sigma}(x) = \mathbf{C}(x) : \boldsymbol{\varepsilon}(\vec{u}(x)) \end{cases} \quad (2.31)$$

Методология основана на кинематическом нагружении представительного объема, что соответствует наложению шести ортонормированных деформаций  $\boldsymbol{\varepsilon}^*$  на границу кубического объема  $\partial V$ . В численной модели материал принят изотропным и характеризуется следующими механическими константами: модуль упругости  $E$  равный 100 ГПа и коэффициент Пуассона  $\nu$  равный 0.3.

Для определения тензора эффективных упругих свойств  $\mathbf{C}^{hom}$  представительного объема было проведено шесть независимых численных экспериментов в рамках линейной задачи упругости, чего достаточно для

полной декомпозиции тензора  $\mathbf{C}^{hom}$ . Реализация схем нагружения приведены на рисунке 2.6.

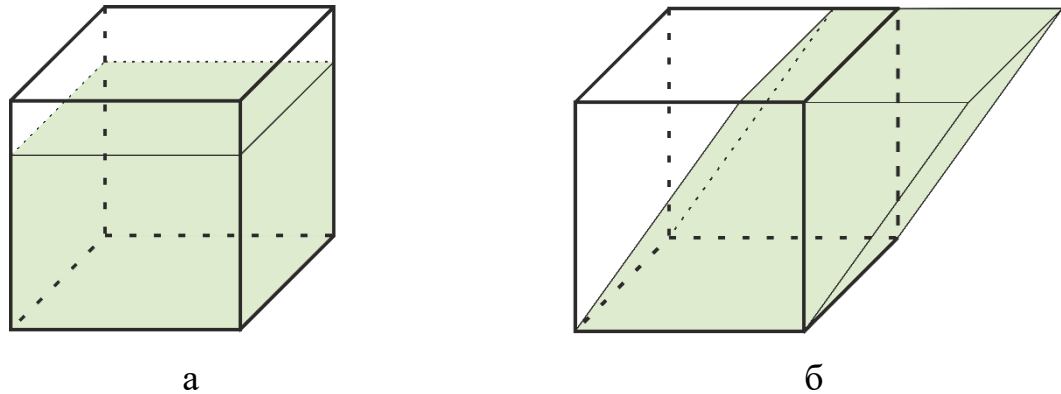


Рисунок 2.6 Схема нагружения в численных экспериментах, а – одноосное сжатие, б – чистый сдвиг.

Для данной задачи, решаемая при помощи (2.31) со следующими граничными условиями для сжатия (2.32.а) и сдвига (2.32.б):

$$\begin{cases} u_i(x_i = 0) = 0 \\ u_i(x_i = h) = \frac{1}{h} \end{cases} \quad i, j = \overline{1,3}, \quad (2.32.a)$$

$$\begin{cases} u_i(x_i = 0) = 0 \\ u_i(x_i = h) = \frac{1}{2h}, \quad i \neq j, \quad i, j = \overline{1,3}. \\ u_j(x_i = h) = \frac{1}{2h} \end{cases} \quad (2.32.б)$$

По результатам численных расчетов эффективные компоненты тензора жесткости  $\mathbf{C}$  определяются через усреднение локального напряжения по представительным объемам из выражения:

$$\mathbf{C}^{hom} = \boldsymbol{\sigma}^* : (\boldsymbol{\varepsilon}^*)^{-1}. \quad (2.33)$$

По полученным результатам расчета была построена поверхность, которая отображает зависимость между эллиптичностью  $\lambda$ , размером поры  $\beta$  и эффективным модулем упругости. (Рисунок 2.7):

$$E_{ii} = E_{ii}(\lambda, \beta) \quad (2.34)$$

Анализ поверхности (Рисунок 2.7) показывает наличие области, где снижение жесткости материала является практически линейным относительно безразмерных параметров поры. Такая линейность соответствует физическому приближению малой концентрации пор, при котором эффекты взаимодействия между дефектами пренебрежимо малы. Обнаружение такой линейной зависимости позволяет использовать простые аддитивные модели.

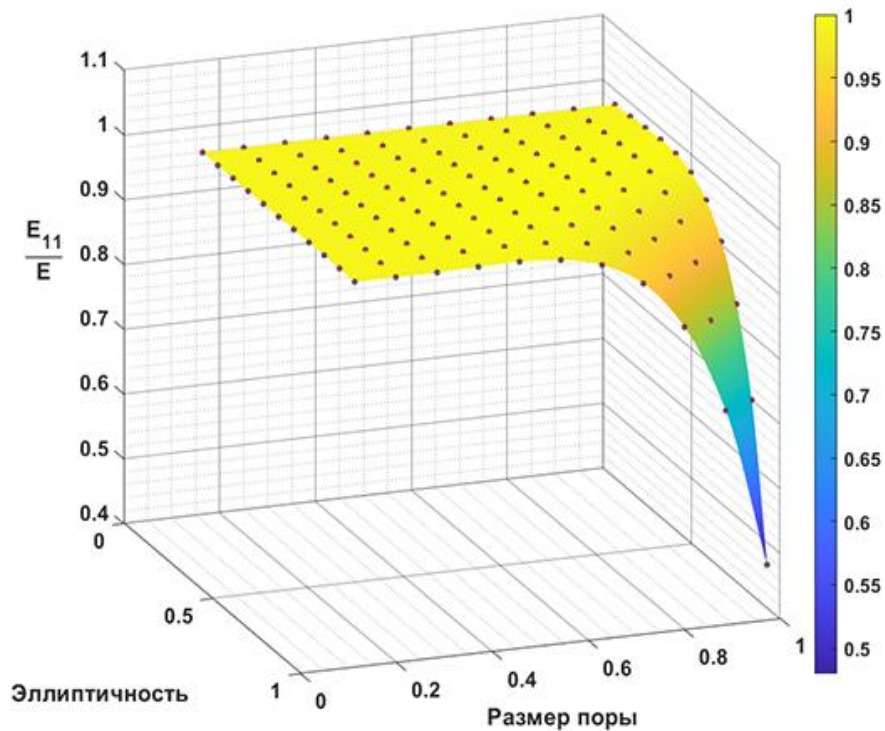


Рисунок 2.7 поверхность изменяя модуля упругости от безразмерных параметров.

Для количественного определения границы применимости линейной модели и установления пороговых значений  $\lambda$  и  $\beta$ , при которых нелинейные эффекты взаимодействия становятся существенными. Для этого в первую очередь формулируется задача определения плоскости наилучшим образом описывает часть поверхности:

$$\min_{A_1, A_2, A_3} \int_0^{\lambda^*} \int_0^{\beta^*} (E_{ii}(\lambda, \beta) - A_1\beta - A_2\lambda - A_3)^2 d\lambda d\beta \quad (2.35)$$

В выражении (2.30) дополнительными неизвестными выступают верхние пределы интегрирования, то есть пороговые значения  $\lambda^*$  и  $\beta^*$ . Для определения их значения использовался критерий, основанный на оценке коэффициента детерминации  $R^2$ . Величина коэффициента детерминации рассчитывалась на основе следующего выражения:

$$R^2 = 1 - \frac{ERF}{ERM}, \quad (2.36)$$

где ERF – сумма квадратов остатков, представляющая отклонение поверхности от плоскости, которая записывается следующим образом:

$$ERF = \int_0^{\lambda^*} \int_0^{\beta^*} (E_{ii}(\lambda, \beta) - A_1\beta - A_2\lambda - A_3)^2 d\lambda d\beta, \quad (2.37)$$

а ERM – общая сумма квадратов, представляющая отклонение результатов моделирования от среднего значения, которая записывается следующим образом:

$$ERM = \int_0^{\lambda^*} \int_0^{\beta^*} (\langle E_{ii}(\lambda, \beta) \rangle - A_1\beta - A_2\lambda - A_3)^2 d\lambda d\beta. \quad (2.38)$$

Тогда пороговые значения  $\lambda^*$  и  $\beta^*$  могут быть найдены итерационно методом дихотомии на основе равенства коэффициенте детерминации заданной величине равной 0.95. При этом допускается ошибка сверху. Полученные линейные аппроксимации обозначим такими же функциями, но с верхним индексом  $L$ , например для модулей упругости:

$$E_{11}^L(\lambda, \beta) = A_1\beta + A_2\lambda + A_3 \quad (2.39)$$

где  $A_1, A_2, A_3$  – коэффициент линейной аппроксимации.

На рисунке 2.8 представлена поверхность нормированного эффективного модуля упругости ( $E_{11}/E$ ), а красной пунктирной линией показана найденная граница участка линейного влияния параметров.

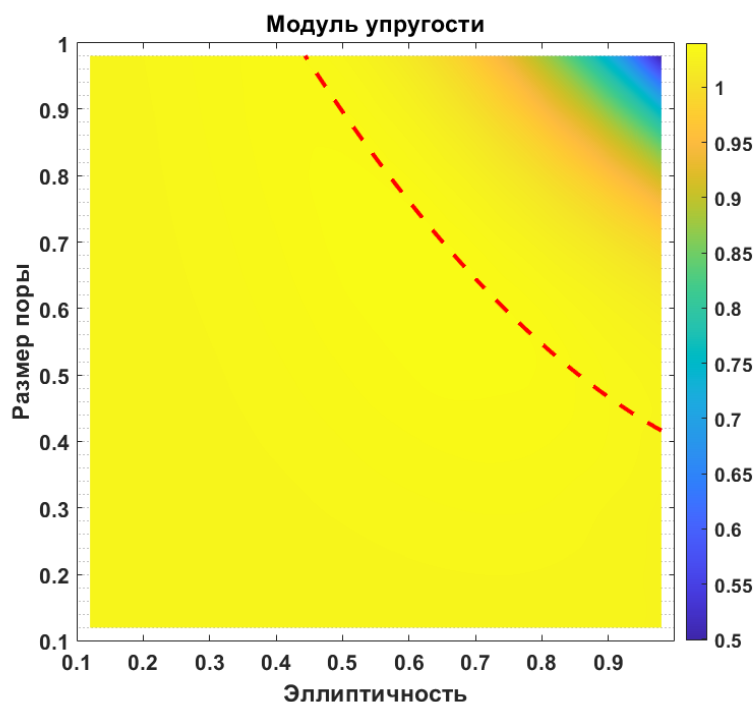


Рисунок 2.8 Значение модуля упругости в зависимости от  $\lambda$  и  $\beta$

Значение объемной доли пористости  $\rho$  образца, содержащего одиночную игловидную пору, можно рассчитать по формуле:

$$\rho(\lambda, \beta) = \frac{\pi}{6} \lambda^2 \beta^3. \quad (2.40)$$

Анализ зависимости пористости  $\rho$  от безразмерных параметров  $\lambda$  и  $\beta$  (Рисунок 2.9) позволяет напрямую соотнести геометрические параметры поры с её объёмным содержанием. Поскольку  $V$  остается постоянным, пористость является функцией только  $\lambda$  и  $\beta$ . Эта зависимость критически важна, так как именно объемная доля пористости часто является ключевым параметром в аналитических моделях ослабления материала.

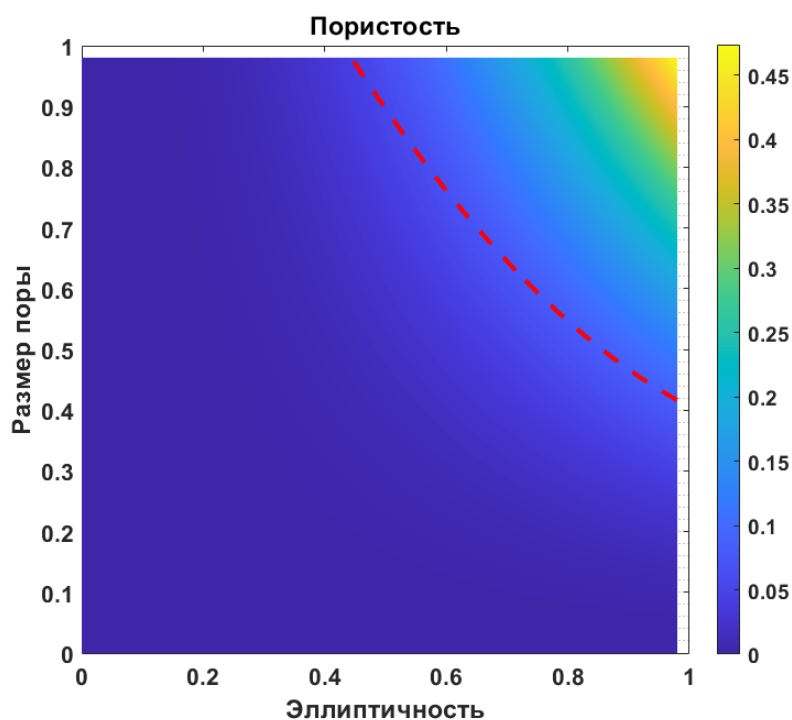


Рисунок 2.9 Значение пористости в зависимости от  $\lambda$  и  $\beta$

Из расчётов следует, что при объёмной доле игловидной микропористости в интервале примерно 4.4%–8.8% снижение эффективного модуля упругости происходит по линейному закону. Этот диапазон определяет область применимости аддитивной модели, основанной на приближении малой концентрации. Для инженерных допусков рекомендуется ориентироваться на нижнюю границу ( $\approx 4.4\%$ ), так как превышение верхней границы приводит к существенному усилению нелинейных эффектов взаимодействия пор и требует корректировки технологического процесса или использования более сложных моделей для учёта сниженных свойств.

### 2.3 Численные эксперименты

Результаты, полученные при анализе одиночной поры в разделе 2.2, позволили установить границы применимости линейной модели ослабления и определить предельные значения геометрических параметров ( $\lambda$  и  $\beta$ ), при которых игловидная межслойная пористость линейно влияет на упругие свойства материала.

Однако в реальных условиях FDM-печати пористость носит статистический характер: дефекты формируются множественно, располагаются в различных слоях и характеризуются сложным взаимодействием. В связи с этим, на следующем этапе рассматривается модель случайного распределения дефектов по объему.

Для моделирования разнообразных кубических образцов и игловидной порой был разработан алгоритм их генерации. Во время производства методом FDM печати, каждый следующий слой производится ортогонально предыдущему. Поэтому дефекты на каждом слое генерируются в своем направлении (рисунок 2.10).

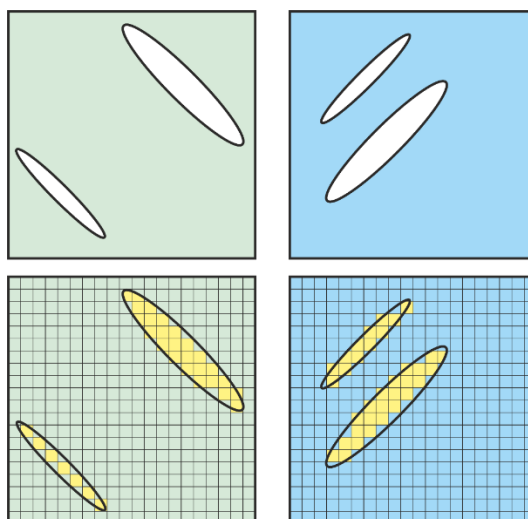


Рисунок 2.10 генерация дефектов на двух смежных слоях

Для обеспечения физической и технологической достоверности численной модели были установлены строгие геометрические параметры дефектов. Сторона кубического представительного объема устанавливается равной 0.2 мм. Выбор этого размера напрямую связан с технологическим процессом изготовления образцов, поскольку он соответствует диаметру сопла экструдера. Использование этого характерного размера гарантирует соразмерность представительного объема микроструктурным особенностям, формируемым FDM-процессом.

Максимальный поперечный диаметр генерируемого дефекта также принимается равным 0.2 мм. Это ограничение обусловлено физикой процесса экструзии, поскольку больший диаметр дефекта не соответствует нормальному режиму печати, а, скорее, является результатом критического залипания филамента в сопле или грубого технологического брака. Дефекты с поперечным размером, превышающим диаметр сопла, не рассматриваются, поскольку их наличие в изделии (например, непропечатывание более двух слоев в одном месте) автоматически классифицируется как производственный брак, не подлежащий дальнейшей эксплуатации.

На основе данного подхода был разработан алгоритм генерации кубических образцов:

---

#### Алгоритм генерации кубических структур с пористостью

---

##### Ввод:

Требуемая целевая межслойная пористость  $\rho$ ;

Характерный размер кубического объема  $L$ ;

$$f(x, y, z) = 1, \text{ где } x, y, z = [0, L]$$

Характерный размер представительного объема  $l$ ;

---

Пока текущая пористость  $\neq$  целевой пористости

1. Случайно выбрать слой  $k$  по высоте кубического объема с использованием равномерного распределения:

$$x \in U_{[0,L]}$$

2. В выбранном слое  $k$  случайным образом выбираются координаты сетки, то есть воксель, следующим образом:

$$\begin{cases} y \in U_{[0,L]} \\ z \in U_{[0,L]} \end{cases}$$

3. Инициализировать выбранный воксель как начальное ядро вытянутого дефекта, присвоив ему фазу поры, т.е. 0.

$$f(x, y, z) = 0$$

Если  $\rho = \rho_{\text{тек}}$ , где  $\rho_{\text{тек}}$  – текущая пористость

Выход из цикла

КонецЕсли

4. Определяется проверка на остановку роста поры:

$$c_s \in U_{[0,1]},$$

Если  $c_s < 0.4$

Переход к шагу 1

КонецЕсли

5. Определяется случайное направление роста поры:
-

- б. Сгенерировать случайное решение о продолжении формирования текущего дефекта: если продолжаем, вернуться к п. 3 и удалить следующий смежный воксель по диагонали; если дефект закрыт – перейти к п. 1 для выбора нового слоя.

### Выход

#### Бинарная модель

Приведенный алгоритм генерации микроструктуры (Раздел 2.6) был реализован численно на основе регулярной сетки, размер элементов (вокселей) которой был равен диаметру сопла экструдера, составляющему 0.2 мм.

На основе предложенного алгоритма генерации тестовых образцов были сгенерированы образцы четырех типов, отличающиеся характером распределения дефектов (Рисунок 2.11). Образец без дефектов (Рисунок 2.11.0), образец с одиночной макропорой (Рисунок 2.11.И), проектировочной полостью, расположенной в центре; образец с одиночной макро- и дополнительно сгенерированными микропорами (Рисунок 2.11.ИИ), образец только со сгенерированной микропористостью (Рисунок 2.11.ИИИ),.

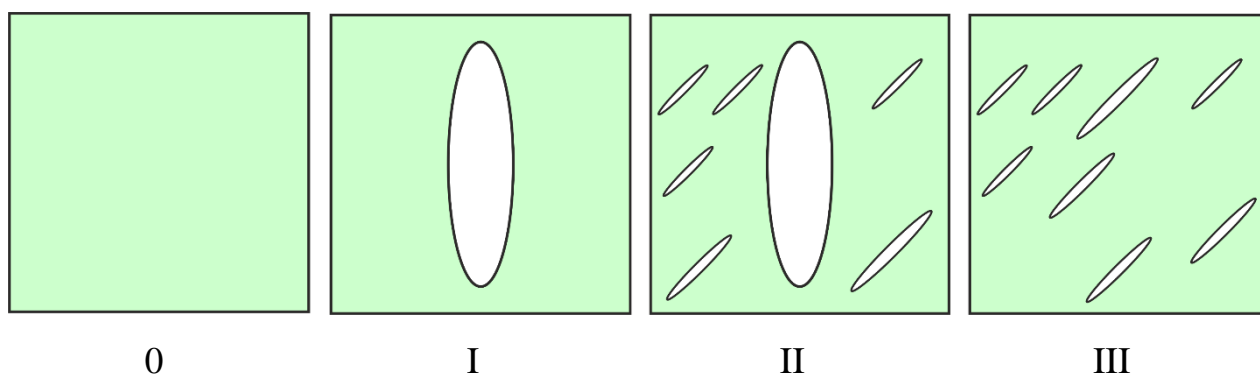


Рисунок 2.11. Центральное сечение образцов: 0 – сплошной образец, I – образец с макропорой II – образец с макро и микропорами, III – образец с микропористостью.

В численных экспериментах образцы типа II и III были сгенерированы в количестве  $n = 1000$  штук. Для каждого  $n$  сгенерированных образцов решалась задача (2.31) с кинематическими граничными условиями (2.32). Из полученного тензора упругих констант определялся эффективный модуль упругости.

Далее представим получаемый характерный тензор упругих констант для образца типа II в нотации Фойгта:

$$\begin{pmatrix} 2248.1 & 1151.6 & 1151.6 & -5 \cdot 10^{-2} & -2 \cdot 10^{-2} & -5 \cdot 10^{-2} \\ 1151.6 & 2523.8 & 1243.9 & -3 \cdot 10^{-2} & -4 \cdot 10^{-2} & -1 \cdot 10^{-2} \\ 1151.6 & 1243.9 & 2523.8 & -1 \cdot 10^{-2} & -4 \cdot 10^{-2} & -3 \cdot 10^{-2} \\ -5 \cdot 10^{-2} & -3 \cdot 10^{-2} & -1 \cdot 10^{-2} & 583.8 & 2 \cdot 10^{-3} & 1 \cdot 10^{-3} \\ -2 \cdot 10^{-2} & -4 \cdot 10^{-2} & -4 \cdot 10^{-2} & 2 \cdot 10^{-3} & 624.7 & 2 \cdot 10^{-3} \\ -5 \cdot 10^{-2} & -1 \cdot 10^{-2} & -3 \cdot 10^{-2} & 1 \cdot 10^{-3} & 2 \cdot 10^{-3} & 583.8 \end{pmatrix}$$

Ввиду малости внедиагональных компонент тензора, отвечающих за анизотропию, ими можно пренебречь. Это позволяет аппроксимировать тензор упругих констант более простой ортотропной моделью.

Используя полученный ортотропный тензор податливости, пересчитываются соответствующие механические характеристики. В качестве примера выводится разброс нормированных значений модулей упругости на модуль упругости заданного материала для сгенерированных образцов типа II и III (Рисунок 2.12).

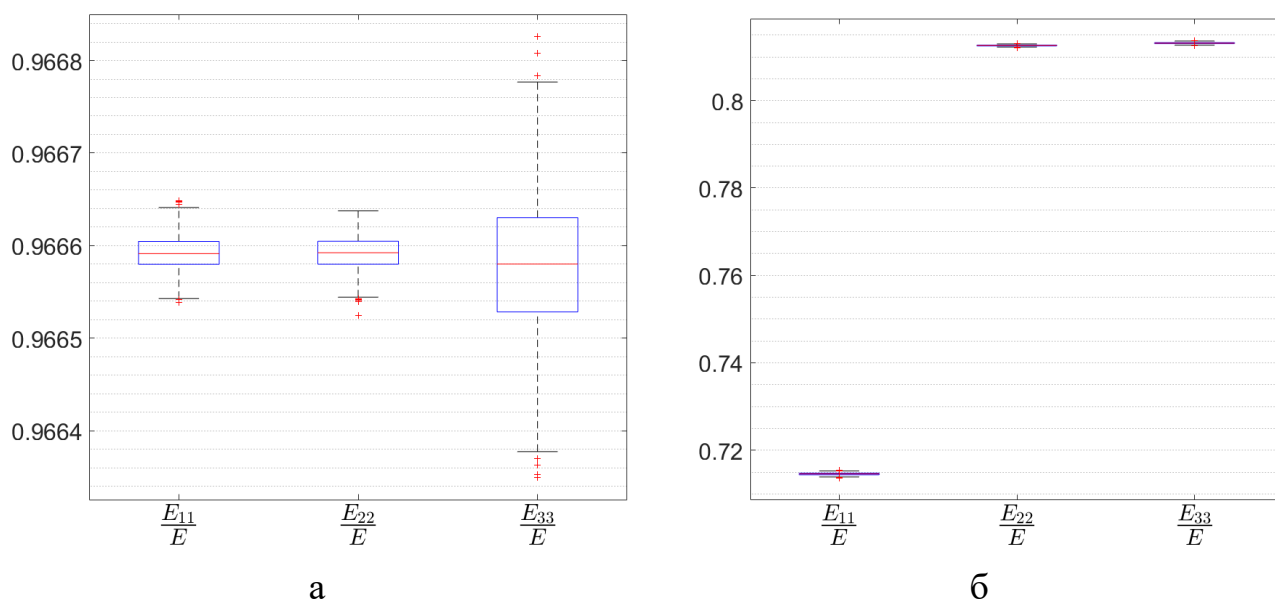


Рисунок 2.12. Распределение модулей упругости: а – образец III; б – образец II.

Для количественной оценки влияния случайной микропористости в образцах II и III на эффективные механические характеристики итоговых образцов воспользуемся ранее полученной формулой (2.30). В рамках данного подхода деформацию материала и проектировочной макропоры, при

её наличии, будем брать за известные величины (образец 0 и I). Тогда формулу (2.30) можно записать следующим образом:

$$\mathbf{C}^{hom} : \boldsymbol{\varepsilon}^0 = \mathbf{C}^{pr} : \boldsymbol{\varepsilon}^0 - \mathbf{C} : \boldsymbol{\varepsilon}^{IT} \quad (2.41)$$

где  $\mathbf{C}^{pr}$  – это тензор упругих констант, найденный для проектировочных образцов с наличием или без макропоры.

В рамках данного подхода, эффективный тензор упругих констант  $\mathbf{C}^{hom}$  будет нормирован на тензор упругих констант  $\mathbf{C}^{pr}$ , найденный для проектировочных образцов (0 и I). Таким образом (2.41) можно записать

$$\mathbf{S}^{pr} : \mathbf{C}^{hom} : \boldsymbol{\varepsilon}^0 = \mathbf{S}^{pr} : \mathbf{C}^{pr} : \boldsymbol{\varepsilon}^0 - \mathbf{S}^{pr} : \mathbf{C} : \boldsymbol{\varepsilon}^{IT}, \quad (2.42)$$

откуда получим:

$$\mathbf{S}^{pr} : \mathbf{C}^{hom} : \boldsymbol{\varepsilon}^0 = \mathbf{I} : \boldsymbol{\varepsilon}^0 - \mathbf{S}^{pr} : \mathbf{C} : \boldsymbol{\varepsilon}^{IT}, \quad (2.43)$$

где  $\mathbf{S}^{pr}$  – это тензор податливости для проектировочных образцов.

Деформация, возникающая от микропористости  $\boldsymbol{\varepsilon}^{IT}$ , линейно связана с деформацией материала  $\boldsymbol{\varepsilon}^0$ , тогда можно записать следующее выражение:

$$\mathbf{S}^{pr} : \mathbf{C}^{hom} : \boldsymbol{\varepsilon}^0 = \mathbf{I} : \boldsymbol{\varepsilon}^0 - \mathbf{S}^{pr} : \mathbf{C} : \mathbf{G} : \boldsymbol{\varepsilon}^0 \quad (2.44)$$

где  $\mathbf{G}$  – это тензор четвертого ранга связывающий микродеформацию  $\boldsymbol{\varepsilon}^{IT}$  и деформацию материала  $\boldsymbol{\varepsilon}^0$ . Таким образом, (2.44) можно записать в виде:

$$\mathbf{S}^{pr} : \mathbf{C}^{hom} = \mathbf{I} - \mathbf{S}^{pr} : \mathbf{C} : \mathbf{G} \quad (2.45)$$

или

$$\begin{aligned} \mathbf{C}^{hom} &= \mathbf{C}^{pr} : (\mathbf{I} - \mathbf{K}^h), \\ \mathbf{K}^h &= \mathbf{S}^{pr} : \mathbf{C} : \mathbf{G}. \end{aligned} \quad (2.46)$$

С помощью численных экспериментов оценим вклад тензора 4 ранга  $\mathbf{K}^h$  на эффективные механические свойства. В ходе численных расчетов (2.47) было установлено, что вклад тензора  $\mathbf{K}^h$ , коррелирует со скалярным значением межслойной пористости в каждом образце.

$$\mathbf{C}^{II} = \mathbf{C}^I : (\mathbf{I} - \mathbf{K}^h), \quad (2.47)$$

$$\mathbf{C}^{III} = \mathbf{C}^0: (\mathbf{I} - \mathbf{K}^h),$$

В случае  $\mathbf{C}^{II}$  было установлено, что в среднем снижение жесткости эквивалентно влиянию скаляра, а именно 0.0346. В случае  $\mathbf{C}^{III}$  такой эффект соответствовал значению 0.033.

Таким образом, можно сказать, что для данной системы геометрии дефектов, сложный тензорный вклад от межслойной пористости может быть аппроксимирован одним скалярным параметром, а именно фактическим значением межслойной пористости. Такой подход значительно упрощает аналитическую модель:

$$\mathbf{C}^{hom} = \mathbf{C}^{pr} (1 - \rho^{IT}) \quad (2.48)$$

При таком подходе (2.48) максимальная относительная погрешность составляет 6.3%.

Для подтверждения того, что разработанный алгоритм генерации создает статистически репрезентативный ансамбль образцов, а не детерминированный набор, полученный, например, простой перестановкой слоев, необходимо продемонстрировать статистический разброс геометрических параметров дефектов. С этой целью была проанализирована взаимосвязь между максимальным поперечным диаметром дефекта и его объемом (или объемной долей пористости). Так на Рисунке 2.11 представлено зависимость между диаметром дефекта, а именно большей полуосью эллипса, и объемом для двух случайно выбранных образцов (Рисунке 2.11.а) и серые точки отображают геометрические характеристики всего ансамбля сгенерированных образцов с межслойных пористостью (Рисунке 2.11.б).

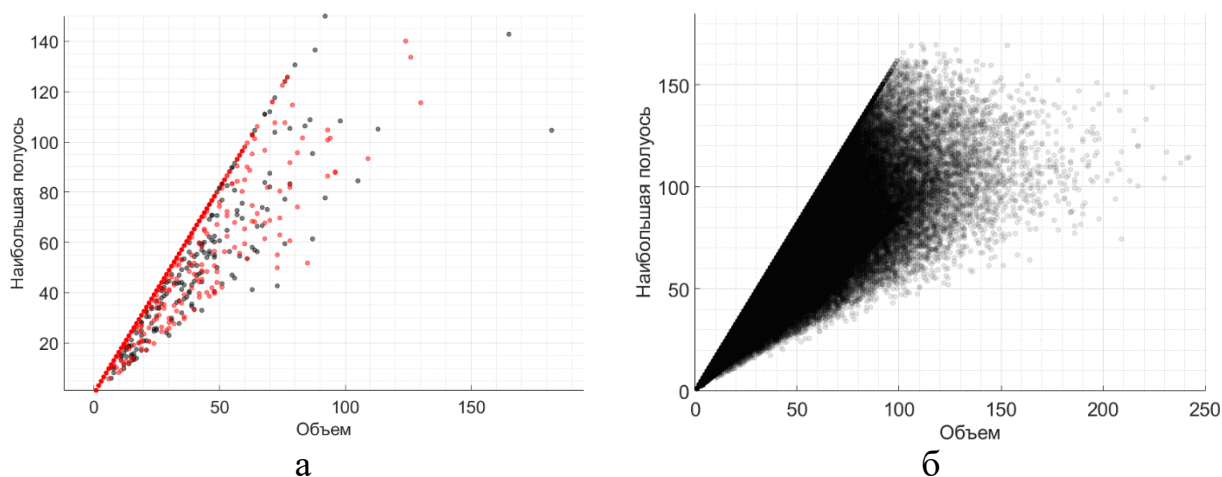


Рисунок 2.13 Зависимость максимального поперечного диаметра дефекта от его объема: а – два случайно выбранных образца; б – ансамбль образцов.

Проверка на нормальность распределения объемов индивидуальных пор (внутри одного образца) показала, что данные не подчиняются нормальному распределению. Для проверки статистической однородности ансамбля было проведено сравнение наборов данных между различными образцами. В связи с ненормальным характером распределений был применен непараметрический критерий Краскела-Уоллиса. Результат показал, что статистическое различие между образцами отсутствует при уровне р-значимости 0.05.

Таким образом, использование критерия Краскела-Уоллиса и полученный результат, говорит о статистической робастности разработанного алгоритма. Он гарантирует, что, несмотря на уникальность геометрии каждого отдельного образца (Рисунок 2.11), весь ансамбль в целом представляет собой статистически однородную выборку.

## Выводы по главе 2

Во второй главе диссертационной работы представлена математическая модель оценки влияния межслойной пористости, возникающая при аддитивном производстве, на эффективные механические свойства. Проведены численные эксперименты, показавшие, что учет влияния межслойной пористости, характерной для FDM-печати и имеющей вытянутую форму, может быть корректно описан в рамках подхода

гомогенизации с аддитивным разложением вклада макро- и микродефектов. Были определены предельные значения безразмерных параметров формы пор, при которых возможно использование линейных аппроксимаций для оценки эффективных механических свойств.

Очевидно, что рассмотренная численная модель построена на тех же физических постулатах, что и модель гомогенизации. Поэтому, для полноценной верификации необходимо проведение экспериментальных исследований. В этом случае основной проблемой является оценка распределения и морфологии межслойной пористости. Поэтому, на основе проведенного литературного обзора (Глава 1) было решено спроектировать и изготовить специализированную экспериментальную оснастку, позволяющую проводить эксперименты по контролируемому нагружению образцов совместно со сканированием рентгеновским компьютерным томографом.

## **ГЛАВА 3**

### **СИСТЕМА НАГРУЖЕНИЯ ОБРАЗЦОВ ДЛЯ КОМПЬЮТЕРНОЙ ТОМОГРАФИИ**

Данная глава освещает разработку экспериментальной установки для проведения испытаний на сжатие совместно со съемкой в РКТ. В ней описаны этапы проектирования системы, в том числе подбор и верификация параметров электропривода, конструктивные решения для передачи усилия и минимизации артефактов при сканировании. Помимо этого, глава демонстрирует интеграцию аппаратной части с системой управления, что позволяет синхронизировать процесс нагружения с регистрацией показаний динамометра. Результаты испытаний подтверждают корректность выбранных решений и пригодность конструкции для анализа физико-механических свойств материалов.

#### **3.1 Автоматизированная система нагружения образцов**

В качестве системы нагружения предлагается использовать оснастку, которая позволяет нагружать образец сжимающей нагрузкой. Главным критерием для оснастки является возможность беспроблемной установки внутрь компьютерного томографа, то есть удовлетворять габаритам камеры томографа, а также возможность беспрепятственной съемки образца. Во время съемки внутри компьютерного томографа, основание оснастки не должно давать артефактов на конечном цифровом двойнике. Другим немаловажным фактором служит автоматизация приложения внешней нагрузки на образец. Нагрузка должна прикладываться равномерно как по скорости нагружения, так и на поверхность образца.

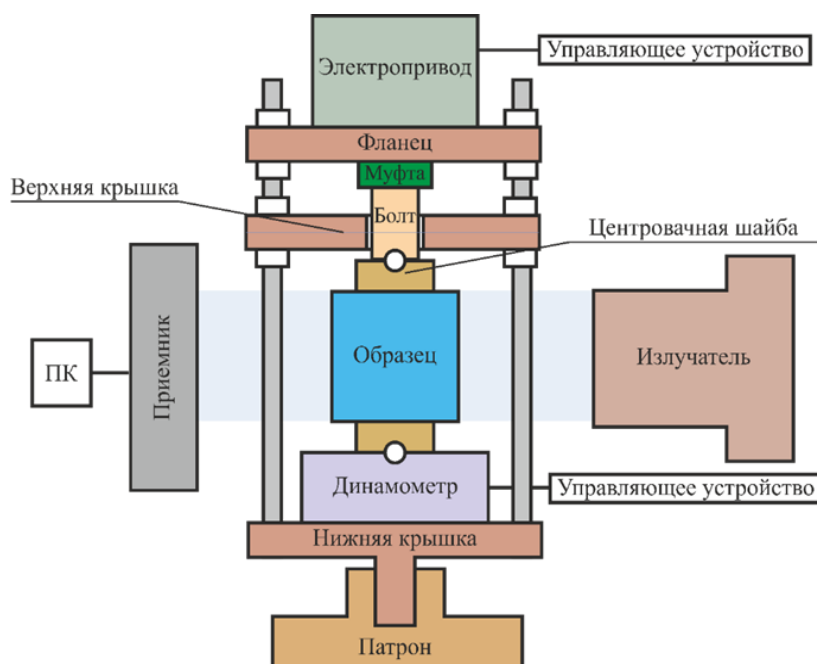


Рисунок 3.1 – Устройство для нагружения образцов внутри РКТ

Оснастка состоит (Рисунок 3.1) из нижней крышки с креплением под патрон компьютерного томографа; 4-ех шпилек, проходящие через всю конструкцию оснастки, являющихся каркасом; фланца, который является крышкой для крепления электропривода и верхней крышки, необходимой для реализации передачи винт-гайка. В качестве измерительного устройства, на нижнюю крышку устанавливается электронный динамометр, на который устанавливаются композиционные проставки. Проставки необходимы для центрирования образца и отдаления образца от динамометра и винта, с целью снижения артефактного излучения в исследуемой зоне. Электропривод состоит из электродвигателя и редуктора и устанавливается на фланец. На вал редуктора устанавливается муфта под винт. Винт устанавливается в верхнюю крышку. Для того чтобы снизить момент кручения во время передачи усилия с винта, на образец устанавливается шарик и композиционная проставка. В данном случае композиционная проставка, как и в случае с динамометром, отдаляет исследуемый образец от нагрузочного винта и центрует образец.

### 3.2 Проектировочный расчет оснастки

Перед тестированием и эксплуатации оснастки в реальных условиях, проводился прочностной расчет и подбор компонент. Для изготовления оснастки был выбран дюралюминий марки Д16Т. За счет малой плотности, относительно других металлов, а именно  $2.7 \text{ г/см}^3$ , детали из алюминия не дают сильных артефактов при сканировании на РКТ.

### 3.2.1. Определение минимального диаметра шпилек

При нагружении образца по выбранной схеме (Рисунок 3.1), шпильки работают на растяжение. При испытаниях на растяжение предел текучести  $\sigma_T$  дюралюминия составляет 320 МПа. В соответствии с ГОСТ 26158-84 «Сосуды и аппараты из цветных металлов. Нормы и методы расчета на прочность. Общие требования», минимальный коэффициент запаса прочности  $s$  по условию предела текучести для алюминия, меди и их сплавов в рабочих условиях установлен на уровне 1,5. Однако в данной ситуации необходимо дополнительно учесть факторы, связанные с точным позиционированием фланцев относительно друг друга, которые могут привести к непредусмотренным нагрузкам. Для компенсации этих рисков коэффициент запаса прочности целесообразно увеличить до 3. Это позволяет создать двойной запас безопасности: первый — для стандартных отклонений, регламентированных нормативом, и второй — для специфических условий монтажа, требующих повышенной точности и устойчивости к деформациям.

Передаваемая нагрузка распределяется между 4-мя шпильками. Для обеспечения работы шпилек в упругой зоне, необходимо соблюдать условие, при котором возникающие напряжения не превышает предела текучести  $\sigma_T$ , и записывается следующим образом:

$$\frac{\sigma_T}{s} = \frac{F}{n_s A},$$

где  $n_s$  — количество шпилек,  $F$  — нагрузка на образец,  $A$  — площадь поперечного сечения;  $s$  — коэффициент запаса.

Площадь поперечного сечения выражается следующим образом

$$A = \frac{\pi D_s^2}{4},$$

где  $D_s$  - диаметр шпилек.

Максимальная нагрузка, которую будет воспринимать разработанная оснастка, ограничивается в 10кН. Минимальный диаметр дюралюминиевых шпилек определялся следующей формулой:

$$D_s = \sqrt{\frac{s \cdot F}{\pi \cdot \sigma_T}} = \sqrt{\frac{3 \cdot 10\text{кН}}{\pi \cdot 320 \text{ МПа}}} = 5.46 \text{ мм.}$$

Таким образом, исходя из заданных характеристик материала и ограничением по нагрузке, был выбран диаметр дюралюминиевых шпилек, являющиеся основной несущей составляющей данной оснастки, равный 6 мм. Максимальная расчетная нагрузка работы оснастки без возникновения пластических деформаций или разрушений составляет 36кН.

### 3.2.2. Определение характеристик винта

При действии на винт осевой силы  $F$  условие прочности записывается следующим образом [7]:

$$\tau_{\text{ср}} = \frac{F}{\pi \cdot D_{\text{min}} \cdot p \cdot k \cdot n} \leq [\tau_{\text{ср}}],$$

где  $D_{\text{min}}$ —диаметр винта;  $p$  – шаг резьбы;  $k$  – коэффициент полноты резьбы;  $n$  – число рабочих витков;  $[\tau_{\text{ср}}]$  – допускаемое напряжение на срез.

Был выбран стандартный винт с классом прочности 8.8, шагом резьбы  $p$  равным 1.75 мм, коэффициентом полноты резьбы  $k = 0.87$ . Количество витков определяется из толщины средней крышки,  $n = 6$ . Согласно СТО 0041-2004 «Конструкции стальные строительные. Болтовые соединения. Проектирование и расчет» допустимое напряжение среза составляет 0.4 от временного сопротивления материала  $\sigma_B$ . Допускаемое напряжение среза винта с классом прочности 5.8 определяется по формуле:

$$[\tau_{\text{ср}}] = 0.4 \cdot \sigma_B = 320 \text{ МПа,}$$

Наименьший допустимый диаметр нагрузочного винта определяется по формуле:

$$D_{min} \geq \frac{F}{\pi \cdot [\tau_{cp}] \cdot p \cdot k \cdot n} = \frac{10 \text{ кН}}{\pi \cdot 200 \text{ МПа} \cdot 1.75 \text{ мм} \cdot 0.87 \cdot 6} = 1.08 \text{ мм.}$$

Проведем расчет винта на смятие. Расчетное напряжение смятия  $\sigma_{см}$  сравнивается с допустимым напряжением смятия  $[\sigma_{см}]$ . Согласно СП 16.13330.2017 «Стальные конструкции» напряжение смятия принимается пределу текучести. Минимально допустимый диаметр нагрузочного винта по оценки на смятие будет определяться следующим образом:

$$D_{min} \geq \sqrt{\frac{4 \cdot F}{\pi \cdot [\sigma_{см}]}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 10 \text{ кН}}{\pi \cdot 640 \text{ МПа}}} = 4.46 \text{ мм.}$$

Минимально допустимый диаметр винта в передаче винт гайка составляет 4.46 мм. Для обеспечения удобства монтажа, повышения надежности и соответствия стандартам возьмём винт М12, а его диаметр примем за  $D_1$ . Такое решение обеспечивает значительный запас прочности, упрощает монтаж оснастки и повышает безопасность конструкции.

Ввиду сжатия винта в ходе натурных испытаний, необходимо произвести расчет на потерю устойчивости, для определения максимально допустимой длины винта, при которой он не потеряет устойчивость. Согласно формуле Эйлера,  $F_{кр}$  определяется по формуле:

$$s \cdot F_{кр} = \frac{\pi^2 EJ}{(\mu l)^2},$$

где  $F_{кр}$  – критическая нагрузка, при которой происходит потеря устойчивости винта;  $s$  – коэффициент запаса;  $E$  – модуль упругости материала винта;  $\mu$  – коэффициент длины, зависящий от граничных условия;  $l$  – длина винта,  $J$  – момент инерции поперечного сечения винта.

Согласно ГОСТ 26158-84 «Сосуды и аппараты из цветных металлов. Нормы и методы расчета на прочность. Общие требования» коэффициент запаса на устойчивость для рабочих условий принимается равным 2.4.

Для круглого сечения винта диаметром  $D_1$  момент инерции определяется следующим образом:

$$J = \frac{\pi D_1^4}{64} = 1017.36 \text{ мм}^4.$$

Коэффициент длины  $\mu$  зависит от способа закрепления, согласно схеме нагружения винта граничные условия соответствуют жестко защемленному концу и свободному краю, и принимается равным 2. Винт классом 8.8 имеет модуль упругости равный 200 ГПа. Допустимая длина винта  $l$  определялась по формуле:

$$l = \sqrt{\frac{\pi^2 EJ}{\mu^2 s F_{кр}}} = \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot 200 \text{ ГПа} \cdot 1017.36 \text{ мм}^4}{2^2 \cdot 2.4 \cdot 10 \text{ кН}}} = 144.6 \text{ мм}.$$

Таким образом максимально допустимая рабочая длина винта составляет 144.6 мм. В реальных условиях использования возможны вибрационные нагрузки, которые могут негативно сказаться на прочностные свойства оснастки.

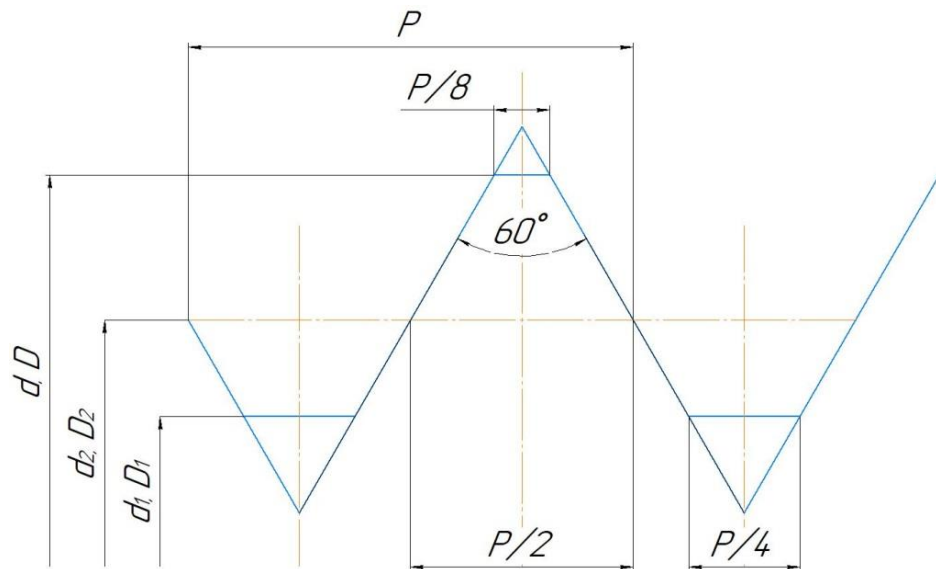


Рисунок 3.2 Профиль метрической резьбы D – наружный диаметр внутренней резьбы; d – наружный диаметр наружной резьбы; d2, D2 – средний диаметр; D1 – внутренний диаметр внутренней резьбы; d1 – внутренний диаметр наружной резьбы; P – шаг резьбы

Для передачи усилия на испытуемый образец была выбрана передача винт-гайка. Метрическая резьба, используемая в передаче представлена на Рисунок 3.2.

В таблице 3.1 приведены параметры резьбы согласно ГОСТ 24705-81 (СТ СЭВ 182-75) для винта М12.

Таблица 3.1 – ГОСТ 24705-81 (СТ СЭВ 182-75)

Номинальный диаметр резьбы, d	Шаг, P	Диаметры резьбы			
		d=D	d <sub>2</sub> = D <sub>2</sub>	d <sub>1</sub> = D <sub>1</sub>	d <sub>3</sub>
12	1.75	12.000	10.863	10.106	9.853

Для подбора необходимого электродвигателя, обеспечивающего передачу сжимающей нагрузки  $F$  на испытуемый образец с выбранным коэффициентом запаса, необходимо определить крутящий момент  $M$  электродвигателя. Коэффициент запаса для электродвигателей, работающих при переменных нагрузках, составляет 2. Для учета непредвиденных нагрузок, связанных с рывками и вибрацией берется дополнительный коэффициент запаса равный 1.5. Общий коэффициент запаса  $s$  для электродвигателя составляет 3. Согласно рекомендациям Р 50-54-90-88 (“Расчеты и испытания на прочность. Общие требования к расчетам на прочность резьбовых соединений”), крутящий момент был определен по формуле:

$$M = 0,5 \cdot s \cdot F \cdot D_2 \cdot \operatorname{tg}(\xi + \rho_T),$$

где  $D_2$  – средний диаметр резьбы,  $\xi$  – угол подъема резьбы,  $\rho_T$  - угол трения резьбовой пары.

Угол подъема резьбы  $\xi$  зависит от шага резьбы винта  $p$  и вычисляется по формуле:

$$\xi = \operatorname{arctg}\left(\frac{p}{\pi D_2}\right) = 0.051^\circ.$$

Угол трения  $\rho$  резьбовой пары зависит от коэффициента трения  $f_p$ , принимаемым 0.2, в опорной поверхности винта и углом рабочей стороны резьбы  $\alpha = 30^\circ$

$$\rho_T = \arctg \left( \frac{f_p}{\cos \alpha} \right) = 0.227^\circ.$$

Следовательно, необходимый крутящий момент электродвигателя  $M$  будет соответствовать:

$$M = 46502.9 \text{ Н} \cdot \text{мм}.$$

Таким образом необходимый крутящий момент электропривода должен быть не менее 46.5 Н·м.

Для передачи крутящего момента с вала редуктора на винт необходима муфта со шпоночным соединением с одной стороны и шестигранником с другой. Шпонка предполагается изготавливалась из стали 40Х с пределом текучести  $\sigma_T$  равным 490 Мпа. Параметры шпоночного соединения: рабочая длина шпонки  $l$  равна 30мм, диаметр вала  $d_s$  равен 24 мм, ширина шпонки  $b$  равна 4.5 мм, высота шпонки  $K$ , выступающей из тела вала, равна 2 мм. Для проверки шпоночного соединения на прочность, необходимо провести расчет на смятие [7], с ограничением наибольшим допустимым крутящим моментом  $M$ :

$$M \leq 0.5 \cdot d_s \cdot K \cdot L \cdot \sigma_{см}.$$

Допустимое напряжение смятия  $\sigma_{см}$  принималось равным половине от предела текучести, коэффициент запаса  $s$  равен 3. Таким образом, напряжение смятия высчитывается по формуле:

$$\sigma_{см} = 0.5 \cdot \frac{\sigma_T}{s} = 81.66 \text{ МПа}.$$

Подставляя значение параметров шпоночного соединения и допустимого напряжения смятия, получаем следующее:

$$M \leq 0.5 \cdot 24 \text{ мм} \cdot 2 \text{ мм} \cdot 30 \text{ мм} \cdot 81.66 \text{ МПа} = 58795 \text{ Н} \cdot \text{мм} = 58.7 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Допустимое напряжение среза шпонки  $\tau_{\text{ср}}$  обычно составляет 0.3 от предела текучести  $\sigma_{\text{T}}$ , коэффициент запаса  $s$  равен 3. Таким образом напряжение среза высчитывается по формуле:

$$\tau_{\text{ср}} = 0.3 \frac{\sigma_{\text{T}}}{s} = 0.3 \frac{490 \text{ МПа}}{3} = 49 \text{ МПа.}$$

Допустимое напряжение среза шпонки  $\tau_{\text{ср}}$  ограниченный наибольшим допустимым крутящим моментом  $M$ , определяется по следующей формуле:

$$M \leq 0.5(d + K) \cdot b \cdot l \cdot \tau_{\text{ср}} = 85.9 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

Момент электропривода, необходимый для достижения нагрузки в 10кН на образец, составляет 46.5 Н·м. Необходимый момент необходимый для смятия шпонки составляет 58.7 Н·м, а для среза 85.9 Н·м. Таким образом, шпонка из стали марки 40Х удовлетворяет требованиям.

### **3.3 Комплектующие для оснастки**

Для выполнения испытаний на сжатие совместно с РКТ необходимо подобрать комплектующие, которые соответствуют требованиям проведения испытаний, габаритным ограничениям оснастки, обусловленным размерами камеры РКТ, а также обеспечивают возможность автоматизации процесса нагружения. Таким образом, требуется компактный, легкий, мощный электродвигатель, способный выполнять точные перемещения и надежно фиксировать вал в промежуточных положениях под нагрузкой. Как было показано ранее, необходимый крутящий момент должен быть не менее 46.5 Н·м. С этой целью был выбран шаговый электродвигатель ST57-56 с максимальным крутящим моментом 1.3 Н·м и фланцем 57 мм (Таблица 3.2.).

Таблица 3.2 – Характеристики шагового двигателя

Параметры	Значения
Тип двигателя	2х-фазный ШД
Момент удержания, Н·м	1.3
Ток фазы, А	3.0
Сопротивление обмотки, Ом	0.7
Масса, кг	0.69
Длина корпуса, мм	56
Шаг, °	1.8

Из существующих аналогов, данный шаговый двигатель обладает оптимальным соотношением габаритов и производительности. Одной из ключевых особенностей данного двигателя является минимальный уровень вибраций в процессе работы (Рисунок 3.3).



Рисунок 3.3 Шаговый двигатель ST57-56

Увеличение крутящего момента происходит благодаря установке планетарного редуктора. В качестве редуктора был выбран PX57N050S0 с передаточным отношением 50 (Рисунок 3.4).



Рисунок 3.4 Планетарный редуктор PX57N050S0

Для крепления электродвигателя и редуктора были спроектированы упорная шайба с отверстием под винтовую передачу (Рисунок 3.5.а) и два фланца: один имеет направляющие под шпильки, для уменьшения изгибающей силы и давления на витки резьбы (Рисунок 3.5.б), второй – фиксирует электродвигатель вдоль оси нагружения (Рисунок 3.5.в).

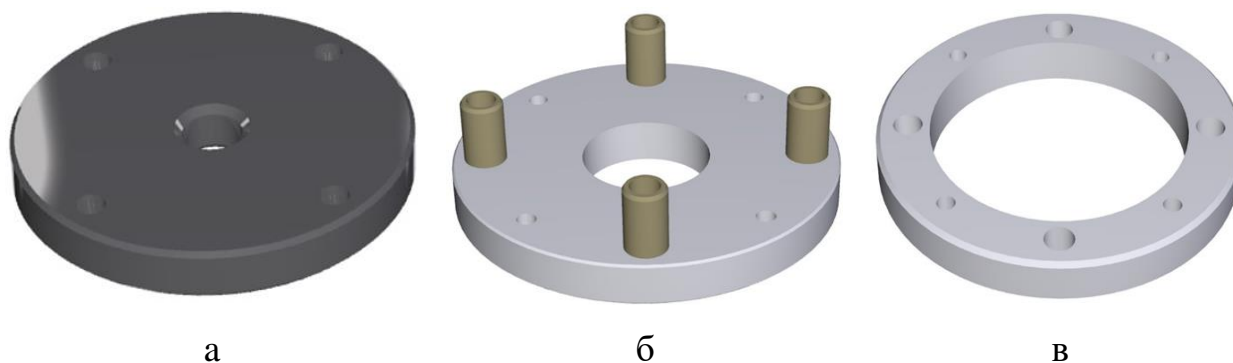


Рисунок 3.5 Элементы крепления электродвигателя: а. упорная шайба; б. фланец с направляющими; в. фиксирующий фланец

Привод фиксировался на четырех дюралюминиевых (Д16Т) шпильках М6, которые минимизируют появление артефактов при рентгеновском излучении во время съемки в компьютерном томографе. Для передачи крутящего момента была разработана муфта, фиксирующийся на выходном валу редуктора (Рисунок 3.6). Длина зоны установки нагрузочного винта данного переходника соответствует максимальному перемещению, которое может совершить винт. В данном исполнении максимальное перемещение составляет 10мм.



Рисунок 3.6 Муфта выходного вала

### 3.4 Программное управление оснастки

Для описания взаимодействия между всеми компонентами оснастки была разработана функциональная схема (Рисунок 3.7).

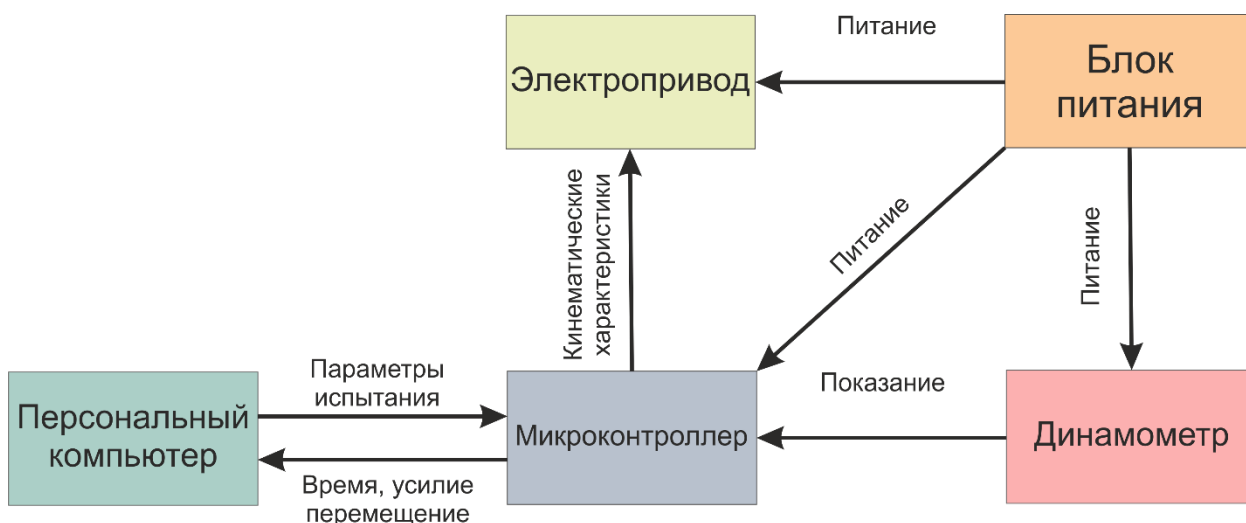


Рисунок 3.7 Функциональная схема управления устройством

Принцип работы основан на взаимодействии нескольких ключевых компонентов. Персональный компьютер отправляет параметры испытаний на микроконтроллер. Эти параметры включают в себя количество испытаний, скорость нагружения, а также максимальное перемещение или усилие на каждом этапе нагружения. Получив эти данные, микроконтроллер настраивает режим работы в зависимости от типа испытания. Микроконтроллер управляет электроприводом, задавая ему скорость и время работы для каждого этапа нагружения. В случае статической нагрузки, когда требуется поддерживать определённое усилие, микроконтроллер постоянно отслеживает показания с динамометра. Если достигнуты заданные параметры, микроконтроллер останавливает электропривод, чтобы завершить этап нагружения. Блок питания играет важную роль в этой системе, обеспечивая стабильное электропитание для всех компонентов: динамометра, электропривода и микроконтроллера. Таким образом, оснастка работает как слаженная система, где ПК задаёт параметры, микроконтроллер управляет процессом, электропривод создаёт нагрузку, динамометр считывает её, а блок питания обеспечивает энергией все компоненты.

Разработанное программное обеспечение имеет два режима использования. Первый режим – ручной. В данном режиме управление электродвигателем осуществляется по нажатию клавиш. Такой режим необходим для установки образца в оснастку и создания предварительной нагрузки на него. В этом режиме оператор может вручную управлять процессом: изменять скорость и направление осевого перемещения винта, а также отслеживать текущее значение усилия, которое измеряется динамометром. Это позволяет настроить положение образца и обеспечить необходимую начальную нагрузку перед основным испытанием. Второй режим – “испытание”. В данном режиме оснастка работает автоматически, используя заранее подготовленные параметры испытания. Микроконтроллер управляет электроприводом на основе этих параметров, а динамометр непрерывно измеряет нагрузку, передавая данные на микроконтроллер для анализа. Этот режим используется для проведения основных испытаний, где важна точность и соблюдение наперед заданных условий.

Управление оснасткой осуществляется с помощью платы Arduino Uno, которая построена на базе микроконтроллера ATmega328P. Микроконтроллер отвечает за выполнение программного кода, управление компонентами и обработку данных. (Рисунок 3.8).

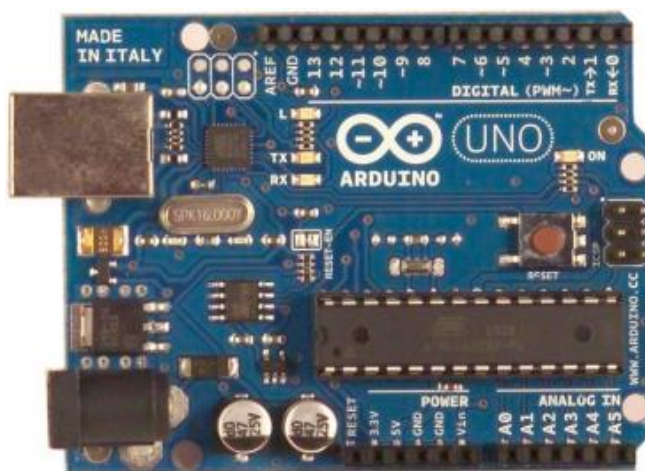


Рисунок 3.8 плата Arduino Uno

На плате Arduino Uno предусмотрено 20 портов ввода-вывода для подключения внешних устройств, а также два разъема: силовой для

автономного питания платы, и USB для программирования устройства. Технические характеристики Arduino Uno представлены в таблице 3.3.

Для взаимодействия с компьютером в Arduino UNO используется встроенный USB-to-UART конвертер, который обеспечивает двунаправленную связь через виртуальный последовательный порт. Это делает процесс программирования и отладки устройств на базе Arduino Uno простым и удобным, так как для передачи данных и загрузки программ достаточно подключить плату к компьютеру через USB-кабель.

Таблица 3.3 – Технические характеристики микроконтроллера

Параметры	Значения
Ядро	8-битный AVR
Flash-память, КБ.	32
RAM-память, КБ.	2
Пины с АЦП, шт.	6
Пины с ШИМ, шт.	6
Разрядность ШИМ, бит	8
Тактовая частота, МГц	16
Размеры, мм	69×53

Для управления шаговым двигателем необходим преобразователь управляющих сигналов, который преобразует сигналы от микроконтроллера в импульсы, управляющие двигателем. Для обеспечения точного позиционирования, защиты от перегрузок и реализации сложных режимов работы используется драйвер шагового двигателя ТВ6600 (Рисунок 3.9). Данный драйвер имеет три входных сигнала. Первый входной сигнал – «ENA», который отвечает за включение и выключение электродвигателя. Второй – «DIR», отвечающий за направление движение электродвигателя. Третий – «PUL», предназначенный для получение тактовых импульсом, что в свою очередь влияет на скорость движения. Максимальная частота ШИМ сигнала 200кГц.

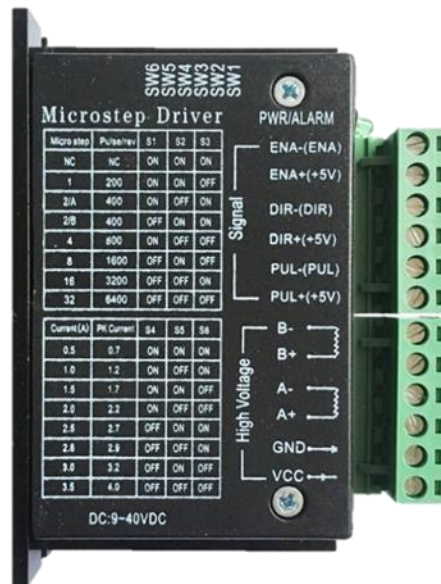


Рисунок 3.9 драйвер ТВ6600

Для корректного управления шаговым двигателем при помощи драйвера важно учитывать временные интервалы сигналов. При этом надо учитывать тот факт, что каждый импульс на входе драйвера соответствует одному шагу двигателя. Длительность одного импульса не может быть меньше 250 мкс, иначе драйвер не сможет его обработать. Минимальное время подачи импульса на вход драйвера составляет 500 мкс. Таким образом на один такт, и соответственно один шаг электродвигателя, минимальное время одного шага  $t_s$  составляет 750 мкс. За один импульс вал электродвигателя повернется на  $1.8^\circ$ , т.е. необходимо 200 импульсов на один оборот. При передаточном отношении редуктора 50, необходимое количество импульсов  $C_I$  для одного оборота выходного вала составляет 10000. Винт имеет шаг резьбы  $p$  1.75мм, другими словами, за один оборот выходного вала редуктора винт пройдет расстояние в 1.75мм в продольном направлении. Таким образом можно посчитать максимальную скорость нагружения оснастки  $U_B$ :

$$U_B = \frac{p}{t_s \cdot C_I} = \frac{1.75 \text{ мм}}{750 \text{ мкс} \cdot 10000} = 0.23 \frac{\text{мм}}{\text{с}} = 13.8 \frac{\text{мм}}{\text{мин}}$$

Теоретически, максимальное время подачи импульса – неограниченно драйвером, и задается управляющей системой. На практике при слишком большом интервале между тактами возникает неравномерность движения и

вибрации оснастки. Экспериментальным путём было установлено минимальная скорость нагружения до 0.1 мм/мин.

Для подобранных комплектующих определяется точность линейного перемещения нагрузочного винта. Как было показано ранее, один оборот происходит за 10000 тактов, шаг резьбы  $p$  составляет 1.75. Таким образом можно посчитать с какой теоретической точностью происходит нагружения образцов в оснастке:

$$\Delta l = \frac{p}{C_I} = \frac{1.75 \text{ мм}}{10000} = 1.75 \cdot 10^{-4} \text{ мм.}$$

Для измерений механических нагрузок необходим электронный динамометр. При выборе динамометра необходимо учитывать такие параметры, как максимальная нагрузка, размеры устройства и его устойчивость к перегрузкам.



Рисунок 3.10 Электронный динамометр

Для обеспечения точности и надежности измерений, а также с учетом требований к максимальным нагрузкам и компактности, был выбран динамометр DYLY-104 S-образного типа, который обладает предельной нагрузкой до 10 кН и способен выдерживать безопасную перегрузку до 150%.

Для корректной работы динамометра использовался усилитель сигнала для тензодатчика GJ-4057A.



Рисунок 3.11 Усилитель сигнала для динамометра

Он предназначен для усиления и преобразования низкоуровневого мостового сигнала тензодатчика в унифицированный аналоговый выходной сигнал и в данной работе использовался в режиме формирования напряжения в диапазоне 0–5В, что обеспечивает совместимость с измерительной и регистрирующей аппаратурой, а также повышает устойчивость системы к помехам и стабильность измерений.

### 3.5 Описание оснастки

#### 3.5.1 Композитные проставки

В процессе проектирования оснастки осуществлялся выбор материалов с целью минимизации влияния артефактов на цифровой двойник при съемке внутри РКТ. Однако, так как динамометр и нагрузочный винт являются серийными стандартными изделиями, их характеристики не подлежали изменению. Таким образом, во время сканирования образца возникает ряд проблем. Во-первых, проблематично центрировать образец внутри разработанной оснастки. Во-вторых, во время сканирования в рентгеновском компьютерном томографе от динамометра и нагрузочного винта возникают лучи рассеяния, которые попадают на исследуемый образец и искажают данные цифрового двойника.

Для уменьшения артефактов от этих компонентов были разработаны композитные проставки, которые позволяли удалять их от исследуемого образца. Это было необходимо для сохранения детализации образца и предотвращения возникновения артефактов, таких как лучи рассеяния и тени

рассеяния, которые могут негативно сказаться на точности определения его физико-механических свойств. В качестве материала изготовления был выбран АСМ 200t. Технические характеристики материала приведены в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Технические характеристики АСМ 200t.

<b>Свойства</b>	<b>АСМ 200t.</b>
Предел прочности при растяжении, Мпа	200-300
Модуль упругости при растяжении, ГПа	70-80
Предел прочности при сжатии, МПа	150-250
Модуль упругости при сжатии, ГПа	70-80
Плотность, г/см <sup>3</sup>	1.5–2.0

Композитные проставки были спроектированы с пазами под образец с креплением на динамометр. Такой вариант позволяет точную и стабильную установку образца в разработанную оснастку. Пазы позволяют фиксировать образец в нужной позиции, минимизируя ошибку, связанную, как с установкой образца, так и с проскальзыванием во время приложения внешней сжимающей нагрузки. Такой подход обеспечивает получение точных результатов при проведении испытаний, что в свою очередь минимизирует искажение в итоговом цифровом двойнике.

Таким образом композиционные проставки должны удовлетворять следующим условиям: эффективно справляться с минимизацией артефактов во время сканирования внутри компьютерного томографа, не изменять функции нагружения, а также обеспечить возможность центрирования образца внутри разработанной оснастки. Для обеспечения равномерного нагружения была спроектирована центровочная шайба (Рисунок 3.12.а). Для центрирования исследуемого образца относительно динамометра была спроектирована проставка с креплением под динамометр (Рисунок 3.12.б). Для удобства позиционирования образца в оснастке была разработана проставка с пазом под образец (Рисунок 3.12.в).

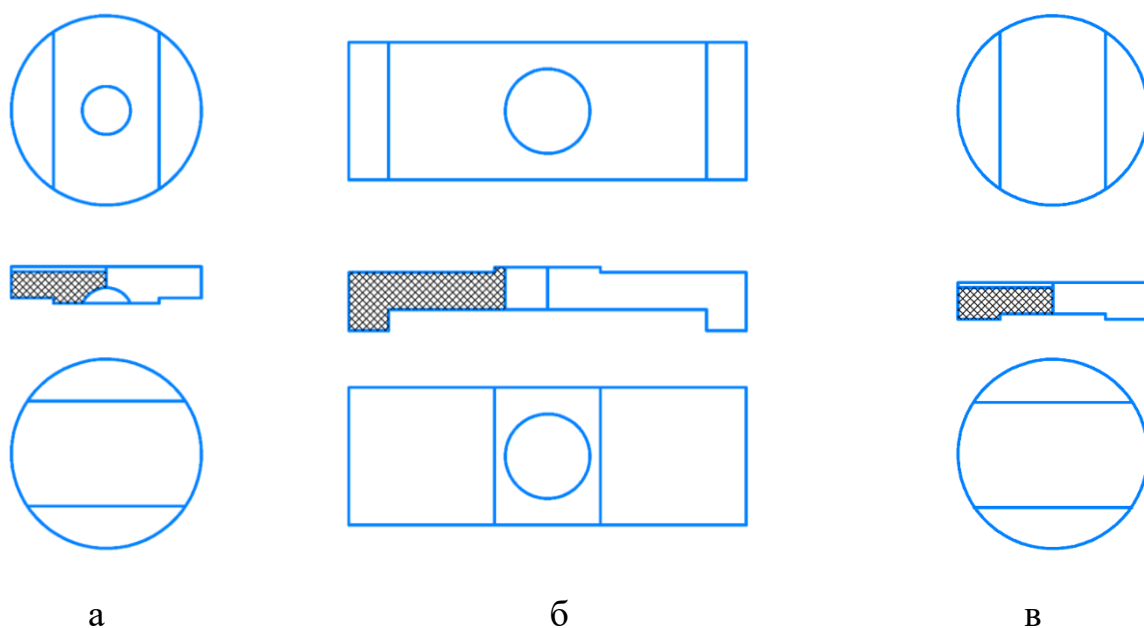


Рисунок 3.12 Вид композиционных проставок: а) центровочная шайба; б) проставка с креплением под динамометр; в) проставка с пазом под образец

Итоговый вариант разработанной оснастки совместно с выбранными комплектующими показан на рисунке 3.12.а. На рисунке 3.12.б представлен блок управления оснасткой, содержащий все необходимые компоненты для управления оснасткой.

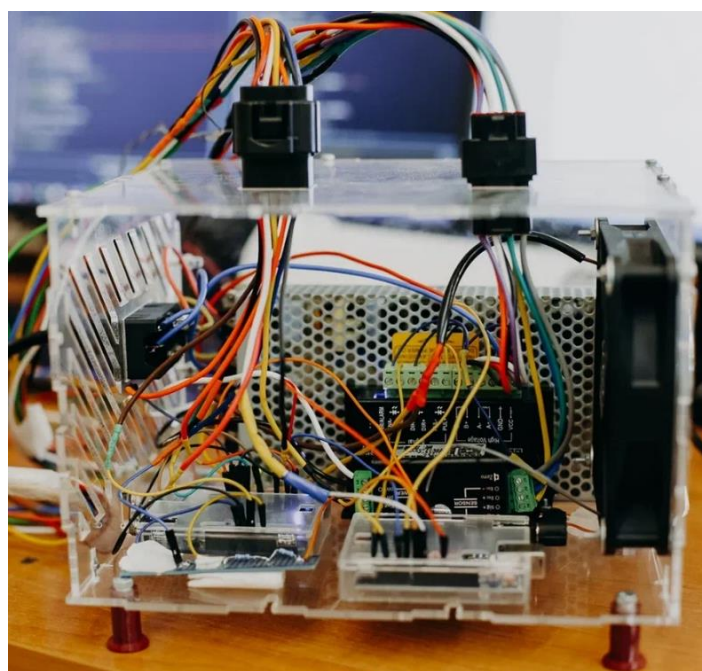
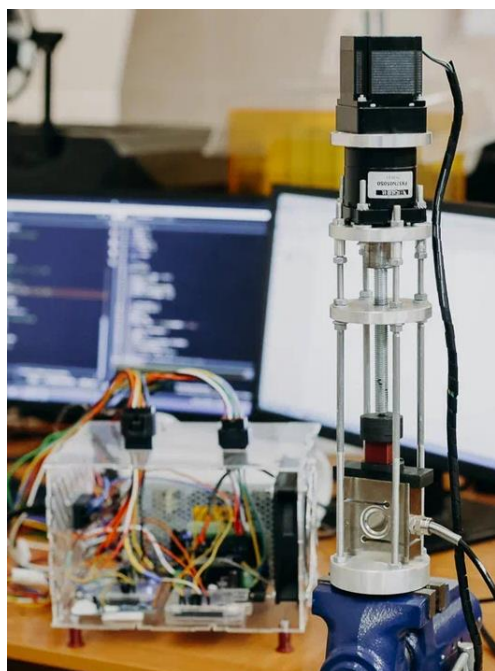


Рисунок 3.13 Разработанная оснастка а) общий вид; б) блок управления

### 3.5.2 Процесс сборки оснастки

Процесс сборки оснастки играет ключевую роль в её успешном функционировании. Сборка должна осуществляться корректно, для обеспечения надежности, точности и безопасности работы. Для обеспечения точности и правильного функционирования всей конструкции необходимо, чтобы все её части находились в правильном пространственном положении. Для этого каждый элемент выставляется с учетом уровня, что гарантирует отсутствие перекосов и отклонений от горизонтальной оси. В процессе сборки проводится выравнивание, при котором каждый компонент проверяется на наличие наклонов или деформаций.

Процесс сборки включает в себя точную последовательность установки и фиксации различных элементов, таких как крышки, направляющие шпильки, динамометры и электродвигатели, каждая из которых выполняет свою функцию.

Особое внимание уделяется правильному соединению элементов с помощью соответствующих крепежных деталей, таких как гайки, болты и муфты, что гарантирует стабильность конструкции и ее долговечность. Важно, чтобы сборка оснастки проводилась строго по заданной технологии, так как любые отклонения могут повлиять на точность работы внутри компьютерного томографа и, следовательно, на качество получаемых данных.

Целью данного процесса является создание безопасной и эффективной рабочей среды, где каждый компонент будет функционировать в своей области, обеспечивая высокий уровень надежности и точности измерений при исследовании образцов.

Элементы конструкции соединены следующим образом: в нижней крышке (Рисунок 3.14 позиция 2) имеются резьбовые отверстия (Рисунок 3.14 позиция 1), в которые вкручиваются четыре направляющих шпильки (Рисунок 3.14 позиция 4). В зависимости от длины исследуемого образца на необходимом расстоянии от нижней крышки накручиваются стопорные

гайки (Рисунок 3.14 позиция 20), на которые устанавливается силовая крышка (Рисунок 3.14 позиция 6), а затем она фиксируется ранее установленными стопорными гайками. Нагрузочный винт (Рисунок 3.14 позиция 7) устанавливается в силовую крышку и закрепляется в муфте (Рисунок 2.13 позиция 8), которая соединена с редуктором (Рисунок 3.14 позиция 12). Редуктор, в свою очередь, связан со средней крышкой (Рисунок 3.14 позиция 10) посредством болтов (Рисунок 3.14 позиция 11). На среднюю крышку с втулками (Рисунок 3.14 позиция 9) совместно с направляющими шпильками устанавливается верхняя крышка (Рисунок 3.14 позиция 13) с электродвигателем (Рисунок 3.14 позиция 14). Электродвигатель присоединяется к редуктору, и их соединение фиксируется гайками (Рисунок 3.14 позиция 20) и фиксирующими болтами (Рисунок 3.14 позиция 11). На нижнюю крышку устанавливается динамометр (Рисунок 3.14 позиция 5), на который монтируются композитные проставки (Рисунок 3.14 позиция 3) совместно с исследуемым образцом (Рисунок 3.14 позиция 21); между композитной проставкой и нагрузочным винтом располагается шарик (Рисунок 3.14 позиция 18). Электродвигатель подключается к плате управления и блоку питания, а вся сборка размещается в патроне компьютерного томографа (Рисунок 3.14 позиция 19), который оснащен программным обеспечением для обработки данных сканирования исследуемого образца (Рисунок 3.14 позиция 17). Исследуемый образец располагается между излучателем (Рисунок 3.14 позиция 15) и детектором томографа (Рисунок 3.14 позиция 16). Такая компоновка обеспечивает надежное крепление элементов и корректное функционирование системы в условиях эксперимента.

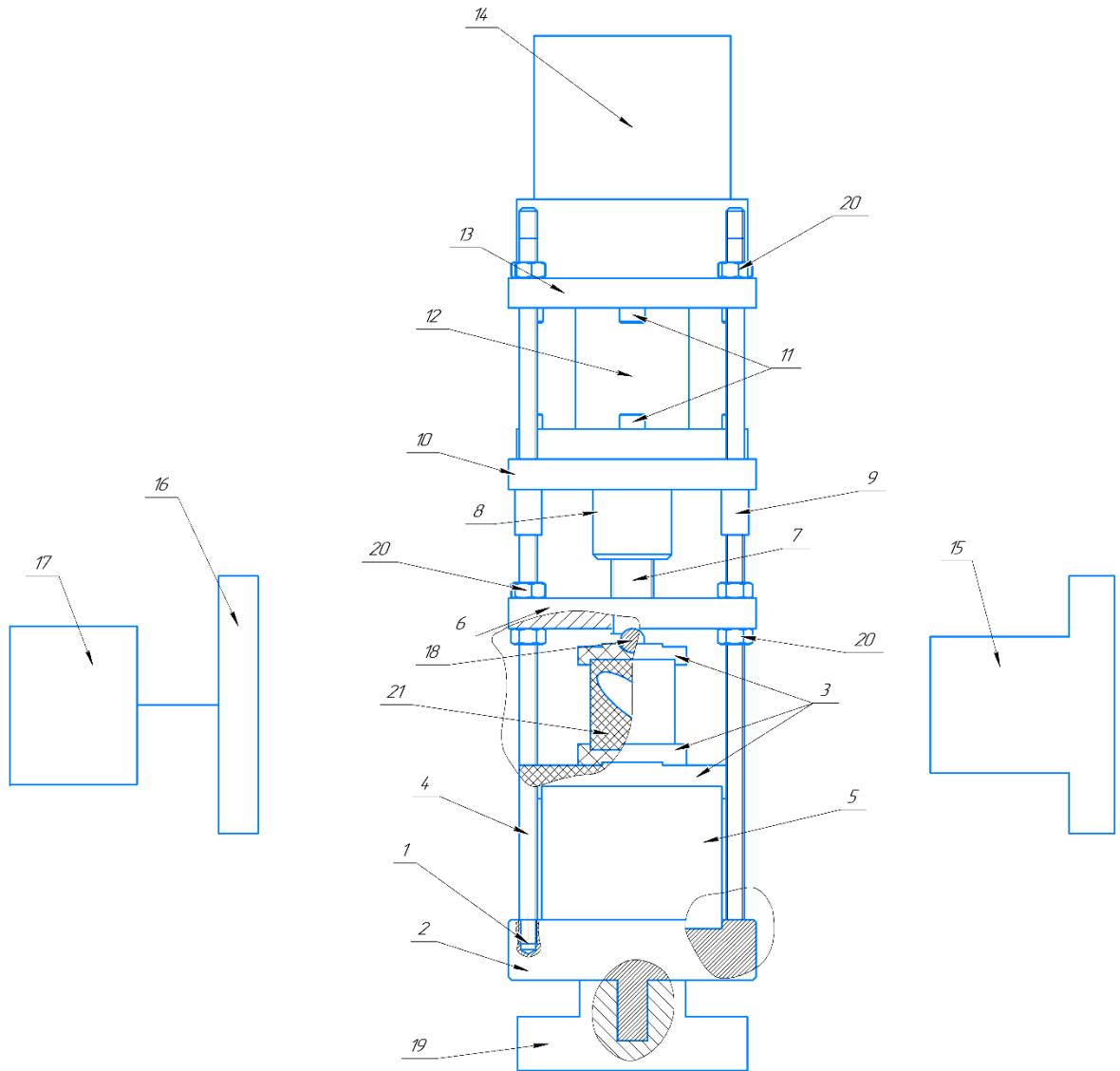


Рисунок 3.14 Схема оснастки в компьютерном томографе

Конструкция была изготовлена в строгом соответствии с предоставленной технической документацией и чертежами, а также собрана с соблюдением всех описанных выше этапов и требований. Это обеспечило высокую точность, надежность и безопасность работы оснастки в условиях эксперимента. Для полноты информации в таблице 3.5 приведены технические характеристики оснастки, которые отражают ключевые параметры.

Таблица 3.5 – Технические характеристики авторского устройства.

Техническая характеристика	Значение
Материал изготовления	Д16Т
Максимальная нагрузка, кН	10
Диапазон рабочих скоростей, мм/мин	0.1-13.8
Полный рабочий ход, мм	10
Максимальный габарит исследуемого образца (Д, Ш, В), мм	100x40x40
Максимальная длина нагрузочного винта, мм	120

### 3.6 Верификация оснастки

В качестве верификации оснастки выступает оценка точности измерения параметров при нагружении образцов, т.к. именно от корректности снятых показаний зависит качество получаемых выводов об изменении физико-механических свойств исследуемого образца. Одним из ключевых компонентов данной оснастки для считывания показаний является динамометр. Для корректного отображения показаний действующей силы, требуется тарировка динамометра.

Для тарирования динамометра использовалась универсальная испытательная машины УТС-110М-100 (Рисунок 3.15).



Рисунок 3.15 Универсальная испытательная машины УТС-110М-100

Технические характеристики данной машины приведены в таблице 3.6

Таблица 3.6 – Технические характеристики УТС-110М-100.

Параметр	Значение
Наибольшая предельная нагрузка, кН	100
Диапазон измерений нагрузки, кН	1-100
Относительная погрешность измерений нагрузки, %	1
Диапазон рабочих скоростей, мм/мин	0.003-350
Расстояние между колоннами, мм	500
Полный рабочий ход подвижной траверсы, мм	1000

При тарировании динамометра был использован линейный коэффициент для преобразования напряжения, считываемого системой управления, в прикладываемую нагрузку. Были собраны и сопоставлены данные, полученные с испытательной машины и тарированного динамометра (Рисунок 3.16).

Анализ полученных результатов показал незначительное расхождение в показаниях между испытательной машиной и тарированного динамометра. Рассчитан коэффициент детерминации для полученных диаграмм сжатия равный 0.99. Максимальное абсолютное отклонение значений составляет 2%.

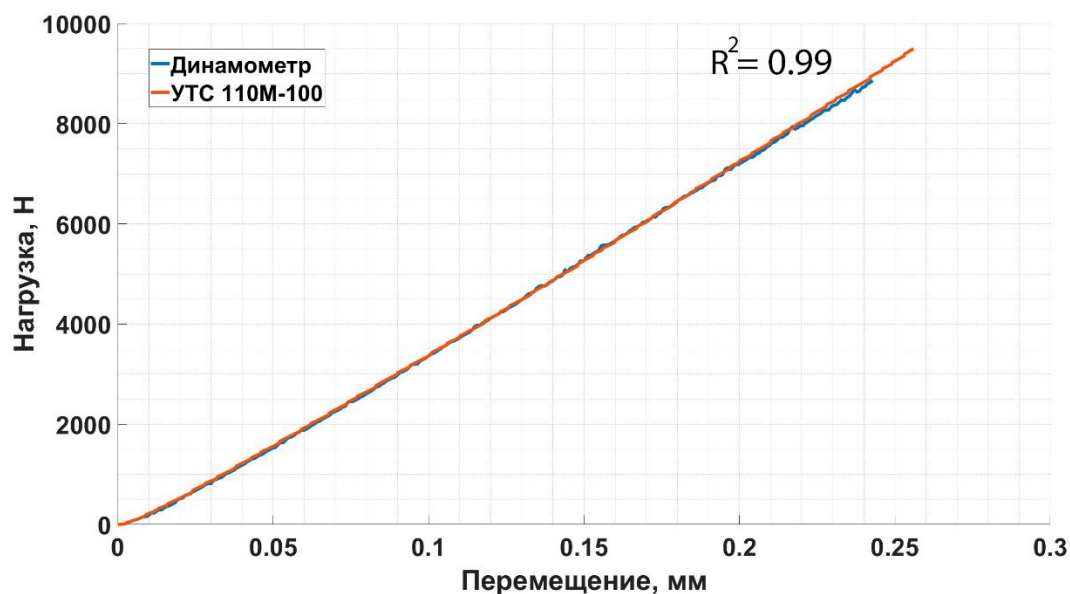


Рисунок 3.16 Тарирование динамометра

Сканирование образцов было выполнено с применением микрофокусной системы рентгеновского контроля для компьютерной томографии и 2D-инспекции Phoenix V|tome|X S240 в лаборатории рентгеновской компьютерной томографии Института геологии и

нефтегазовых технологий Казанского (Приволжского) федерального университета (Рисунок 3.17). Система оснащена двумя рентгеновскими трубками: микрофокусной с максимальным ускоряющим напряжением 240 кВ, мощностью 320 Вт и нанофокусной с максимальным ускоряющим напряжением 180 кВ, мощностью 15 Вт. Для первичной обработки данных и создания объёмной (воксельной) модели образца на базе рентгеновских снимков (проекций) использовалось программное обеспечение `datos|x reconstruction`.



Рисунок 3.17 Рентгеновский компьютерный томограф Phoenix V|tome|x S240

В качестве апробируемого образца был выбран сплошной куб, напечатанный при помощи аддитивных технологий, а именно методом FDM-печати. В качестве материала использовался PLA-пластик (Рисунок 3.18).



Рисунок 3.18 Образец из PLA-пластика

Всего было изготовлено два испытуемых образца за одну серию производства. Данный образец нагружался и сканировался 4 раза. Первое сканирование происходило без воздействия сжимающей нагрузки, последующие шаги проводились с постепенным увеличением сжимающей нагрузки. Полученные результаты сравнивались с диаграммой сжатия на универсальной испытательной машине УТС-110М-100 (Рисунок 3.19).

Для измерения деформации образца использовались данные, полученные методом компьютерной томографии. В разработанной экспериментальной оснастке томограмма выполняла роль бесконтактного экстензометра, позволяя определять деформации по изменению геометрии образца. После приложения нагрузки томографические данные обрабатывались, и на основе результатов расчёта вычислялась деформация образца на конкретном этапе нагружения, соответствующем заданному значению приложенной силы.

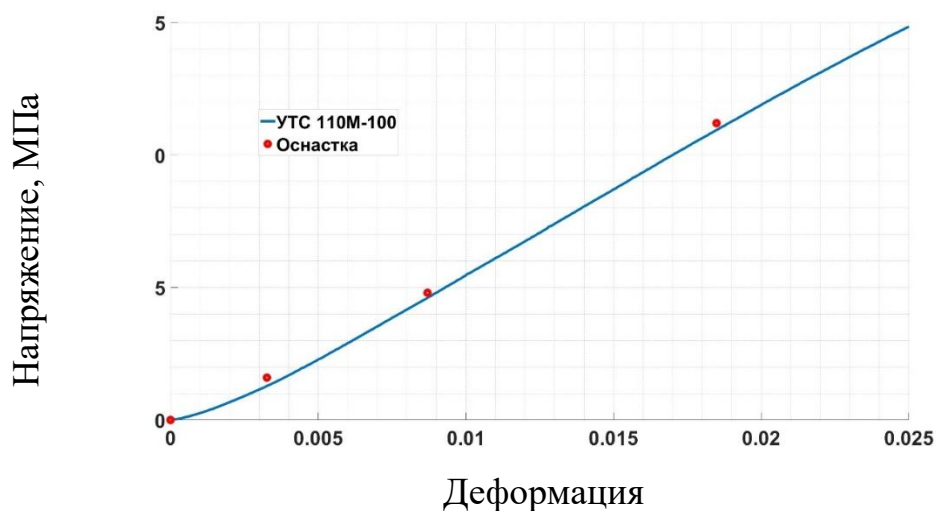


Рисунок 3.19 Проведения испытаний тестового образца

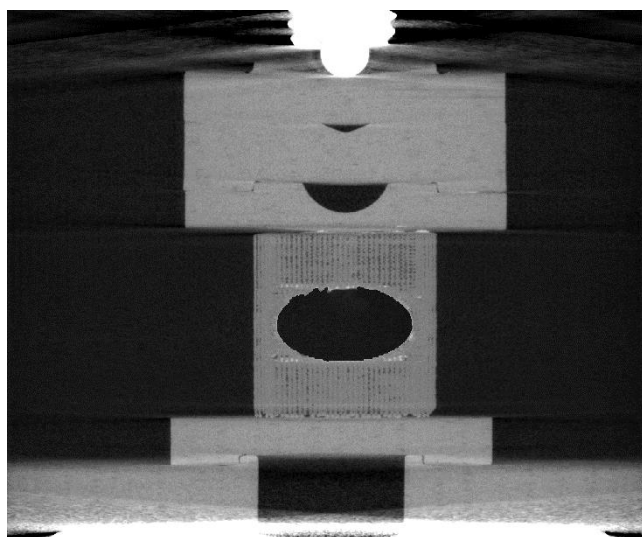
При сравнении напряжений в точках съемки с соответствующими точками на диаграмме сжатия на универсальной испытательной машине, максимальная относительная погрешность составила 3%.

Итоговый вариант разработанной оснастки совместно с протоколом испытаний позволяет проводить испытания на одноосное сжатие с использованием рентгеновского компьютерного томографа (Рисунок 3.19).

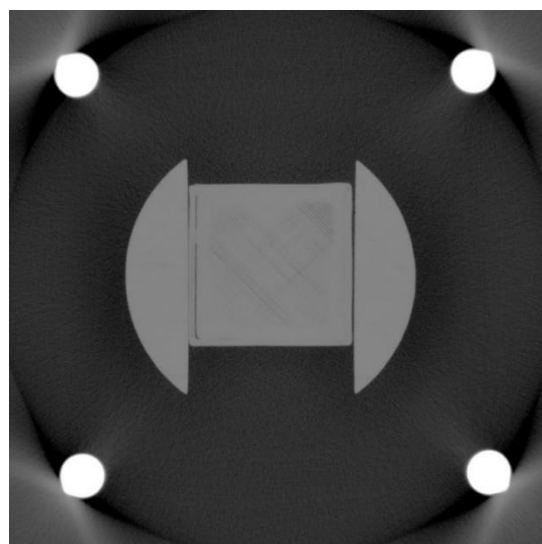


Рисунок 3.20 Оснастка внутри компьютерного томографа

В качестве испытуемого образца для верификации артефактов во время съемки был взят куб с порой. Совместно с композитными проставками визуально оценивались лучи рассеяния и тени рассеяния (Рисунок 3.21).



а



б

Рисунок 3.21 Артефакты сканирования компьютерного томографа

Как можно заметить лучи рассеяния и тени рассеяния от нагрузочного винта и динамометра не заходят в область съемки испытуемого образца.

В соответствии с требованиями ГОСТ 28840-90 «Машины для испытания материалов на растяжение, сжатие и изгиб» представленная оснастка относится к категории прессов с максимальной предельной нагрузкой 10 кН, где допустимая погрешность измерения нагрузки при прямом ходе соответствует группе 2-У, а погрешность измерения деформации образцов отнесена к группе 3-Д. При этом соотношение наибольшей и наименьшей скоростей перемещения активного захвата соответствует параметрам машин категории 5-С, что в совокупности обеспечивает полное соответствие оборудования установленным стандартам для испытательных систем данного типа.

### **3.7. Протокол испытаний**

Протокол испытаний — это ключевой документ в научных и инженерных исследованиях, обеспечивающий систематизацию и стандартизацию процесса испытаний. Он фиксирует все этапы, используемое оборудование и методики, что позволяет обеспечить прозрачность и точность данных, гарантировать повторяемость экспериментов и возможность проверки результатов, выявлять и устранять ошибки в ходе испытаний, подтверждать соответствие установленным стандартам. Таким образом, протокол служит основой для обоснования научных выводов и обеспечения качества работы.

Процесс проведения испытания можно описать следующим образом:

1. Выбор режима работы контроллера разработанной оснастки: задаются значения точек съёма данных в зависимости от перемещения образца или силового воздействия, исходя из целей исследования.
2. Установка образца в оснастку с последующим центрированием для обеспечения точности измерений.
3. Применение преднагрузки к образцу для его фиксации в оснастке, данный этап обеспечивает стабильное положение образца без воздействия внешней нагрузки.

4. Первичная съёмка образца.
5. Воздействие на образец заданной сжимающей нагрузкой.
6. Съёмка образца;
7. При наличии дополнительных точек съёма данных – возврат к пункту 6, при отсутствии – переход на следующий пункт.
8. Снятие нагрузки и извлечение образца из оснастки.

После завершения всех испытаний и съёмок получают следующие данные: диаграммы нагружения и цифровые двойники для каждого этапа нагружения. Эти данные позволяют анализировать поведения материалов при воздействии на них внешней сжимающей нагрузки.

### **Выводы по главе 3**

В данной главе предложено устройство для исследования изделий под нагрузкой с использованием РКТ. Разработанная оснастка и методика позволяют проводить исследования изменения внутренней структуры материалов под нагрузкой. В основе конструкции оснастки лежат тщательно подобранные компоненты, которые обеспечивают требуемые прочностные характеристики для проведения серии экспериментов, сочетающиеся с минимальным количеством артефактов на конечной компьютерной модели исследуемых изделий. Это открывает новые возможности для анализа физико-механических свойств современных материалов. Проведенные испытания подтвердили высокую точность измерений с погрешностью не более 3%, а также эффективность композитных проставок в минимизации артефактов при сканировании.

Данная оснастка была запатентована [9], что подтверждает её новизну и практическую значимость для исследований с использованием систем неразрушающего контроля.

## ГЛАВА 4

### МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Изготовленный образец устанавливается в разработанную оснастку, представленную в главе 3 и размещенную внутри компьютерного томографа. Перед началом эксперимента на образец воздействует небольшая сжимающая нагрузка, обеспечивающая его стабильное положение в оснастке, после чего выполняется первый цикл съемки. После съемки, на образец действует внешняя сжимающая нагрузка, величина которой задается оператором до начала эксперимента. После завершения нагружения производится следующий этап съемки, и этот процесс повторяется заданное количество раз, зависящее от целей эксперимента. В результате получается набор компьютерных томограмм, отражающих изменение структуры образца под воздействием различных уровней внешней нагрузки. Обработка полученных томограмм является ключевой задачей, которая обеспечит точность исследований структурных и физико-механических свойств. Корректность разработанных методов не только повысит точность измерения таких свойств, но и позволит понять процесс деформирования внутренней неоднородной структуры изделий, что в свою очередь является основой для совершенствования неоднородных конструкций и технологии их производства.

В данной главе рассмотрены методы для описания изменения физико-механических свойств пористых материалов. Данные методы включают описание обработки компьютерной томографии и методы получения физико-механических параметров изделий.

#### **4.1 Обработка цифрового двойника**

В рамках современного подхода к исследованию сложных пористых конструкций одной из ключевых задач является получение информации о внутренней структуре образцов. Для этого широко применяется рентгеновская компьютерная томография, которая позволяет визуализировать и анализировать изменения структуры под нагрузкой. После

проведения испытания с помощью РКТ формируется цифровой двойник исследуемого образца. Цифровой двойник представляет собой трехмерный массив данных, где каждому вокселю соответствует коэффициент рентгеновского ослабления материала. Данный коэффициент отражает оптическую плотность материала в каждой точке образца, что делает возможным проведение точного анализа его внутренней структуры.

Пусть  $\Omega \in \mathbb{R}^3$  — набор точек, полученной компьютерной модели,  $\Omega_0 \in \mathbb{R}^3$  — набор точек, принадлежащий цифровому двойнику исследуемого образца, а  $\Omega_B$  — набор точек, не принадлежащие исследуемому образцу, тогда справедливо следующее:

$$\Omega_B \cup \Omega_0 = \Omega, \text{ где } \Omega, \Omega_B, \Omega_0 \in \mathbb{R}^3;$$

$$\Omega_B \cap \Omega_0 = \emptyset, \text{ где } \Omega_B, \Omega_0 \in \mathbb{R}^3.$$

Для случая многофазной среды будет верным утверждение:

$$\Omega_1 \cup \Omega_2 \dots \cup \Omega_n = \bigcup_{i=1}^n \Omega_i = \Omega_0;$$

$$\Omega_i \cap \Omega_j = \emptyset, \quad i \neq j, \quad i, j = \overline{1, n},$$

где  $\Omega_i$  — фаза в исследуемом образце,  $n$  — количество фаз.

Каждой фазе материала соответствует свой характерный диапазон значений, получаемых при сканировании рентгеновским компьютерным томографом. Эти значения определяют коэффициент рентгеновского ослабления  $\eta$ , который напрямую связан с оптической плотностью материала. Данный коэффициент отражает способность материала ослаблять проходящее рентгеновское излучение. После сканирования, коэффициент рентгеновского ослабления известен в каждом вокселе, который характеризуется координатами в пространстве  $(x, y, z)$ , а коэффициент ослабления может быть выражен следующим образом:

$$\eta(x, y, z) = \eta \in N, \forall x, y, z \in \Omega,$$

где  $\eta$  — значение рентгеновского ослабления для вокселя,  $m$  — количество вокселей.

Таким образом, цифровой двойник является трёхмерным представлением пространства  $\Omega_0 \in \mathbb{R}^3$ , где координаты  $x, y, z$  принадлежат  $\mathbb{R}^3$ , а значения коэффициентов рентгеновского ослабления или проницаемости принимают значения из дискретного множества  $\mathbb{N}$ .

Для удобства восприятия и понимания процесса проведения эксперимента, введем последовательность действий, отражающих все ключевые этапы работы с цифровым двойником и данными, полученными в ходе рентгеновского сканирования:

1. Сканирование и создание цифрового двойника. На данном этапе проводится рентгеновское сканирование исследуемого образца, после чего создается модель сканированной области, представляемая в виде трехмерного массива данных, где каждому вокселю соответствует значение проницаемости материала. Сканирование образца происходит в несколько этапов, с разной величиной сжимающей нагрузки. Получаемые данные можно обозначить следующим образом:

$$\eta(x, y, z, t_i),$$

где  $t_i$  – шаг нагружения образца.

2. Фильтрация и проверка целостности данных. В случае если есть шумы, на полученной модели, применяется фильтрация, с последующей проверкой целостности данных, а также проверяется отсутствие артефактов.

3. Сегментация модели. На данном этапе проводится разделение цифрового двойника на области интереса, отделяя исследуемые части от остального материала. В случае разнофазного материала цифровой двойник разделяется на различные фазы, каждая из которых имеет свой коэффициент ослабления.

4. Определение реперных точек. На этом шаге определяются реперные точки, которые будут использоваться для последующего анализа деформации.

5. Сопоставление реперных точек между шагами нагружения.

6. Пересчет перемещений реперных точек в деформацию, на каждом шаге нагружения, используя результаты, полученные на шаге  $t_i$ .

7. Подсчет физико-механических параметров. На основе деформаций и перемещений реперных точек проводятся вычисления физических и механических параметров материала.

8. Анализ полученных результатов.

#### **4.1.1 Фильтрация**

После создания цифрового двойника исследуемого образца на основе данных, полученных с помощью рентгеновской компьютерной томографии, модель подвергается дополнительной обработке для устранения возможных шумов. Компьютерная томография позволяет получить трехмерное изображение внутренней структуры образца, представляющее собой массив значений, соответствующих проницаемости материала в каждой точке объема. Поскольку процесс сканирования достаточно долговременный процесс, то возможно появление артефактов и шумов. Следить за таким эффектом особенно важно при съемке материалов с неоднородной структурой, в цифровом двойнике могут появляться случайные отклонения. Эти отклонения искажают детали внешней и внутренней структуры, что в свою очередь усложняет вычисления, например, объема пористости и других параметров, критичных для анализа механических свойств образца. Поэтому, перед дальнейшим исследованием, полученную компьютерную модель важно дополнительно обработать, применяя методы сглаживания. Этот процесс устраняет мелкие случайные отклонения, сохраняя при этом основные структурные характеристики образца. В результате обработанная модель становится пригодной для анализа и позволяет получить точные и воспроизводимые результаты, минимизируя влияние шумов, которые не несут физического смысла.

Для уменьшения шума и сохранения важных структурных деталей модели применяется фильтр Гаусса. Этот фильтр обрабатывает каждый воксель цифрового двойника, суммируя его значение со значениями

соседних вокселей в пределах определённой окрестности, которая ограничена размером ядра свёртки. Чем больше вокселей участвует в вычислении нового значения вокселя, тем более гладким становится изображение. Однако чрезмерно большая окрестность может привести к искажению цифрового двойника. Одномерное ядро Гаусса зависит от смещения по оси ( $u$ ) и параметра  $\sigma$  – определяющего степень размытия, чем больше данный параметр, тем размытие больше. Таким образом одномерное ядро Гаусса, можно записать в следующей форме:

$$G(u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{u^2}{2\sigma^2}}$$

Трёхмерное ядро Гаусса получается путем умножения одномерных ядер для каждого смещения, таким образом трёхмерное ядро Гаусса можно записать следующим образом:

$$G(u, v, w) = G(u) \cdot G(v) \cdot G(w) = \frac{1}{(2\pi\sigma^2)^{\frac{3}{2}}} e^{-\frac{u^2+v^2+w^2}{2\sigma^2}},$$

где  $u, v, w$  – смещение по осям  $x, y, z$ .

Размер ядра обычно выбирается как  $2k+1$  по каждой оси, где  $k$  – радиус ядра. Таким образом при  $k$  равным единице, размер ядра будет соответствовать  $3 \times 3 \times 3$ . Увеличение данного параметра ведет к увеличению размера ядра, но это сильно не влияет на получаемый результат. Это связано с тем, что ядро Гаусса быстро убывает за пределами интервала  $\pm\sigma$  и значения за пределами этого диапазона становятся пренебрежимо малыми.

Пусть  $I(x, y, z) \in \Omega_0$  – функция интенсивности изображения, в которой содержится только полученная трёхмерная модель цифрового двойника, где  $x, y, z$  – координаты вокселей в пространстве. Функция интенсивности содержит в себе значение коэффициента рентгеновского ослабления ( $\eta$ ). Тогда формула для сглаженной модели примет вид [152]:

$$I(x, y, z) = \iiint_{\Omega_0} I(x - u, y - v, z - w) \cdot G(u, v, w) \, dudvdw.$$

При практических расчетах интеграл заменяется на дискретную сумму, так как изображение и ядро – дискретны. Таким образом, формула сглаживания примет вид:

$$I(x, y, z) = \sum_{u=-k}^k \sum_{v=-k}^k \sum_{w=-k}^k I(x-u, y-v, z-w) \cdot G(u, v, w).$$

На практике параметр  $\sigma$  выбирается в зависимости от уровня шума и сложности геометрии цифрового двойника. Чем больше шум в томограмме, тем большее значение  $\sigma$  потребуется для сглаживания, но при этом сохраняется меньше информации о цифровом двойнике.

#### 4.1.2 Сегментация

Для дальнейшего анализа и вычислений физико-механических характеристик исследуемого образца необходимо разделить данные области, соответствующие различным фазам материала. Для сегментации компьютерной модели на разные структуры используется метод ядерной оценки плотности. Суть данного метода заключается в автоматическом поиске пороговых значений, которые соответствуют разным фазам материала. Суть данного метода заключается в том, чтобы построить гладкую функцию плотности вероятности, оценивая плотность на основе выбранных данных (Рисунок 4.1):

$$f(x) = \frac{1}{nh} \sum_{i=1}^n K\left(\frac{x-x_i}{h}\right),$$

$$K(a) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{a^2}{2}},$$

где  $f(x)$  – оценка плотности в точке  $x$ ,  $n$  – количество наблюдений (точек данных),  $h$  – ширина полосы,  $x_i$  – значение данных,  $K(a)$  – Гауссовское ядро.

На основе построенной функции оценки плотности  $f(x)$  определяются пороговые значения  $T_1, T_2 \dots T_n$ . Обычно пороговые значения соответствуют минимуму или локальному максимуму на гистограмме плотности функции вероятности. На Рисунке 4.1 представлен пример разделения гистограммы по функции плотности вероятности на разные фазы.

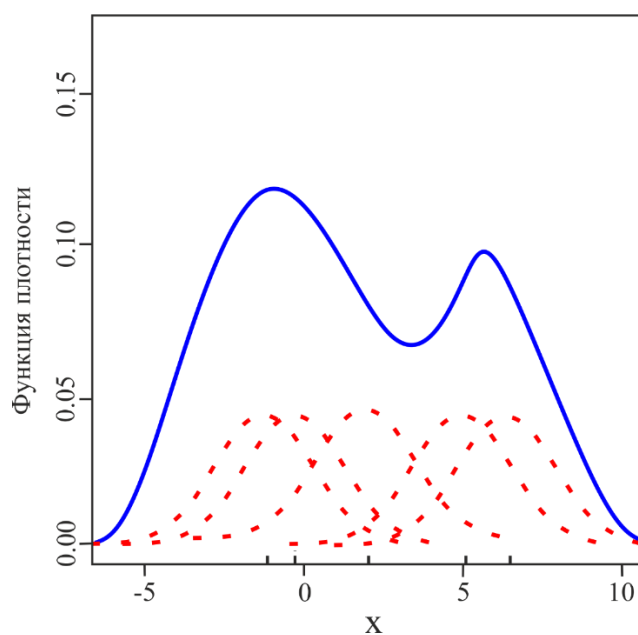


Рисунок 4.1 Гистограмма с разделением по фазам материала. Синяя линия – ядерная оценка плотности, красные линии – индивидуальные ядра

Сегментированные области нумеруются и разделяются по найденным пороговым значениям. По найденным пороговым значениям задаются маски образца, это необходимо для упрощения выделения интересующей области. Маски помогают разделить участки интереса в цифровом двойнике (зоны разрушения, дефекты). Другими словами, каждому вокселю в цифровом двойнике присваивается значение:

$$M(x, y, z) = \begin{cases} 0, & \text{если } 0 < \eta(x, y, z) \leq T_1 \\ 1, & \text{если } T_1 < \eta(x, y, z) \leq T_2 \\ \dots \\ m - 1, & \text{если } T_{n-1} < \eta(x, y, z) \leq T_m \end{cases},$$

где  $M(x, y, z)$  – матрица значений, соответствующая конкретному материалу,  $m$  – количество различных фаз материала.

Для выделения маски конкретного материала используется бинарная маска, которая выделяет только те точки, которые принадлежат конкретному  $m$ -ому материалу. Её можно записать следующим образом:

$$M_p(x, y, z) = \begin{cases} 1, & \text{если } M(x, y, z) = p_m \\ 0, & \text{если } M(x, y, z) \neq p_m \end{cases}.$$

В качестве примера сегментации, визуализируется разделение на отдельные фазы материала, полученные на основе анализа РКТ, визуализируются разделение на отдельные фазы (Рисунок 4.2).

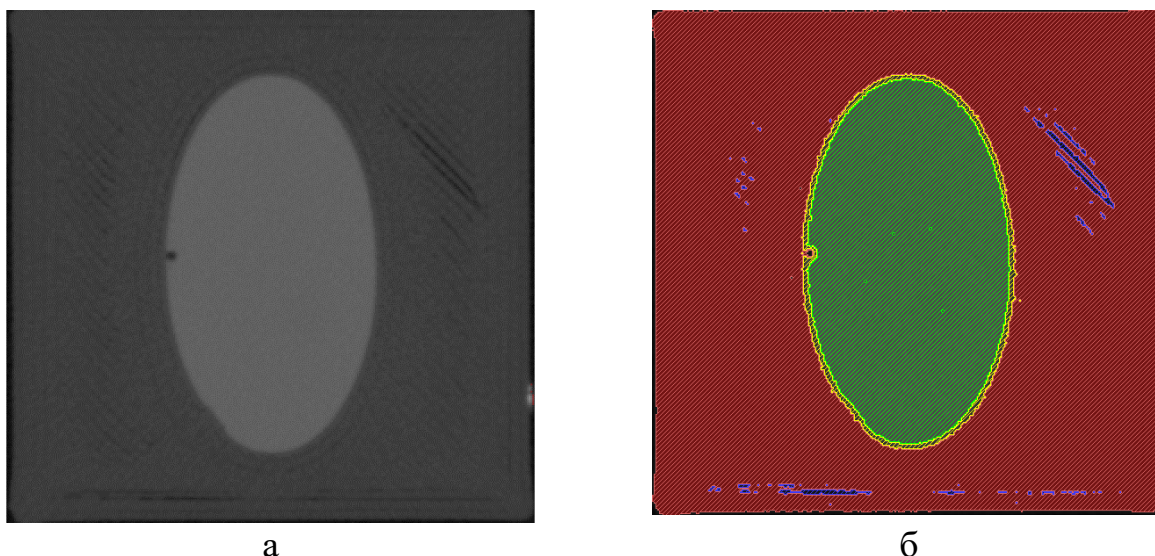


Рисунок 4.2 Компьютерная томография образца а. значения плотности б. маски фаз

На изображении визуализированы сегментированные области, каждый цвет которых соответствует определённой фазе материала, выделенной с использованием построенных масок. Эти маски позволяют точно идентифицировать зоны интереса, такие как дефекты или области разрушения, что является важным этапом в анализе цифрового двойника материала.

### 4.1.3 Реперные точки

Для использования данных компьютерной томографии в качестве бесконтактного экстензометра необходимо разработать автоматизированный метод расчёта поля перемещений по характерным точкам исследуемого образца. После определения и фильтрации искомой области  $\Omega_0$ , для анализа физико-механических свойств исследуемого образца необходимо определить ключевые точки. Такими точками могут служить как изменение формы образца (границы, углы), так и заранее подготовленные точки (контрастный материал, краска и т.п.) [112,113]. Такие точки, служащие ориентиром для количественного измерения физико-механических свойств цифрового двойника, называют реперными. Для автоматизации определения реперных

точек используется алгоритм Харриса [24], модифицированный для трехмерного случая [58, 118].

Для автоматизации определения реперных точек, вводилась функция интенсивности изображения  $I(x, y, z)$ , которая определяется в координате каждого вокселя образца. В исследовании в качестве такой функции использовалась сумма значений Хаунсфилда в области. Для определения реперных точек вводится бинарное окно  $W$  с шагом смещения  $u, v, w$ . В таком случае изменение интенсивности  $E$  в окрестности точки с координатами  $(x, y, z)$  при сдвиге на  $(u, v, w)$ , с весовой функцией окна  $w$ , определялась следующим образом:

$$E(u, v, w) = \sum_{(x,y,z) \in W} w(x, y, z) \cdot (I(x + u, y + v, z + w) - I(x, y, z))^2.$$

Разложение функции изменения интенсивности  $E$  в ряд Маклорена приводилось к следующему выражению:

$$E(u, v, w) = (u, v, w) \cdot M_A \cdot \begin{pmatrix} u \\ v \\ w \end{pmatrix},$$

где  $M_A$  – это автокорреляционная матрица.

Автокорреляционная матрица определялась согласно выражению:

$$M_A = \sum_{(x,y,z) \in W} w(x, y, z) \cdot \begin{pmatrix} I_x^2 & I_x I_y & I_x I_z \\ I_x I_y & I_y^2 & I_y I_z \\ I_x I_z & I_y I_z & I_z^2 \end{pmatrix}.$$

В этом случае, особые точки определялись как наибольшие собственные значения автокорреляционной матрицы. Поэтому соотношение собственных значений данной матрицы представляет практический интерес. Для удобства вычисления вводилась мера отклика, зависящая от коэффициента  $c$ , определенная эмпирическим способом. Величина коэффициента  $c$  находится в интервале от 0.003 до 0.006 [58], а мера отклика имеет вид:

$$R = \det M_A - c \cdot (\text{tr}(M_A))^3.$$

Для полученного распределения меры отклика  $R$  по пространству  $\Omega_0$  решалась задача локальных максимумов, решая которую определялись реперные точки для каждого этапа нагружения для каждого образца.

Алгоритм Харриса позволяет локализовать окно, в котором существует одна единственная реперная точка. Однако центр этого окна может не всегда точно совпадать с координатой реперной точки. Для уточнения координаты реперной точки используется оператор Соболя. Оператор Соболя представляет собой инструмент для вычисления градиента изменения интенсивности (или формы) в трёхмерном пространстве. Резкое изменение формы или интенсивности характеризуется наибольшим значением градиента. Таким образом, для нахождения точной координаты реперной точки в найденном окне вычисляется градиент:

$$\nabla I = \left( \frac{\partial I}{\partial x}, \frac{\partial I}{\partial y}, \frac{\partial I}{\partial z} \right).$$

Для каждой точки в окне вычисляется модуль градиента. Данное значение характеризуется изменением интенсивности:

$$|\nabla I(x, y, z)| = \sqrt{\left(\frac{\partial I}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial I}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial I}{\partial z}\right)^2}.$$

В данном случае реперной точкой является максимальная величина градиента, то есть та точка, где интенсивность изменяется наиболее резко.

При практических расчетах оператор Соболя представляет собой дискретный аналог градиента. К примеру, вычисление по оси  $x$  выглядит следующим образом:

$$\frac{\partial I}{\partial x}(x, y, z) = \sum_{u=-k}^k \sum_{v=-k}^k \sum_{w=-k}^k I(x-u, y-v, z-w) \cdot G_x(u, v, w),$$

где  $k$  – радиус перебора всех соседей, обычно ядро берется  $3 \times 3 \times 3$ , что соответствует радиусу равному 1. В свою очередь  $G_x$  – ядро дискретной производной. Иными словами, радиус перебора определяет количество элементов, охватываемых свёрткой в каждом направлении от центральной

точки, то есть характеризует размер окрестности, используемой при вычислении дискретного градиента.

Для вычисления ядра  $G_x$ ,  $G_y$ ,  $G_z$ , используется метод с учетом диагональных разность 1-го порядка. Конечный вид ядер, записанных по слоям, выглядит следующим образом:

$$G_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} -2 & 0 & 2 \\ -4 & 0 & 4 \\ -2 & 0 & 2 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$G_y = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 2 & 4 & 2 \\ 0 & 0 & 0 \\ -2 & -4 & -2 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix},$$

$$G_z = \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ -2 & -4 & -2 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 2 & 4 & 2 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix}.$$

При воздействии на образец, а именно на область точек  $\Omega_0$ , сжимающей нагрузкой, отслеживается изменение формы образца во времени. Это изменение описывается зависимостью  $\Omega_0(t)$ , где  $t$  – дискретные моменты времени, соответствующие шагам нагружения, то есть  $t \in \mathbb{Z}$ . Каждый шаг нагружения соответствует определенному этапу приложения внешней нагрузки, что позволяет отслеживать состояния образца в динамике.

На каждом шаге нагружения  $t_i$  детерминируются реперные точки  $A_i \in \Omega_0(t_i)$ , где  $i$  – номер съемки, соответствующий моменту времени равный шагу нагружения. Для сопоставления реперных точек между различными временными интервалами используется мера бутылочного горлышка. Мера бутылочного горлышка определяется как минимальное расстояние, необходимое для преобразования одного набора точек в другой, с учетом возможных перестановок и смещений, которая записывается следующим образом:

$$R(A_i, \Omega_0) = \min_{\forall A_j \in \Omega_0(t)} \|\vec{A}_0 - \vec{A}_j\|, \forall \vec{A}_j \in \Omega_0(t_j), j = \overline{1, n},$$

где  $n$  – количество шагов нагружения,  $A_0$  – набор векторных точек, соответствующие состоянию образца без внешнего силового воздействия.

### 3.2 Физико-механические характеристики

Для анализа физико-механических характеристик материалов требуется комплексный подход к изменению структуры исследуемого образца. Благодаря сегментации цифрового двойника можно рассматривать распределение разных фаз материала внутри исследуемой области. Такой подход позволяет оценивать изменения параметров пористости, объема, перемещений и деформаций.

Набор цифровых двойников, представленные в виде скалярного поля в пространстве  $\mathbb{R}^3$ , были преобразованы в набор реперных точек из пространства  $\mathbb{R}^3$  с дискретным шагом  $t \in \mathbb{Z}$ . На основе меры бутылочного горлышка для каждой точки восстанавливалась траектория на основе парного сравнения соседних шагов нагружения.

Для интерполяции полученного поля перемещений с внешней грани образца во внутренние точки используется полином Лагранжа  $F(\xi, \eta, \zeta)$  определенная в локальной системе координат, находящаяся в центре 8-ми узлового элемента в диапазоне от -1 до 1. Полином Лагранжа записывается следующим образом:

$$F_i(\xi, \eta, \zeta) = \frac{1}{8}(1 + \xi \cdot \xi_i)(1 + \eta \cdot \eta_i)(1 + \zeta \cdot \zeta_i).$$

Полином Лагранжа в глобальной системе координат  $F(\xi, \eta, \zeta)$  должен удовлетворять условию интерполяции:

$$F_i(x_j, y_j, z_j) = \begin{cases} 1, & \text{если } i = j; \\ 0, & \text{если } i \neq j. \end{cases}$$

Условие интерполяции формулируется в глобальной системе координат и сохраняется при переходе в локальную систему координат посредством изопараметрического преобразования.

Запишем переход для перехода в глобальную систему координат для координаты  $x$ , для остальных записывается аналогично:

$$x = \sum_{i=1}^8 F_i(\xi, \eta, \zeta) \cdot x_i.$$

Для координат реперных точек  $A(x,y,z)$  координаты записываются с помощью полинома Лагранжа следующим образом:

$$\vec{A}(x, y, z, t) = [F]\{\vec{A}\}.$$

Вектор перемещений реперных точек определялся как разница между деформированным и недеформированным состояниями.

$$\vec{u}_i(x, y, z, t) = \{\vec{A}_d\} - \{\vec{A}_0\},$$

где  $\vec{A}_d$  – координаты точек деформированного состояния,  $\vec{A}_0$  – координаты реперных точек в недеформированном состоянии.

Поля перемещений  $\vec{u}(x, y, z, t)$  интерполируются с помощью полинома Лагранжа и перемещений с реперных точек  $\vec{u}_i$ , и записывается следующим образом:

$$\vec{u}(x, y, z, t) = \sum_{i=1}^8 F_i(x, y, z) \cdot \vec{u}_i.$$

Данное выражение можно записать в матричном виде:

$$\vec{u}(x, y, z, t) = [F]\{\vec{u}_i\}.$$

Для вычисления деформаций используется матрица градиентов деформаций  $[B]$ , которая связывает перемещения с деформациями. Поле деформации можно выразить через перемещение следующим образом:

$$\vec{\epsilon}(x, y, z, t) = [B]\{\vec{u}\}.$$

Матрица  $[B]$  формируется из производных полинома Лагранжа и записывается следующим образом:

$$[B] = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial x} & 0 & 0 & \frac{\partial F_2}{\partial x} & 0 & 0 & \dots & \frac{\partial F_8}{\partial x} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial F_1}{\partial y} & 0 & 0 & \frac{\partial F_2}{\partial y} & 0 & \dots & 0 & \frac{\partial F_8}{\partial y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial F_1}{\partial z} & 0 & 0 & \frac{\partial F_2}{\partial z} & \dots & 0 & 0 & \frac{\partial F_8}{\partial z} \\ \frac{\partial F_1}{\partial y} & \frac{\partial F_1}{\partial x} & 0 & \frac{\partial F_2}{\partial y} & \frac{\partial F_2}{\partial x} & 0 & \dots & \frac{\partial F_8}{\partial y} & \frac{\partial F_8}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial F_1}{\partial z} & \frac{\partial F_1}{\partial y} & 0 & \frac{\partial F_2}{\partial z} & \frac{\partial F_2}{\partial y} & \dots & 0 & \frac{\partial F_8}{\partial z} & \frac{\partial F_8}{\partial y} \\ \frac{\partial F_1}{\partial z} & 0 & \frac{\partial F_1}{\partial x} & \frac{\partial F_2}{\partial z} & 0 & \frac{\partial F_2}{\partial x} & \dots & \frac{\partial F_8}{\partial z} & 0 & \frac{\partial F_8}{\partial x} \end{bmatrix}.$$

Нахождение производных полинома Лагранжа в глобальных координатах  $x$ ,  $y$ ,  $z$  осуществляется через производные в локальных координатах с использованием матрицы Якоби  $J$ :

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial F_i}{\partial x} \\ \frac{\partial F_i}{\partial y} \\ \frac{\partial F_i}{\partial z} \end{bmatrix} = J^{-1} \begin{bmatrix} \frac{\partial F_i}{\partial \xi} \\ \frac{\partial F_i}{\partial \eta} \\ \frac{\partial F_i}{\partial \zeta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial \xi} & \frac{\partial y}{\partial \xi} & \frac{\partial z}{\partial \xi} \\ \frac{\partial x}{\partial \eta} & \frac{\partial y}{\partial \eta} & \frac{\partial z}{\partial \eta} \\ \frac{\partial x}{\partial \zeta} & \frac{\partial y}{\partial \zeta} & \frac{\partial z}{\partial \zeta} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \frac{\partial F_i}{\partial \xi} \\ \frac{\partial F_i}{\partial \eta} \\ \frac{\partial F_i}{\partial \zeta} \end{bmatrix}.$$

Для оценки структурных изменений в образце определяется объем каждой фазы. Для расчета объема конкретной фазы материала записывается сумма всех элементов  $p$ -ой маски и умножить на размер вокселя  $V_{vox}$  томограммы. Таким образом объем рассчитывается следующим образом:

$$V^p = V_{vox} \cdot \sum_{i,j} M_p(i,j).$$

Объемная деформация  $\theta$  определяется как изменение физического объема при нагружении по формуле:

$$\theta_i^p = \frac{V_i^p - V_0^p}{V_0^p},$$

где  $i$  – индекс, отвечающий за шаг нагружения, индекс 0 обозначает начальное и ненагруженное состояние образца,  $p$  – индекс определяющий номер соответствующего физического объема.

Для определения пористости использовался объем физического объема в актуальном состоянии. При наличии нагрузки использовался объем деформированного состояния образца, при недеформированном состоянии нагрузка отсутствовала. Пористость определялась прямым методом по формуле:

$$\phi_i = \frac{\sum_{p=0}^{n-1} V_i^p - V_i^j}{\sum_{p=0}^{n-1} V_i^p},$$

где индекс  $p$  определяет номер физического объема,  $i$  – шаг нагружения,  $j$  – индекс, отвечающий за фазу материала, которые являются порами или пустотами в  $i$ -ый шаг времени.

### 4.3 Метрологическое обеспечение

Представленные методы количественной оценки структурных параметров должны обеспечивать высокую точность и воспроизводимость результатов. Одним из ключевых параметров для отслеживания является пористость материала, которая напрямую связана с его физико-механическими свойствами. Ошибка в определении пористости может возникать из-за неточной съемки или ошибок, возникающих при обработке данных эксперимента. При обработке данных погрешность измерения объема пор связана с ошибками в определении конкретных вокселей, принадлежащих к фазе. Таким образом, можно оценить ошибку следующим образом:

$$\Delta\phi_i = |\phi_i^* - \phi_i| \leq bV_{vox},$$

где  $\Delta\phi_i$  – ошибка определения объема фазы, звездочкой отмечена точная величина объема фазы, без звездочки – подсчитанная,  $b$  – количество ошибочно определенных вокселей,  $V_{vox}$  – объем вокселя

Выражение показывает линейную зависимость от количества ошибочно сегментированных вокселей. При определении объемной деформации необходимо учитывать, что погрешность в определении данного параметра может накапливаться на каждом следующем шаге нагружения. Чтобы минимизировать эту погрешность, объемная деформация всегда рассчитывается относительно начального (ненагруженного) состояния, а не между соседними шагами. Таким образом, формула для оценки ошибки объемной деформации может быть записана в следующем виде:

$$\Delta\theta_i = \frac{(V_i + \Delta V_i) - (V_0 + \Delta V_0)}{(V_0 + \Delta V_0)} = \frac{(V_i + \Delta V_i)}{(V_0 + \Delta V_0)} - 1,$$

где  $V_0$  – измеренный объем тела на первом шаге, без нагрузки,  $\Delta V_0$  – ошибка измерения объема на первом шаге нагружения,  $V_i$  – измеренный объем тела на последующих шагах, с внешней сжимающей нагрузкой,  $\Delta V_i$  – ошибка измерения объема тела на последующих шагах, с внешней сжимающей нагрузкой.

Разложим данное выражение в ряд Тейлора по малым величинам  $\Delta V_i$  и  $\Delta V_0$  в окрестности нуля:

$$\Delta\theta_i \approx \frac{V_i}{V_0} + \frac{\Delta V_i}{V_0} - \frac{V_i \Delta V_0}{V_0^2} - 1.$$

Данное выражение содержит истинную объемную деформацию и вклад ошибки измерения фазы на  $i$ -ом шаге. Из выражения видно, что ошибка объемной деформации также линейна от ошибок вычисления объемов, а значит она линейна от количества ошибочно определенных вокселей.

Вклад ошибки объемной деформации для реальных данных достаточно сложно оценить. С этой целью предлагается оценивать массу материала цифрового двойника на каждом шаге нагружения.

При прохождении рентгеновского луча через слой вещества его изначальная интенсивность  $I_0$  уменьшается за счет поглощения, рассеяния и, в меньшей степени, отражения, достигая определенного значения интенсивности  $I$  (Рисунок 4.3).

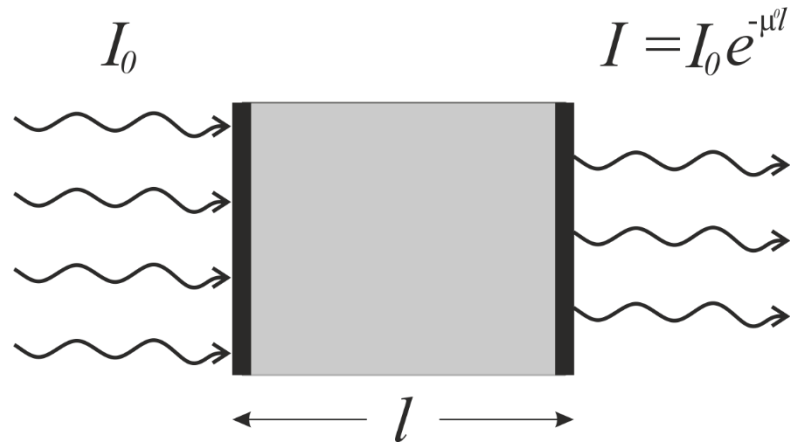


Рисунок 4.3 Изменение интенсивности пучка рентгеновских лучей

Изменение интенсивности пучка рентгеновских лучей при прохождении через вещество описывается следующим образом. Рентгеновские лучи поглощаются в той или иной степени всеми веществами, через которые они проходят. Доля энергии лучей, поглощенных в веществе, зависит от толщины поглощающего слоя, природы вещества (его атомного состава и плотности) и длины волны рентгеновских лучей. Уменьшение интенсивности луча излучения, проходящего через материал с определенной толщиной  $l$ , можно записать следующим образом:

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu^0 \cdot l},$$

где  $\mu^0$  — линейный коэффициент ослабления. Его величина зависит от атомного состава поглощающего вещества (атомного номера элементов), длины волны (энергии) рентгеновского излучения и локальной плотности материала  $\rho$ . Чем выше плотность материала и чем тяжелее элементы в его составе, тем больше коэффициент ослабления, что приводит к более сильному уменьшению интенсивности рентгеновского луча.

Ряд исследований свидетельствует о том, что линейный коэффициент ослабления  $\mu$  зависит от плотности материала по линейному закону [51,70,99]. То есть, при условии неизменного химического состава и структуры материала, любое изменение плотности приводит к пропорциональному изменению  $\mu^0$ . Это означает, что при нормировке результатов измерений на недеформированный образец, оптическая плотность, как функция от  $\mu$ , будет сохранять постоянное значение. Таким

образом, плотность материала, выраженная в терминах оптической плотности, эквивалентна обычной плотности и может рассматриваться как константа для данного материала. Тогда, для каждого шага нагружения массу образца можно оценить и сравнить с первоначальным значением. Масса образца может быть вычислена по следующей формуле:

$$m_i^p = V_{vox} \cdot \sum_{H_i^p \in M_p} H_i^p,$$

где  $m_i^p$  – масса образца на  $i$ -ом шаге нагружения для  $p$ -го фазы материала,  $H_i^p$  – значение нормированной проницаемости вокселя.

Нормированное значение проницаемости вычисляется как значение плотности в фазе материала, на плотность материала, который не подвержен деформированию. Такой подход позволяет устранить влияние изменения настроек съемки РКТ. Таким образом для оценки погрешности объемной деформации можно использовать сохранение массы. Если масса образца на каждом шаге нагружения  $m_i^p$  близка к начальной массе  $m_0^p$ , то погрешность подсчета объемной деформации можно считать минимальным. Относительное отклонение массы можно записать следующим образом:

$$\delta m_i^p = \frac{m_i^p - m_0^p}{m_0^p}.$$

Если значение  $\delta m$  мало, это свидетельствует о сохранении массы образца и подтверждает, что измерения объемной деформации выполнены с высокой точностью. Легко видеть, относительное отклонение массы является оценкой сверху для относительных погрешностей подсчета объема ввиду того, что по сути является взвешенным подсчетом того объема. А значит значение  $\delta m$  может быть использовано как величина ошибки на подсчитанные объемные характеристики фаз образца.

С помощью компьютерной томографии создается цифровой двойник, где каждому вокселю соответствует значение проницаемости. Если параметры сканирования остаются неизменными, для анализа достаточно

рассчитать относительное отклонение массы на основе абсолютных значений проницаемости вокселей. В случае изменения параметров сканирования между испытаниями возникает расхождение абсолютных значений проницаемости. Чтобы устранить влияние изменений в настройках томографа при каждом сканировании, результаты нормируются на недеформируемый материал. Это позволяет устранить возможные отклонения, связанные с разными условиями съемки.

#### **Выводы по главе 4**

В данной главе описываются все используемые методы физико-механического анализа и интерпретации свойств цифрового двойника, получаемого при помощи совокупной работы компьютерного томографа и разработанной оснастки. Описаны этапы работы с цифровым двойником, а именно: предобработка томографии, сегментация для выделения фаз материала, определение и отслеживание реперных точек, а также ряд формул для оценки физико-механических свойств исследуемого изделия. Представленный метод анализа позволяет получать комплексную оценку изменения физико-механических свойств исследуемой структуры. На основе данных методов были разработаны программные комплексы для обработки экспериментальных данных и получены свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

### **ГЛАВА 5**

#### **ПРИМЕР ИСПОЛЬЗОВАНИЯ: ФИЗИЧЕСКИЙ ОБЪЕМ**

В главе 5 проведена серия испытаний для проверки методики и определения физико-механических свойств пористых образцов с разным углом эллиптичности внутренней закрытой поры, изготовленных из PLA при помощи FDM технологии.

##### **5.1 Общее описание**

В данной главе исследуется изменение внутренней структуры и физико-механических свойств физических объемов под действием внешней

одноосной сжимающей нагрузки при помощи разработанной оснастки, описанной в главе 2, и методов, описанных в главе 3. В качестве исследуемых образцов был выбран куб с закрытой эллипсоидальной порой. В рамках исследования было изготовлено 7 типов физических объёмов с одинаковой пористостью, отличающихся направлением эллиптичности поры. Также был изготовлен сплошной образец. Каждый образец характеризовался следующими параметрами: эллиптичностью, относительным размером и направлением поры.

Образцы изготавливались серийно при помощи FDM технологии. В каждой серии производилось 8 образцов – 7 с различными геометрическими характеристиками и один контрольный – сплошной (Рисунок.5.1).



Рисунок.5.1 Серия образцов, изготовленная методом послойного наплавления

Для каждого типа образцов проводились три вида испытаний. Первое испытание на одноосное сжатие на испытательной машине. С её помощью получали диаграмму сжатия образца, по которой определялось значение верхнего и нижнего предела текучести, модуля упругости и угла наклона линии текучести. Полученные параметры для пористых образцов нормировались относительно параметров сплошного образца. Второе испытание на одноосное сжатие в разработанной оснастке совместно с РКТ. В данном виде эксперимента проводилась оценка межслойной пористости, макропористости и общей пористости образца. Третье испытание

заключается в комбинированном использовании универсальной испытательной машины и компьютерного томографа, при которых образец нагружался одноосным сжатием до появления пластических деформаций, после чего нагрузка снималась и проводилась РКТ-съемка, в ходе которой определялись межслойная, макро- и общая пористость предварительно нагруженного образца.

Для производства образцов использовался FDM 3D принтер QIDI X-Plus II. Толщина слоя печати 0.2 мм, диаметр сопла 0.4 мм, скорость печати 30 мм/мин. Для печати использовался PLA пластик, со следующими характеристиками: прочность при растяжении вдоль слоев 34.8 МПа, модуль упругости при растяжении вдоль слоев 1.32 ГПа, коэффициент удлинения: 30%, прочность на сжатие 77.4 МПа, модуль упругости на сжатие 2.96 ГПа.

## 5.2. Описание исследуемых образцов

В качестве образцов был выбран куб с закрытой эллипсоидальной порой (Рисунок.5.2). Длина ребра кубического образца( $h$ ) равна 20 мм.

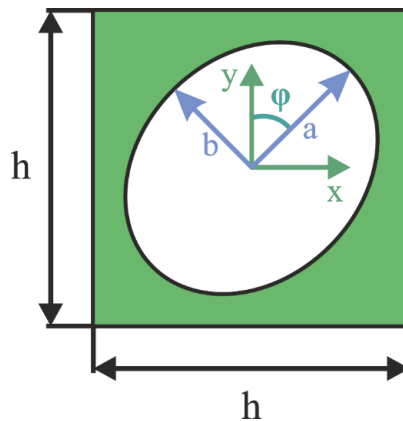


Рисунок.5.2 Структура образца и параметры пористой ячейки

Геометрия поры описывалась тремя безразмерными параметрами:  $\lambda$ ,  $\beta$  и  $\varphi$ . Параметр  $\lambda$  характеризовал отношение наименьшей полуоси  $b$  к наибольшей  $a$ . Параметр  $\beta$  характеризовал относительный размер поры – отношение удвоенной наибольшей полуоси  $2a$  к ребру куба  $h$ . Направление поры описывал параметр  $\varphi$  – угол между продольной осью образца и

наибольшей полуосью  $a$ . Третья полуось принята равной наибольшей полуоси  $a$ .

В данном главе параметр  $\lambda$  равен 0.54,  $\beta$  равен 0.73, а пористость образцов составляет 11.3%. В таблице приведены шифры образцов и угол поворота (Таблица 5.1).

Таблица 5.1 Шифры образцов

Шифр образца	EP0	EP15	EP30	EP45	EP60	EP75	EP90	S
$\varphi, ^\circ$	0	15	30	45	60	75	90	–

### 5.3 Универсальная испытательная машина

В качестве получаемых результатов, для последующей обработки по результатам эксперимента на универсальной испытательной машине, выступает диаграмма сжатия образца (Рисунок.5.3).

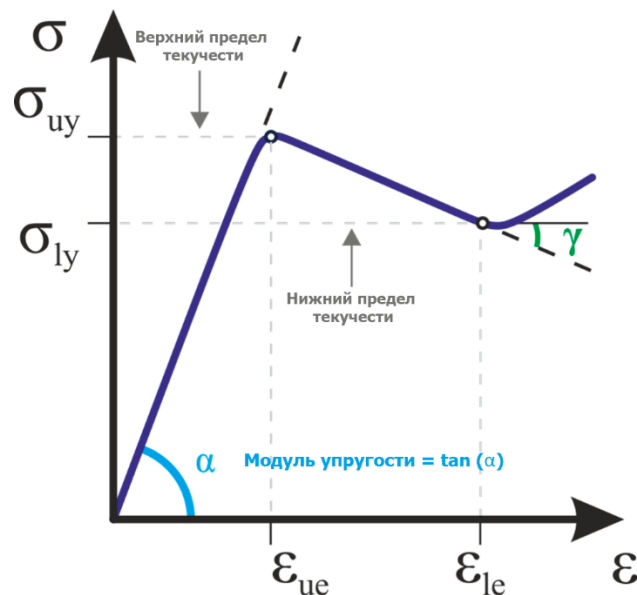


Рисунок.5.3 Схематичная диаграмма сжатия

Приведенная диаграмма является характерной для данных образцов. В качестве определяемых параметров по диаграмме выступают: тангенс угла наклона кривой на линейном участке (модуль упругости), верхний предел текучести  $\sigma_{уу}$ , нижний предел текучести  $\sigma_{лу}$  и угол линии текучести  $\gamma$ . Определяемые параметры нормировались относительно параметров

сплошного образца. Такой подход позволяет гарантировать неизменность получаемых параметров, который может зависеть от производителя материала и параметров печати.

#### 5.4 Испытания при помощи компьютерного томографа

Испытание при помощи РКТ проводилось в несколько этапов. Первый этап – съемка образцов без приложения внешней сжимающей нагрузки (точка А на Рисунок.5.4). Последующие этапы проводились с постепенным увеличением сжимающей нагрузки на линейном участке (точки В, С на Рисунок.5.4). Последний шаг нагружения сканировался в зоне пластических деформаций (точка D на Рисунок.5.4).

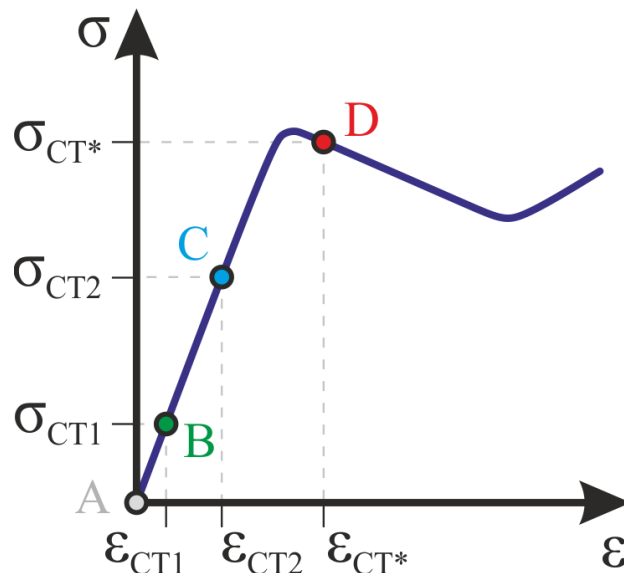


Рисунок.5.4 Диаграмма сжатия образца

После проведения натуральных испытаний с использованием РКТ определяются напряжения  $\sigma_{СТ}$  и деформации  $\epsilon_{СТ}$  на каждом шаге нагружения. Нагружение до зоны пластических деформаций происходило при помощи универсальной испытательной машины, в этом случае деформация  $\epsilon_{СТ*}$  и напряжение  $\sigma_{СТ*}$  помечаются знаком \*.

#### 5.5. Численно-аналитическая оценка

При использовании формулы смеси для быстрой оценки эффективного модуля упругости пористого образца  $E_{eff}$  его значение выражается через

модуль упругости сплошного материала  $E_M$ , долю содержания твёрдой фазы  $\rho_d$ , и модуль упругости воздуха, заполняющего поры  $E_S$ :

$$E_{eff} = E_M \cdot \rho_d + E_S(1 - \rho_d).$$

В данном случае принимаем во внимание, следующее  $E_M \gg E_S$ , формула примет следующий вид:

$$E_{eff} = E_M \cdot \rho_d.$$

В такой постановке, механические свойства остаются постоянными при повороте эллипсоидальной поры внутри образца, ввиду игнорирования учета формы поры. В связи с этим для оценки предлагается рассчитывать модуль упругости в критическом сечении образца. То есть в том сечении, где образец имеет минимальное количество материала. При этом предполагается, что деформации в критическом сечении и в этом же сечении сплошного образца – совпадают.

Используя закон Гука, получим следующее выражение для отношения модулей упругости:

$$\frac{E_{eff}(\varphi)}{E_M} = \frac{A - A(\varphi)}{A} = 1 - \frac{A(\varphi)}{A} = 1 - \rho_d(\varphi)_{/y=0},$$

где  $A$  – площадь поперечного сечения сплошного образца,  $A(\varphi)$  – площадь эллипса в критическом сечении, которая принимала следующий вид:

$$A(\varphi) = \frac{a_1 + a_4 \cos(2\varphi)}{a_2(\sin(\varphi)^2 + a_3 \cos(\varphi)^2)^2},$$

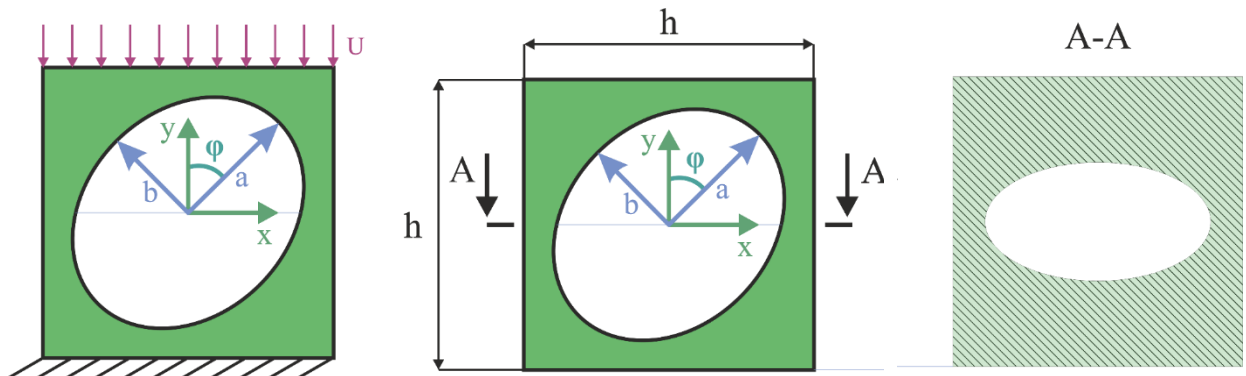
где  $a_i$  – коэффициенты зависящие от геометрии поры,  $i = \overline{1,4}$ .

Таким образом итоговое соотношение для оценки эффективного модуля упругости в критическом сечении выразалось следующим образом:

$$\frac{E_{eff}(\varphi)}{E_M} = 1 - \frac{a_1 + a_4 \cos(2\varphi)}{a_2 (\sin(\varphi)^2 + a_3 \cos(\varphi)^2)^2 \cdot A} \quad (1)$$

Для численной оценки полученных результатов проводится расчет в программном комплексе Ansys APDL. Для расчета использовался гексагональный 20-ти узловой конечный элемент (Solid186). На верхней грани задавались кинематические граничные условия, на нижней – заделка, остальные грани свободные (Рисунок.5.5.а).

Расчеты проводились с интервалом поворота поры в 5 градусов. Для получения модуля упругости использовался закон Гука. Для каждого расчетного случая с верхней грани были определены среднее главное напряжение и деформация в направлении приложения кинематической нагрузки. Затем модуль упругости каждого образца нормируется относительно сплошного образца.



а  
Рисунок.5.5  
Исследуемый образец, а. – схема нагружения, б. габариты  
образца, в. поперечное сечение

## 5.6. Обработка результатов

Для контроля корректности полученных результатов для каждой серии испытания изготавливался сплошной образец. Такой образец необходим для учета неоднородности в данных. Такая неоднородность может происходить из-за смены производственного материала и температурных факторов производства. В связи с этим все полученные параметры нормировались на

параметры, полученные для сплошного образца, напечатанного для конкретной серии.

Для визуализации данных использовался ящик с усами, где границы ящика – первый и третий квартили, обозначающие значения для статистически значимой выборки, круг – медианное значение без выбросов. Тонкие усы обозначают минимальное и максимальное значения, выбросы отмечены красными точками.

## 5.7 Результаты

### 5.7.1. Испытания с использованием РКТ

После сканирования исследуемых образцов полученные томограммы были обработаны для дальнейшего анализа внутренней структуры материала. При изготовлении образцов с использованием технологии FDM-печати неизбежно образуются пустоты между слоями, что приводит к появлению межслойных пор. Рисунок.5.6 демонстрирует распределение этих пор внутри образца и подчёркивает, что учет межслойных пустот является важным аспектом при оценке механических свойств материала. Такие поры могут существенно влиять на поведение материала под нагрузкой, поэтому их присутствие должно учитываться при проведении численного моделирования и анализе экспериментальных данных.

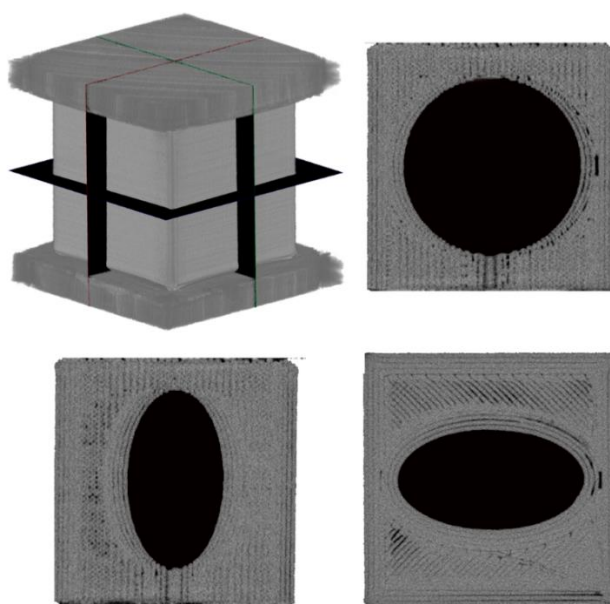


Рисунок.5.6 Томограмма образца из PLA-пластика в проекциях

Для построения предварительной модели зависимости физико-механических свойств от угла эллиптичности были использованы образцы: EP0, EP45, EP90. При угле  $0^\circ$  большая ось эллиптической поры параллельна направлению нагрузки (Рисунок.5.7.а), а при  $90^\circ$  — перпендикулярна (Рисунок.5.7.в). Это создает принципиально разные условия для распределения напряжений и деформаций, что позволяет выявить крайние случаи влияния ориентации поры на механические свойства. Образец с углом эллиптичности в  $45^\circ$  необходим для оценки зависимости свойств от угла эллиптичности (Рисунок.5.7.б).

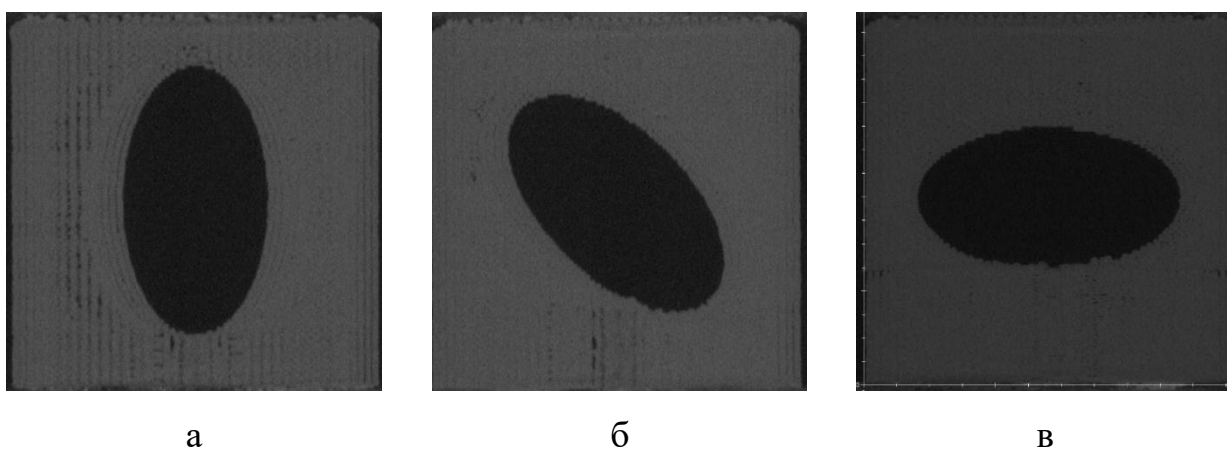


Рисунок.5.7 Томограммы исследуемых образцов а. EP0 б. EP45 в. EP90

Величина сжимающей нагрузки для каждого шага нагружения показана в таблице 5.2, где ПЗ соответствует зоне пластических деформаций и для каждого образца имеет свое собственное значение.

Таблица 5.2 Значение внешней сжимающей нагрузки

Шаг нагружения	Нагрузка, Н
0	0
1	1440
2	4320
3	ПЗ

Объем макропор у образцов после изготовления составил: EP0 – 884 мм<sup>3</sup>, EP45 – 872 мм<sup>3</sup>, EP90 – 875 мм<sup>3</sup>. Объем межслойных пор у образцов после изготовления составил: EP0 – 201 мм<sup>3</sup>, EP45 – 90 мм<sup>3</sup>, EP90 – 81 мм<sup>3</sup>.

Объем материала: EP0 – 6705 мм<sup>3</sup>, EP45 – 6820 мм<sup>3</sup>, EP90 – 6688 мм<sup>3</sup>. Общий объем образца после изготовления составил: EP0 – 7790 мм<sup>3</sup>, EP45 – 7782 мм<sup>3</sup>, EP90 – 7644 мм<sup>3</sup>. Объемы на каждом шаге нагружения приведены в таблице 5.3.

Для иллюстрации структуры материала на основе полученных томограмм была выделена четвертинка кубического образца. Это позволило показать распределение пор разного масштаба: межслойной пористости (Рисунок.5.8.а) и макропористости (Рисунок.5.8.б).

Таблица 5.3 Объемы образцов на каждом шаге нагружения

Образец	Нагрузка	V <sub>d</sub> , мм <sup>3</sup>	V <sub>s</sub> , мм <sup>3</sup>	V <sub>m</sub> , мм <sup>3</sup>	V <sub>all</sub> , мм <sup>3</sup>	ρ <sub>d</sub> , %	ρ <sub>m</sub> , %	Φ <sub>all</sub> , %
EP0	0	884	6705	201	7790	11.35	2.58	13.93
	1	883	6639	247	7769	11.37	3.18	14.54
	2	882	6703	195	7780	11.34	2.51	13.84
	Зона пластики	852	6861	41	7754	10.99	0.53	11.52
EP45	0	872	6820	90	7782	11.21	1.16	12.36
	1	870	6736	163	7769	11.20	2.10	13.30
	2	867	6848	79	7794	11.12	1.01	12.14
	Зона пластики	843	7022	23	7888	10.69	0.29	10.98
EP90	0	875	6688	81	7644	11.45	1.06	12.51
	1	872	6906	72	7850	11.11	0.92	12.03
	2	867	6839	92	7798	11.12	1.18	12.30
	Зона пластики	829	7014	31	7874	10.53	0.39	10.92

Для всех образцов наблюдалось уменьшение объема макропоры на каждом шаге нагружения (Рисунок.5.9.а). В зоне пластических деформаций

объем макропоры для образца EP0, EP45, EP90 уменьшился на 3.6%, 3.3% и 5.3% соответственно.

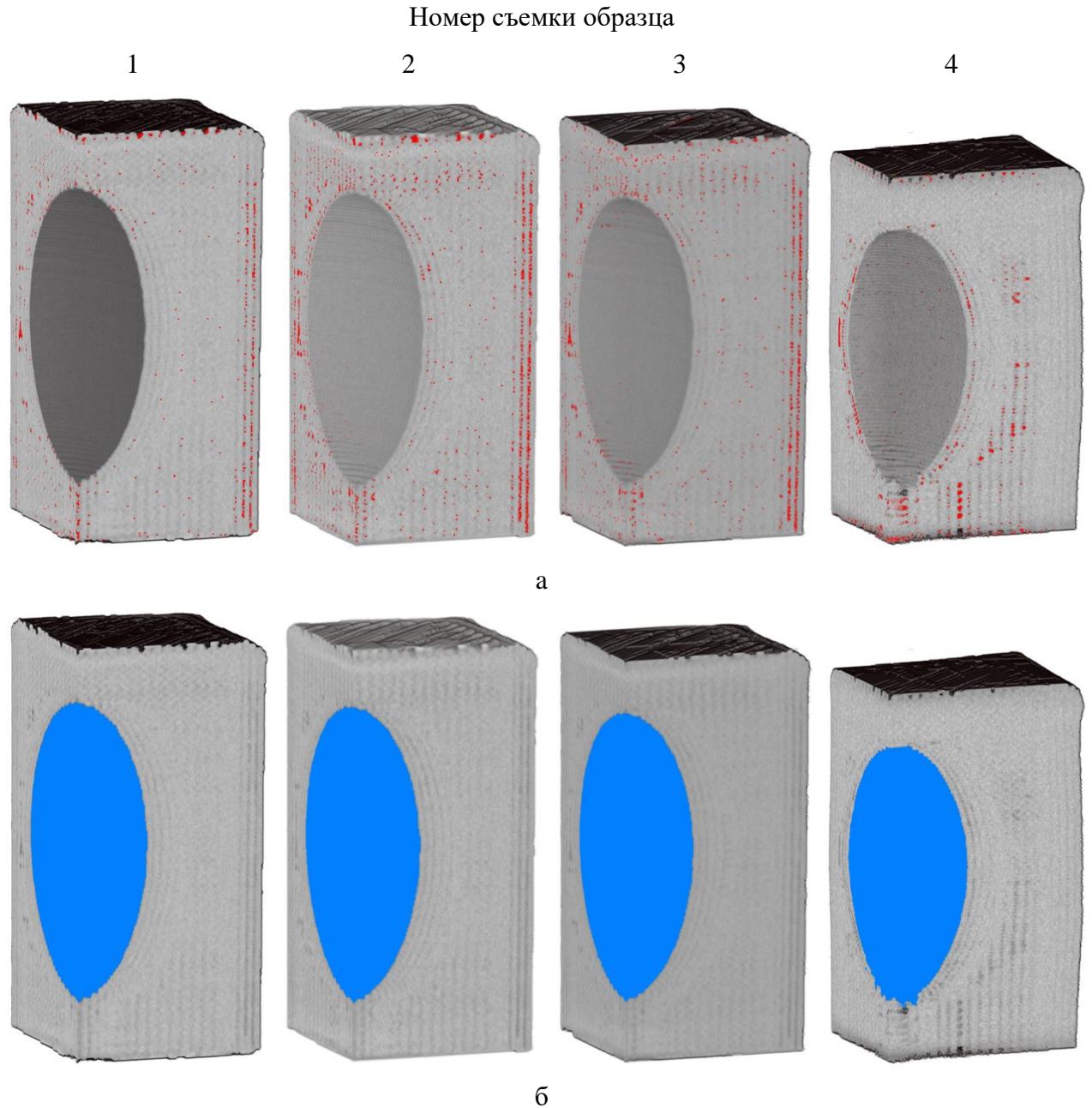


Рисунок.5.8      Компьютерная модель образца, с подсвеченной областью: а) межслойных пористость; б) макропористость

У всех образцов кроме EP90 на первом шаге нагружения объем межслойных пор увеличивался (Рисунок.5.9.б). На втором шаге нагружения только у образца EP90 наблюдается увеличение объема межслойных пор относительно первого шага. В зоне пластических деформаций объем межслойных пор у всех образцов уменьшался минимум на 61%, по

сравнению с образцами после изготовления. В зоне пластических деформаций наблюдалось закрытие межслойных пор.

У образца EP90 на первом шаге нагружения общий объем увеличивался, в то время как у остальных уменьшался (Рисунок.5.9.г). У образца EP0 наблюдается уменьшение общего объема при пластических деформациях. Изменение общего объема ненагруженных образцов после изготовления и образцов, подверженных действию пластических деформаций не превышает 2,9 %.

Объем материала у всех образцов кроме EP90 на первом шаге нагружения уменьшался, но на втором шаге нагружения возвращался к начальному значению (Рисунок.5.9.в). У образца EP90 наблюдалось увеличение объема материала на первом шаге нагружения (3,2%).

По полученным объемам были определены межслойная пористость, макропористость и общая пористость образцов EP0, EP45 и EP90 (Рисунок.5.9).

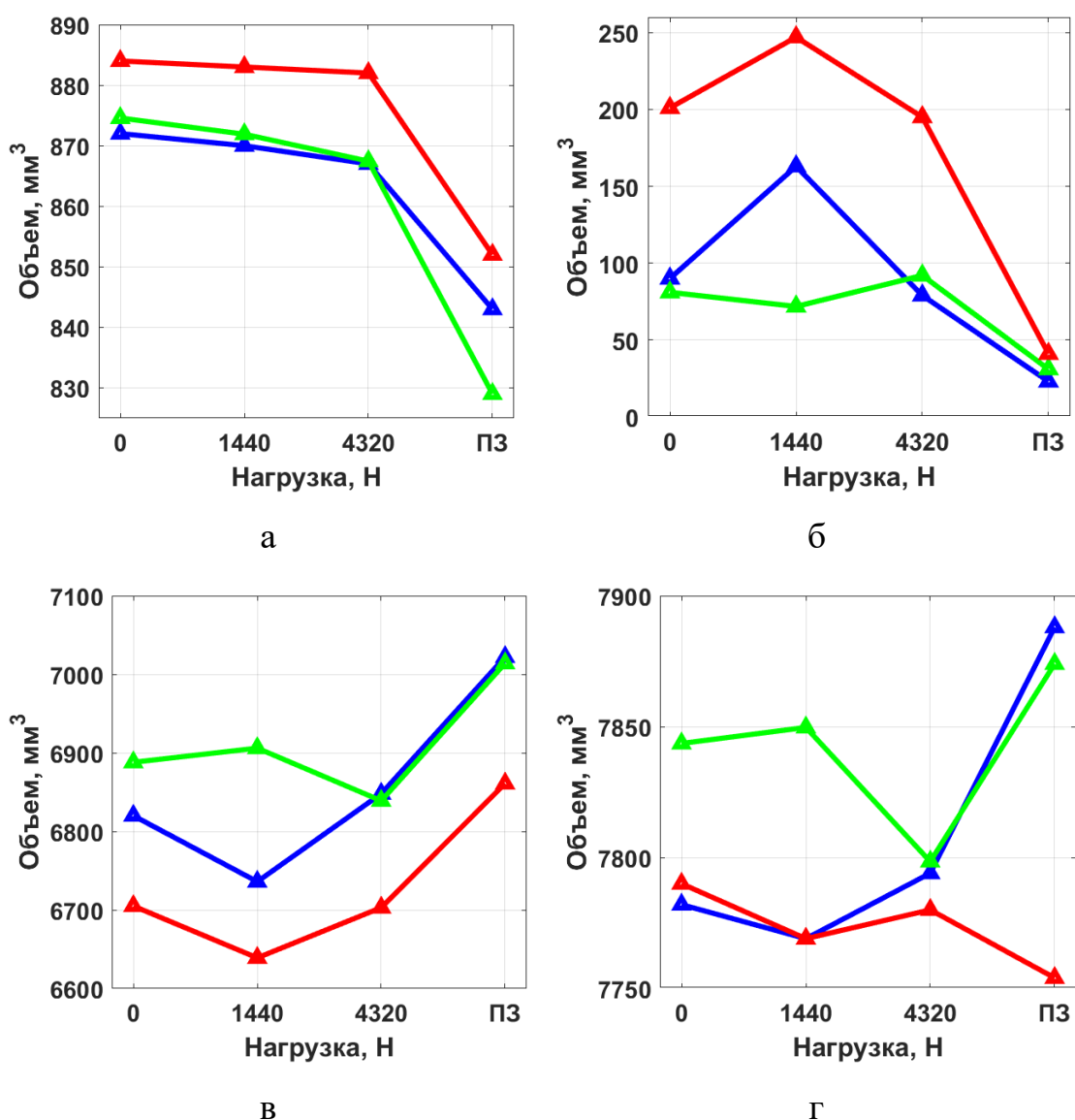


Рисунок.5.9 Изменение объема: макропоры (а), межслойных пор (б), материала (в) и общего объема (г) в ходе нагружения (красный EP0, синий EP45, зеленый EP90)

Исходная межслойная пористость после изготовления физического объема ЕЕ0 составила 2.58%. В ходе нагружения у образца EP0 наблюдалось увеличение межслойной пористости до 3.17% на первом шаге (Рисунок.5.10.б). На втором шаге нагружения межслойная пористость возвращается к исходному значению 2.5%. На участке пластичности межслойная пористость образца составила 0.5%.

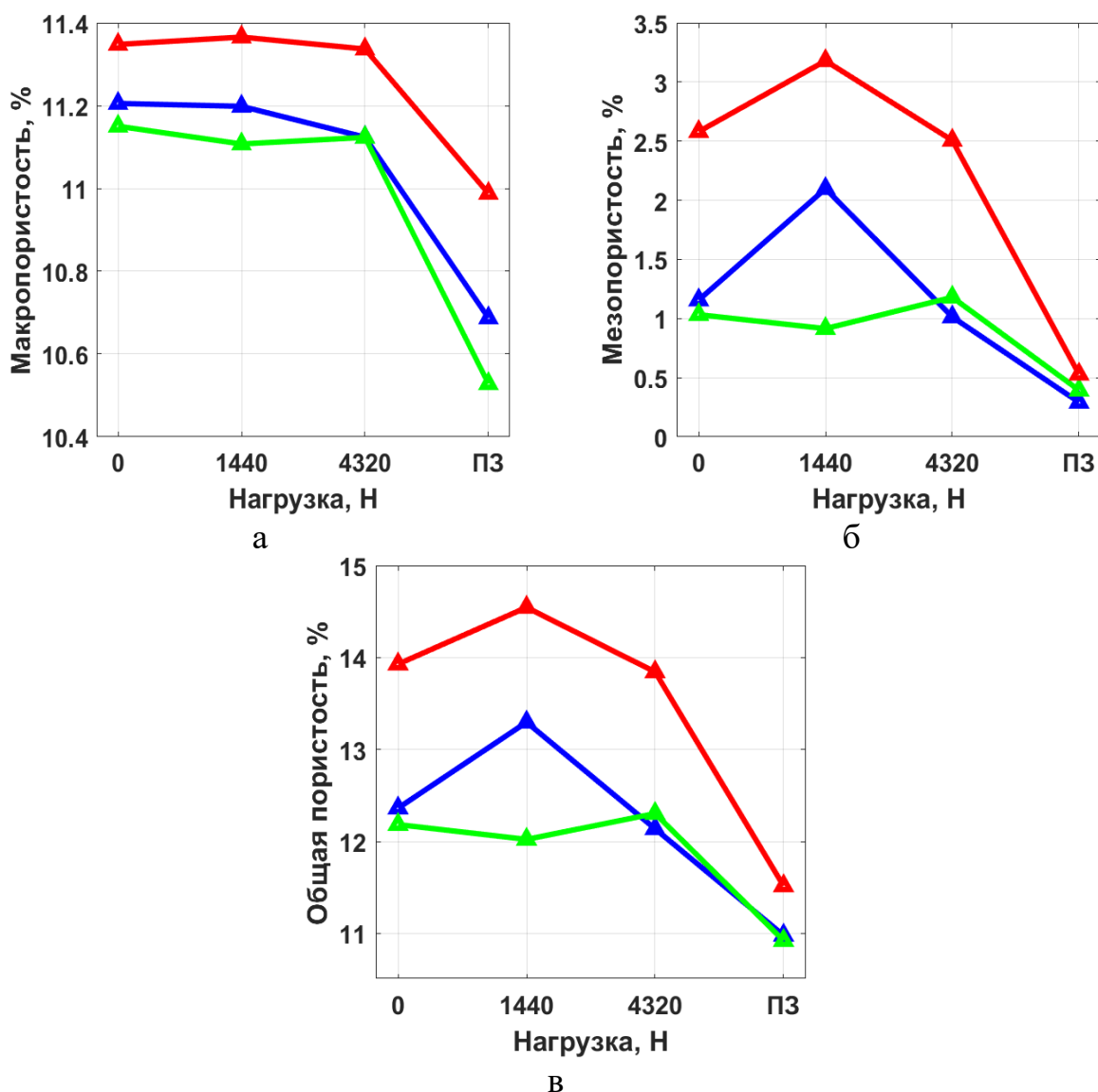


Рисунок.5.10 Изменение макропористости (а), межслоистой пористости (б) и общей пористости (в) (красный EP0, синий EP45, зеленый EP90)

На всем этапе нагружения в компьютерном томографе макропористость образца EP0 не изменялась (Рисунок.5.10.а). Исходная макропористость составила 11.34%, на первом шаге нагружения – 11.36%, на втором – 11.33%. При пластических деформациях макропористость составила 10.9%. Для всех образцов наблюдалось уменьшение макропористости в ходе нагружения.

Ввиду малого изменения макропористости в ходе нагружения характер изменения общей пористости идентичен изменению межслоистой пористости у образца (Рисунок.5.10.в).

Межслойная пористость, для всех образцов кроме EP90, увеличивалась на первом шаге нагружения, и уменьшалась на следующих этапах нагружения. У образца EP90 наблюдается уменьшение межслойных пористости до 0,92% на первом шаге нагружения, однако на втором увеличивается до 1,18%. Параметры межслойных пористости, макропористости, общей пористости в ходе нагружения каждого физического объема представлены в таблице 5.4.

Характерные продольные сечения образцов под нагрузкой показаны на Рисунке 4.11. Сечения были построены на основе данных РКТ снимков, для удобства данные были сегментированы: твердая фаза отмечена синим цветом, макропора – красным цветом, межслойные поры – зеленым.

По значениям нормированной проницаемости для каждого шага нагружения и для каждого образца рассчитывалось относительное отклонение массы. Отклонение массы от первоначально определенной не превышает 3.2%.

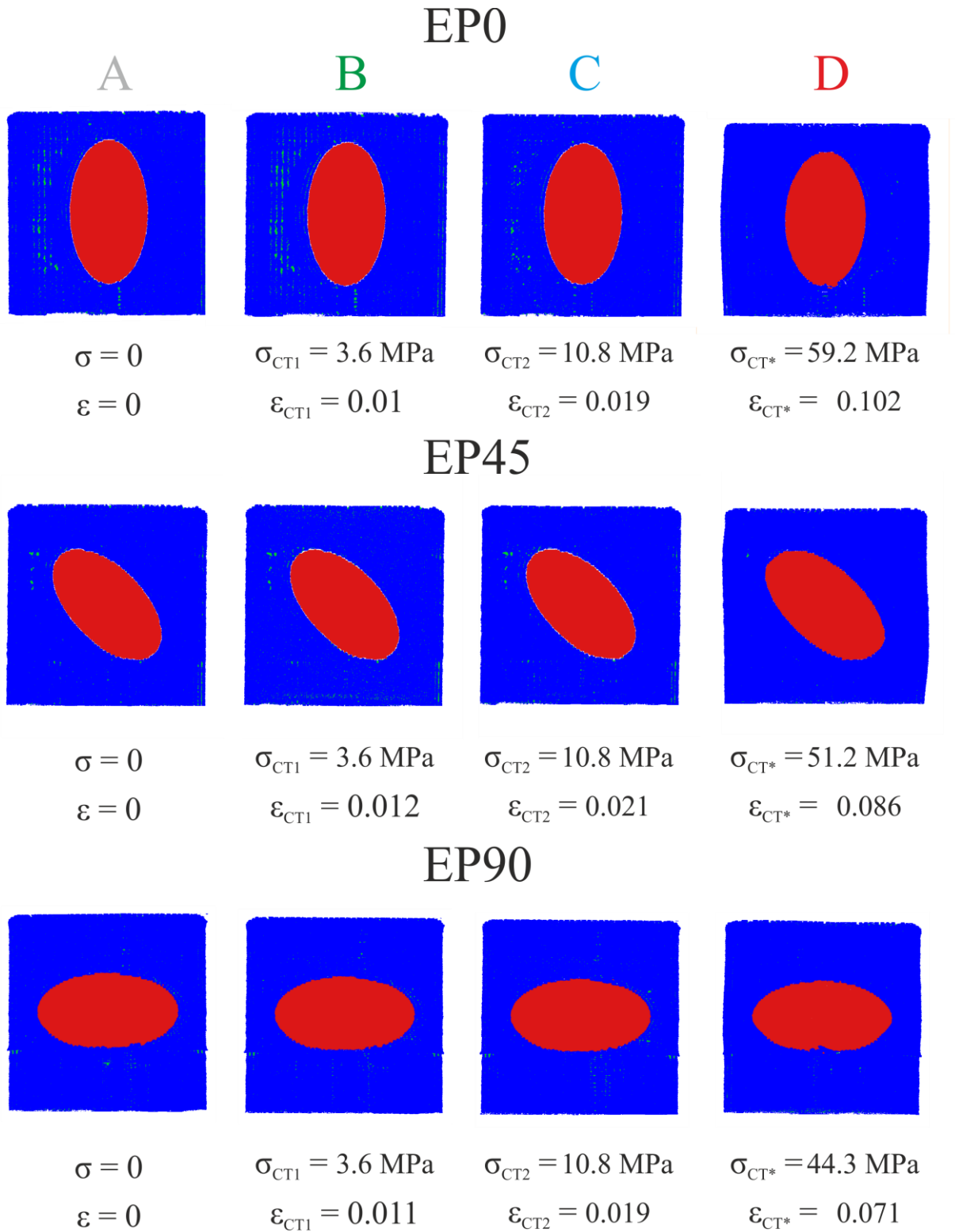


Рисунок.5.11 Маски, напряжения и деформации образцов на каждом шаге нагружения

### 5.7.2. Численные испытания

С помощью численных исследований были определены модуля упругости для пористых образцов. Угол  $\phi$  варьировался с шагом 5 градусов на интервале  $[0^\circ; 90^\circ]$ . Нормированные значения модуля упругости для каждого типа пористых образцов чёрными треугольниками (Рисунок.5.13.а). График красного цвета – аппроксимирующая кривая зависимости модуля упругости от угла эллиптичности полученная с помощью формулы 1. По результатам РКТ сканирования была выявлена равномерно распределенная межслойная пористость внутри материала. Линия зеленого цвета – аппроксимирующая кривая численного расчета с учетом межслойной пористости (3%) по формуле смеси. Значения коэффициентов аппроксимирующей кривой и коэффициент детерминации представлен в таблице 2.

### 5.7.3. Натурные испытания

В ходе исследования получены диаграммы нагружения для всех пористых ячеек (Рисунок.5.12), представленные в виде среднего значения по четырём образцам (жирная линия) с указанием максимальных и минимальных отклонений (полупрозрачная область). Скорость нагружения соответствовала 0.5 мм/мин.

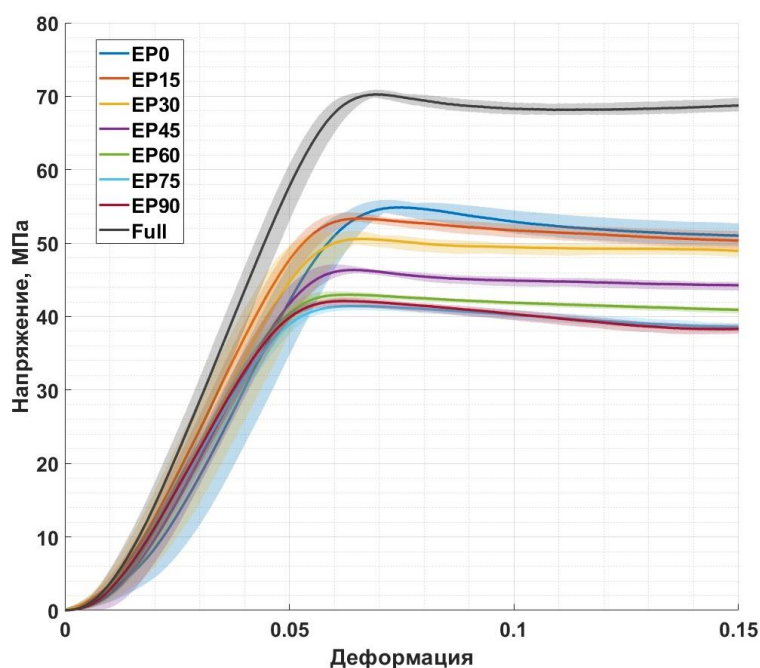


Рисунок.5.12 Диаграмма нагружения образцов

Для каждого образца коэффициент детерминации, аппроксимирующей кривой площадки упругих деформаций, был не менее 0.98. Для линии текучести не менее 0.92. Каждый из вышеперечисленных параметров пористых образцов нормировался относительно сплошного образца S.

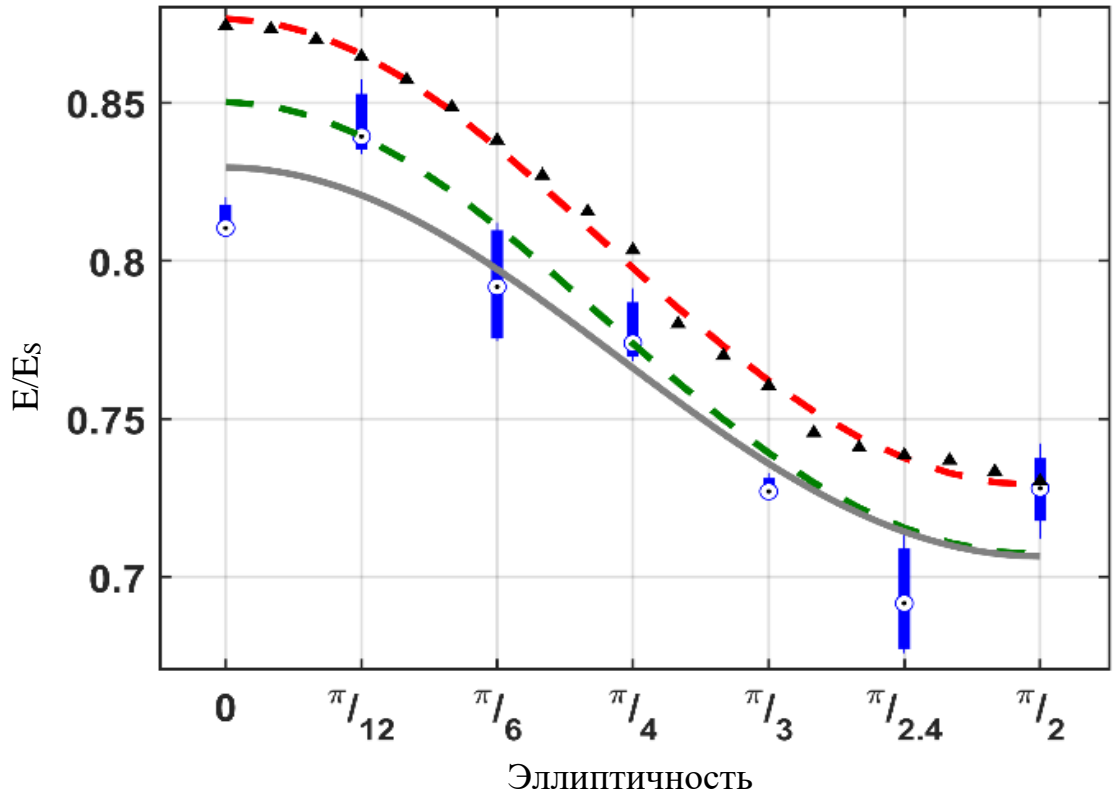
У сплошного образца S медианное значение модуля упругости составляло 1498 (1457;1515) МПа, верхнего предела текучести – 70.5 (69.93;70.91) МПа, нижнего предела текучести – 68 (67.38;68.9) МПа и угла линии текучести – -89.03 (-89.08,-88.72). Нормированные значения модуля упругости в ходе натурального эксперимента для каждого физического объема представлены с помощью ящика с усами (Рисунок.5.13.а). График серого цвета аппроксимирующая кривая зависимости модуля упругости и угла эллиптичности, полученная в ходе натурального испытания.

Нормированные значения верхнего и нижнего предела текучести (Рисунок.5.13.в). Аналогично графику нормированных значений модулей упругости красным цветом отмечена аппроксимирующая кривая. Значения угла линии текучести для каждого образца (Рисунок.5.13.г). Углы линии текучести для всех образцов лежат на интервале (-86°; -89°).

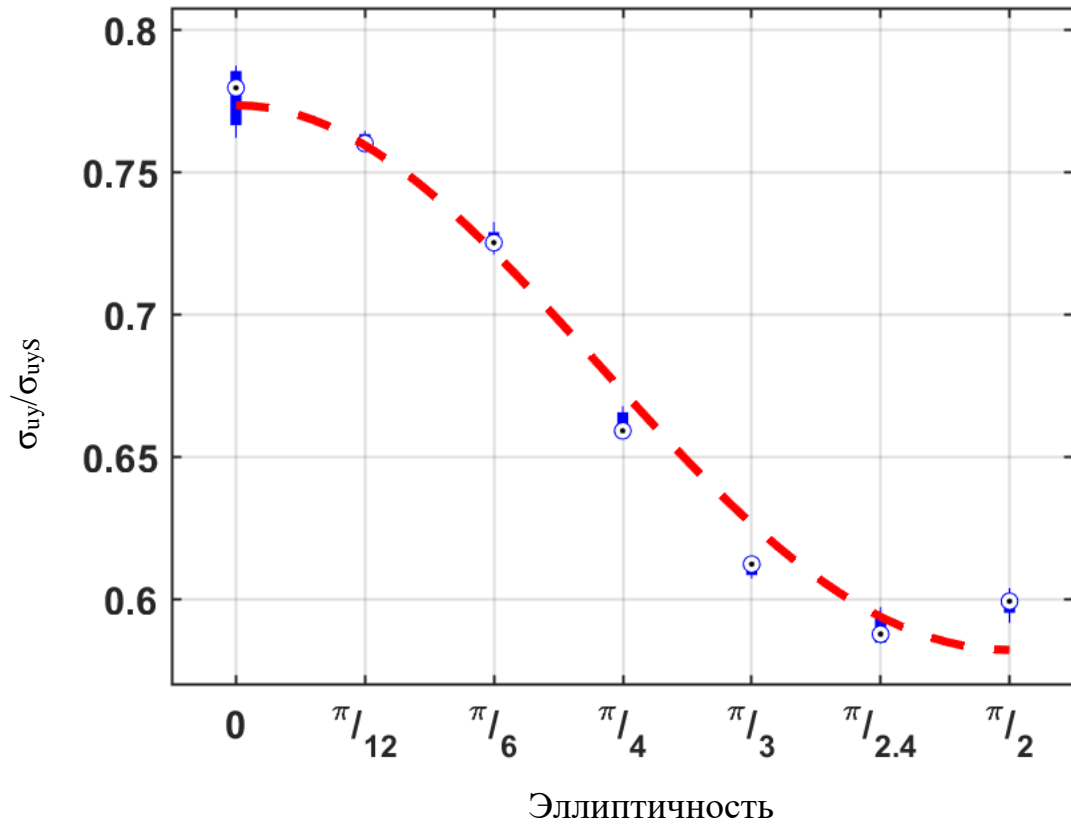
Значения коэффициентов аппроксимирующей кривой и коэффициенты детерминации представлены в таблице 5.4.

Таблица 5.4 Коэффициенты аппроксимирующей кривой и коэффициенты детерминации

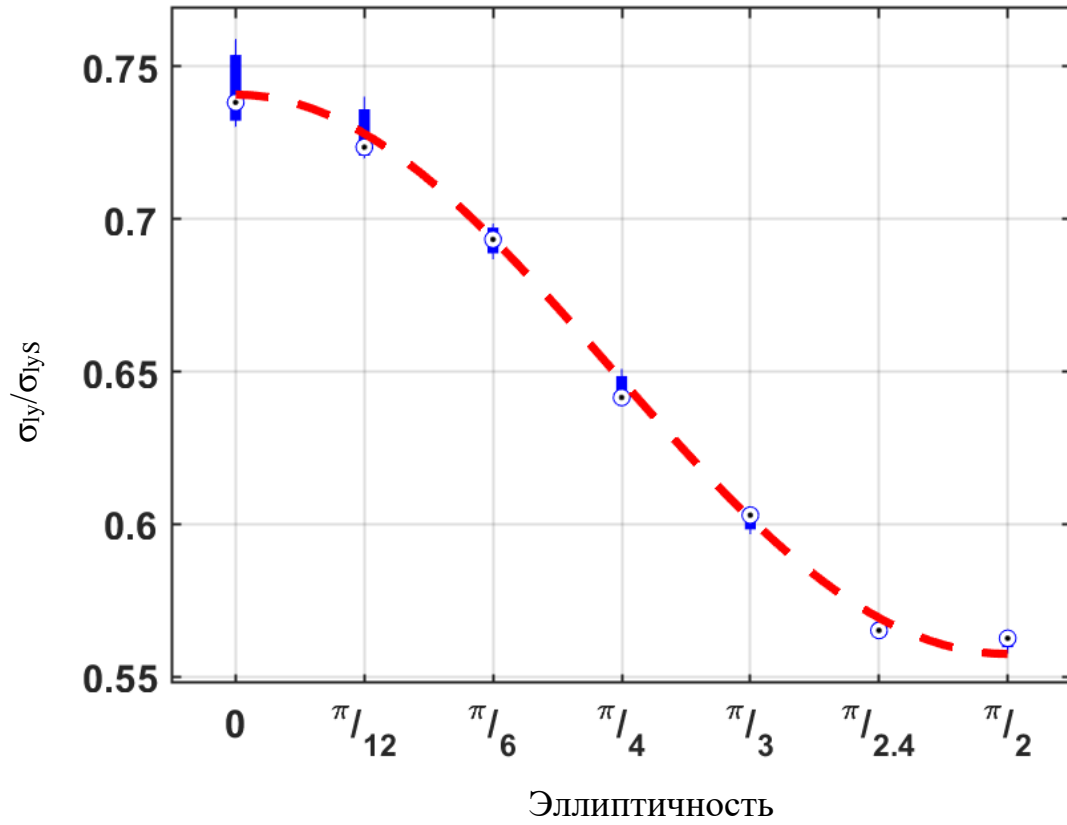
	Натурные испытания			Численные испытания
	$E/E_{Solid}$	$\sigma_{uy}/\sigma_{uy Solid}$	$\sigma_{ly}/\sigma_{ly Solid}$	$E/E_{Solid}$
a <sub>1</sub>	15.28	36.77	12.79	31.34
a <sub>2</sub>	4.387	7.187	4.397	5.401
a <sub>3</sub>	1.036	1.057	1.022	1.321
a <sub>4</sub>	0.6852	3.181	1.533	-5.769
R <sup>2</sup>	0.81	0.97	0.98	0.99



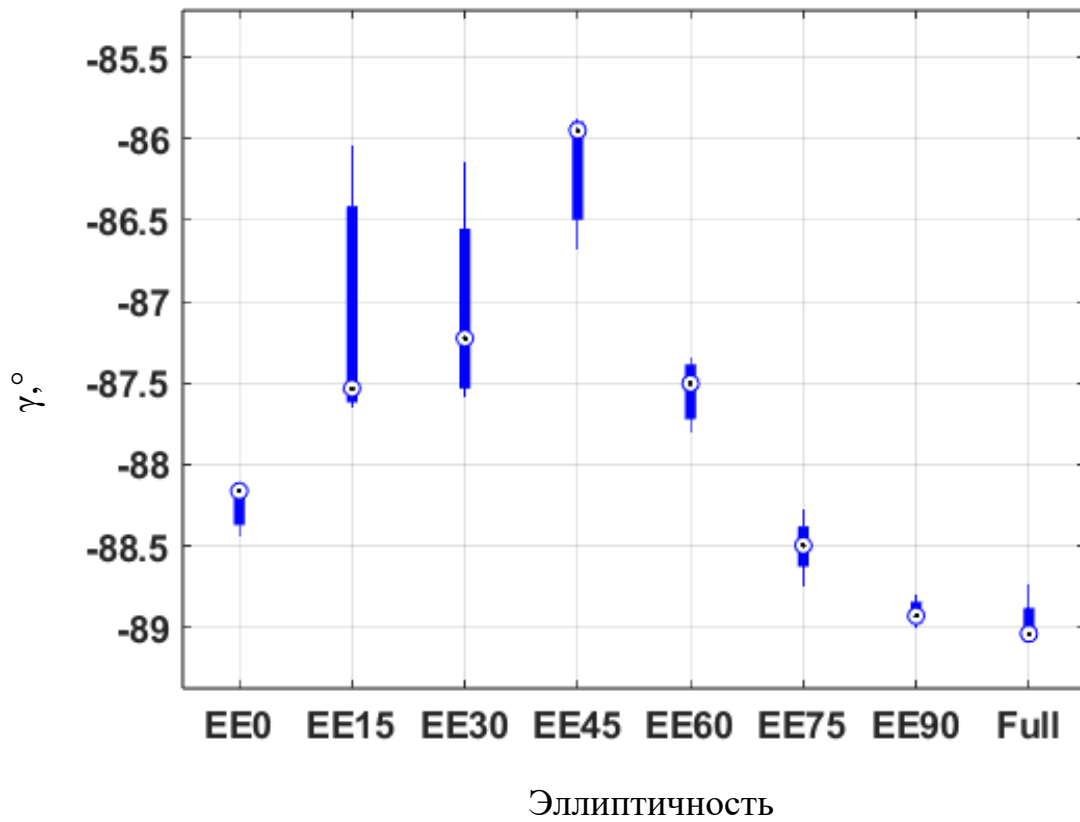
а



б



в



г

Рисунок.5.13 Ящик с усами нормированных значений модуля упругости (а) верхнего (б) и нижнего (в) предела текучести и угла линии текучести (г)

## 5.8 Обсуждение полученных результатов

В исследовании получены аппроксимационные кривые, описывающие влияние направления эллиптичности пористых ячеек на модуль упругости, верхний и нижний предел текучести. Аппроксимирующая функция была выбрана исходя из гипотезы одинаковой деформации срединного слоя пористой и сплошной ячейки. Для модуля упругости при натуральных испытаниях коэффициент детерминации соответствовал 0.81, когда для численных 0.99. Для верхнего и нижнего предела текучести при натуральных испытаниях коэффициент детерминации соответствовал 0.97 и 0.98, соответственно. Характер аппроксимирующей функции схож с кривыми полученными в работах [54, 38]. В исследовании [38] приведены кривые влияния укладки образцов из PLA материала, а также способа их нарастания, на модуль упругости. В нашем исследовании поворот угла поры означает изменение ортотропных свойств, ввиду одинакового способа печати.

Для модуля упругости при натуральных испытаниях значение коэффициента детерминации можно связать с видом деформации (упругая или пластическая) и величиной межслойной пористости на рассматриваемом участке. Для определения модуля упругости рассматривался участок упругих деформаций. На участке упругих деформаций макропористость у всех образцов практически не изменялась. Макропористость образцов находилась на интервале (11,11%; 11,45%), при проектировочной пористости 11,3%. Наличие межслойных пористости у образцов негативно сказывалось на общей пористости образца. Общая пористость каждого образца находилась на интервале (12,03%;14,54%), при проектировочной пористости 11,3%. При пластических же деформациях влияние межслойной пористости на общую пористость уменьшилось, из-за закрытия межслойных пор. Другими словами, при упругих деформациях хаотичное распределение межслойных пористости вносит вклад при оценке эффективных упругих механических характеристик. Это влияние снижается в случае перехода образца в пластическую зону, что сопровождается почти полным закрытием межслойных пор. Количественно

это показывает снижение коэффициента детерминации для аппроксимации верхнего и нижнего предела текучести.

Количество межслойных пор, а также их размер и форма могут по-разному влиять на физические свойства неоднородных материалов [43, 33]. В работе [43] авторы исследуют эффекты межслойных пористости у образцов гироидной решетчатой структуры, изготовленной с помощью метода лазерного плавления. Образцы нагружались как сжимающей, так и циклической нагрузкой. В работе определено, что межслойная пористость, возникающая за счет технологических особенностей, при пористости 0,2% не влияет на прочность сжатия и усталостную долговечность. В работе [26] у исследуемого образца модуль упругости увеличивается с увеличением пористости, а в работе [70] наблюдается связь между уменьшением пористости и с соответствующим уменьшением модуля упругости. Схожие эффекты наблюдались и в представленном исследовании, где межслойная пористость составила порядка 1–4%, и оказывала значительное влияние на величины эффективных упругих механических характеристик.

Наибольший интерес представляют параметры, характеризующие геометрию и количество межслойных пор, которые незначительно влияют на физико-механические свойства. В данном исследовании объем каждой межслойной поры при упругих и пластических деформациях не определялся. Определяя объем каждой межслойной поры, можно определить медианную величину пористости для всех межслойных пор при разных деформациях. Данные результаты позволили бы определить такой объем межслойных пор, который не влияет на физико-механические свойства. Для этого планируются провести новые эксперименты с разгрузкой образца, для определения линии разгрузки и модуля упругости.

Вопрос характера деформаций изделий с межслойной и макропористостью остается открытым, а значит, исследования таких структур требует дальнейшего изучения.

## Выводы по главе 5

В данной главе проведены испытания на одноосное сжатие в испытательной машине и в компьютерном томографе. В качестве испытуемых образцов были взяты кубы с эллиптической порой, с разным углом эллиптичности. В конечном результате для каждого вида образцы были получены: модуль упругости, предел пропорциональности, нижний и верхний предел текучести, аппроксимирующие прямые. Для нескольких видов образцов были получены изменения параметров в зависимости от силы нагружения, а именно: объем межслойных пор, объем макропор, объем материала, общий объем, пористость межслойных пор, общая пористость. За счет хаотичного распределения по объему образца, такие поры изменяют механические свойства итогового образца. Это подтверждается при анализе коэффициента детерминации и разброса полученных данных. При рассмотрении пластического участка – межслойная пористость практически полностью закрывается, а коэффициент детерминации увеличивается, а разброс - уменьшается, что указывает на прямой эффект от межслойных пор. Для проверки такой гипотезы, в дальнейших исследованиях планируется посмотреть кривую разгрузки образцов, которая должна отличаться от кривой нагрузки, за счет того, что все межслойных поры закрылись. Такую кривую можно будет принимать за истинную.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации получены следующие **основные результаты**:

1. разработана феноменологическая математическая модель, основанная на положениях механики сплошных сред и теории гомогенизации, для оценки влияния межслойных дефектов, возникающих при аддитивном производстве методом послойного наплавления, на эффективные механические свойства материалов;

2. на основе предложенной математической модели получена инженерная формула, позволяющая скорректировать значения упругих характеристик изделий с учётом их внутренней пористости и особенностей технологического процесса, и определена область применимости инженерной формулы;

3. проведена численная реализация разработанной модели и выполнены расчеты эффективных механических свойств образцов с различной геометрией пор и различным распределением межслойных дефектов, результаты численных экспериментов подтвердили согласованность аналитических зависимостей;

4. спроектировано и изготовлено устройство с программно-аппаратной частью для проведения *in situ* испытаний на сжатие внутри рентгеновского компьютерного томографа, обеспечивающее синхронизацию нагружения и съёмку с возможностью определения структурных свойств и полей перемещений и деформаций;

5. проведены натурные *in situ* эксперименты, по результатам которых выполнены расчеты эффективных механических свойств образцов, с различной геометрией пор и различным распределением межслойных дефектов, и подтверждена согласованность аналитических зависимостей;

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Акифьев К.Н., Большаков П.В., Семенова Е.В., Харин Н.В., Стаценко Е.О., Саченков О.А. Исследование структуры неоднородных нагруженных образцов// Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред: Материалы XXVIII Международного симпозиума имени А.Г. Горшкова – 2022 – С. 5–7.
2. Акифьев К.Н., Харин Н.В., Большаков П.В., Спиридонова К.О. Исследование потери устойчивости решетчатого эндопротеза под нагрузкой в компьютерном томографе// Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред: Материалы XXX Международного симпозиума им. А.Г. Горшкова – 2024 – С. 11–12.
3. Акифьев К.Н., Харин Н.В., Фархутдинов Д.М. Применение алгоритмов компьютерного зрения для определения деформаций образцов, нагруженных в компьютерном томографе// Современные проблемы математики и её приложений: Тезисы докладов Международной (55-й Всероссийской) молодёжной школы-конференции, Екатеринбург, 29 января – 16 февраля 2024 года. – Екатеринбург: Институт математики и механики им. Н.Н. Красовского УрО РАН, УрФУ, 2024. – С. 115.
4. Большаков П.В., Харин Н.В., Акифьев К.Н. и др. Расширение алгоритма диаграммы Вороного на ортотропное пространство для структурного проектирования материалов// Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред: Материалы XXX Международного симпозиума им. А.Г. Горшкова, 2024 – С. 55-56.
5. Большаков П.В., Харин Н.В., Акифьев К.Н., Саченков О.А. Проектирование нерегулярных структур, изготовленных аддитивными технологиями// Управление качеством продукции на основе передовых производственных технологий: Сборник тезисов докладов V Международного форума – 2023 года. – СПб.: ФГАОУ ВО «СПбПУ», 2023. – С. 54–57.

6. Герасимов О.В., Саченков О.А., Балтина Т.В., Харин Н.В. Программа определения механических свойств образцов из негетомогенных материалов численно-цифровым методом по данным их компьютерной томографии: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024610329. – № 2023688678; заявл. 18.12.2023; зарегистр. 10.01.2024.
7. Иванов М.Н. Детали машин. – М.: Высшая школа, 1976.
8. Пат. 2755098 Рос. Федерация, МПК G01N23/046 (2018.01). Устройство для определения структуры материала или образцов при одноосном сжатии и способ его использования / Саченков О.А., Большаков П.В., Герасимов О.В., Стаценко Е.О., Акифьев К.Н. – № 2021103527; заявл. 12.02.2021; опубл. 13.09.2021.
9. Пат. 2813454 Рос. Федерация, МПК G01N23/046 (2018.01). Устройство для определения структуры образцов при автоматизированном одноосном сжатии и способ его использования / Саченков О.А., Большаков П.В., Харин Н.В., Акифьев К.Н., Спиридонова К.О., Смирнова В.В. – № 2023126459; заявл. 16.10.2023; опубл. 12.02.2024.
10. Пат. RU157585 Рос. Федерация, МПК G01N3/02 (2006.01). Устройство для определения структуры материала или изделия, преимущественно полимерного композиционного материала / Юргенсон С.А. – № 20141381148; заявл. 22.09.2014; опубл. 22.09.2014.
11. Пат. RU2714515 Рос. Федерация, МПК G01N19/08 (2019.08). Устройство 3D визуализации деформированного состояния поверхности материала в области упругих деформаций / Николаев А.Л., Сукиязов А.Г., Зеленцов В.Б., Садырин Е.В., Айзикович С.М. – № 2019126330; заявл. 21.08.2019; опубл. 18.02.2020.
12. Пат. RU2719276 Рос. Федерация, МПК G01N29/04 (2020.02). Способ исследования соединений с натягом с применением ультразвуковой томографии / Иванников В.П., Кабакова А.В., Чайкина А.Ю. – № 2018141351; заявл. 24.11.2018; опубл. 17.04.2020.

13. Саченков О.А., Харин Н.В., Акифьев К.Н., Смирнова В.В., Спиридонова К.О., Фархутдинов Д.М. Программа трекинга реперных точек на серии трехмерных изображений: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024667394. – № 2024665539; заявл. 04.07.2024; зарегистр. 24.07.2024.

14. Саченков О.А., Харин Н.В., Акифьев К.Н., Фархутдинов Д.М. Программа количественного анализа структурных характеристик неоднородных образцов по данным трехмерных изображений: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024666278. – № 2024665566; заявл. 04.07.2024; зарегистр. 11.07.2024.

15. Саченков О.А., Харин Н.В., Большаков П.В. Программа для определения упругих анизотропных свойств по данным томографии: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019613650. – № 2019612367; заявл. 11.03.2019; зарегистр. 20.03.2019.

16. Харин Н.В. Методика исследования пористых образцов под влиянием внешней нагрузки при помощи компьютерного томографа// Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: Тезисы докладов Тридцатой международной научно-технической конференции студентов и аспирантов, Москва, – 2024 – С. 332.

17. Харин Н.В. Об устройстве для автоматизированного сжатия образцов совместно со съемкой рентгеновского компьютерного томографа// Труды МАИ. – 2025. – № 143 – С. 1-30.

18. Харин Н.В., Акифьев К.Н., Багаутдинов И.А. и др. Оптимизация микроструктуры изделия для производства аддитивными технологиями// Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред: Материалы XXIX Международного симпозиума им. А.Г. Горшкова, –2023. – С. 208–209.

19. Харин Н.В., Акифьев К.Н., Семенова Е.В. и др. Исследование структурных изменений пористых образцов под нагрузкой// Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред:

Материалы XXIX Международного симпозиума им. А.Г. Горшкова –2023. – С. 209–210.

20. Харин Н.В., Акифьев К.Н., Спиридонова К.О., Хамзин Д.Э., Стаценко Е.О., Большаков П.В. Влияние структурных параметров на физико-механические свойства неоднородных образцов под действием сжимающей нагрузки// Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2024. – № 8 (773). – С. 11–23.

21. Харин Н.В., Акифьев К.Н., Стаценко Е.О., Семенова Е.В., Саченков О.А., Большаков П.В. Исследование пористости образца с флюидом, насыщенными закрытыми порами, под действием внешней нагрузки// Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки. – 2024. – № 3 (114). – С. 70–91.

22. Харин Н.В., Бережной Д.В., Акифьев К.Н. и др. Исследование пористых образцов под нагрузкой в компьютерном томографе// Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред: Материалы XXX Международного симпозиума им. А.Г. Горшкова – 2024 – С. 215–216.

23. Харин Н.В., Большаков П.В., Акифьев К.Н., Саченков О.А. Экспериментальная методика для оценки внутренней структуры образцов под нагрузкой// Управление качеством продукции на основе передовых производственных технологий: Сборник тезисов докладов V Международного форума, Санкт-Петербург, 12–13 октября 2023 года. – СПб.: ФГАОУ ВО «СПбПУ», 2023. – С. 97–100.

24. Alison Noble J. Finding Corners// Image and Vision Computing. – 1988. – Vol. 6, № 2. – P. 121–128. doi: 10.1016/0262-8856(88)90007-8

25. Al-Maatoq M., Fachet M., Rao R., Hoeschen C. Artifacts' detection for MRI Non-Metallic needles: Comparative analysis for artifact evaluation using K-Means and manual quantification// Magnetochemistry. – 2023. – Vol. 9, № 3. – P. 79. doi: 10.3390/magnetochemistry9030079

26. Al-Munajjed A.A., Hien M., Kujat R., Gleeson J.P., Hammer J. Influence of pore size on tensile strength, permeability and porosity of hyaluronan-collagen scaffolds// *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*. – 2008. – Vol. 19. – P. 2859–2864. doi: 10.1007/s10856-008-3422-5
27. Anh D.T., Tanim A.H., Kushwaha D.P., Pham Q.B., Bui V.H. Deep learning long short-term memory combined with discrete element method for porosity prediction in gravel-bed rivers// *International Journal of Sediment Research*. – 2023. – Vol. 38, № 1. – P. 128–140. doi: 10.1016/j.ijsrc.2022.08.001
28. Araki S., Yamashita H. Micromechanical analysis of macroscopic elastic moduli and coefficients of thermal expansion for a composite material containing ellipsoidal reinforcements// *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers. Series A*. – 2008. – Vol. 74, № 745. – P. 1227–1234. doi: 10.1299/kikaia.74.1227
29. Babaytsev A.V., Shumskaya S.A., Ripetskiy A.V. Research of the impact of SLM printing parameters on residual deformation levels in aluminum products// *Russian Engineering Research*. – 2024. – Vol. 44, № 5. – P. 730–733. doi: 10.3103/s1068798x24700965
30. Bolshakov P., Kuchumov A.G., Kharin N., Akifyev K., Statsenko E., Silberschmidt V.V. Method of computational design for additive manufacturing of hip endoprosthesis based on basic cell concept// *International Journal for Numerical Methods in Biomedical Engineering*. – 2024. – Vol. 40, № 3. – e3802.
31. Bryant C.E., Rutledge J.L. Temperature dependent property considerations for biot number matching with composite materials// *Journal of Turbomachinery*. – 2022. – Vol. 145, № 4. doi: 10.1115/1.4055927
32. Budtova T., Lokki T., Malakooti S., Rege A., Lu H., Milow B., Vapaavuori J., Vivod S.L. Acoustic Properties of Aerogels: Current status and Prospects// *Advanced Engineering Materials*. – 2022. – Vol. 25, № 6. doi: 10.1002/adem.202201137
33. Cai C., Song B., Xue P., Wei Q., Wu J., Wei L., Shi Y. Effect of hot isostatic pressing procedure on performance of Ti6Al4V: Surface qualities,

microstructure and mechanical properties// *Journal of Alloys and Compounds*. – 2016. – Vol. 686. – P. 55–63. doi: 10.1016/j.jallcom.2016.05.280

34. Chatziathanasiou T., Soete J., Vanhulst J., Carrella-Payan D., Gorbatikh L., Mehdikhani M. In-situ X-ray computed tomography of mode I delamination in carbon-epoxy composites: The effect of the interface ply orientation// *Composites Part B: Engineering*. – 2023. – Vol. 260. – P. 110761. doi: 10.1016/j.compositesb.2023.110761

35. Chen B., Wu D., Wang T., Yuan F., Jia D. Rapid preparation of porous carbon by flame burning carbonization method for supercapacitor// *Chemical Engineering Journal*. – 2023. – Vol. 462. – P. 142163. doi: 10.1016/j.cej.2023.142163

36. Clemens F., Sarraf F., Borzi A., Neels A., Hadian A. Material extrusion additive manufacturing of advanced ceramics: Towards the production of large components// *Journal of the European Ceramic Society*. – 2023. – Vol. 43, № 7. – P. 2752–2760. doi: 10.1016/j.jeurceramsoc.2022.10.019

37. Correia D.M., Fernandes L.C., Martins P.M., García-Astrain C., Costa C.M., Reguera J., Lanceros-Méndez S. Ionic Liquid–Polymer Composites: a new platform for multifunctional applications// *Advanced Functional Materials*. – 2020. – Vol. 30, № 24. doi: 10.1002/adfm.201909736

38. Dai S., Deng Z.C., Yu Y.J., Zhang K., Wang S.H., Ye J. Orthotropic elastic behaviors and yield strength of fused deposition modeling materials: Theory and experiments// *Polymer Testing*. – 2020. – Vol. 87. – P. 106520. doi: 10.1016/j.polymertesting.2020.106520

39. Dayani S., Markötter H., Schmidt A., Widjaja M.P., Bruno G. Multi-level X-ray computed tomography (XCT) investigations of commercial lithium-ion batteries from cell to particle level// *Journal of Energy Storage*. – 2023. – Vol. 66. – P. 107453. doi: 10.1016/j.est.2023.107453

40. De Castro Saiki L.E., Gomes G.F. Understanding and mitigating delamination in composite materials: A comprehensive review// *Mechanics of*

Advanced Materials and Structures. – 2024. – P. 1–21. doi: 10.1080/15376494.2024.2333490

41. Deng W., Fu L., Wang Z., Hou W., Han T. Biot-consistent framework for wave propagation with macroscopic fluid and thermal effects// Geophysical Journal International. – 2023. – Vol. 235, № 2. – P. 1218–1227. doi: 10.1093/gji/ggad293

42. Diniță A., Neacșa A., Portoacă A.I., Tănase M., Ilinca C.N., Ramadan I.N. Additive Manufacturing Post-Processing Treatments, a Review with Emphasis on Mechanical Characteristics// Materials. – 2023. – Vol. 16, № 13. – P. 4610. doi: 10.3390/ma16134610

43. Du Plessis A., Razavi S.M.J., Berto F. The effects of microporosity in struts of gyroid lattice structures produced by laser powder bed fusion// Materials & Design. – 2020. – Vol. 194. – P. 108899. doi: 10.1016/j.matdes.2020.108899

44. Dulal M., Islam M.R., Maiti S., Islam M.H., Ali I., Abdelkader A.M., Novoselov K.S., Afroj S., Karim N. Smart and multifunctional Fiber-Reinforced composites of 2D Heterostructure-Based textiles// Advanced Functional Materials. – 2023. – Vol. 33, № 40.

45. Dusanapudi S., Krupakaran R., Srinivas A., Nikhil K.S., Vamshi T. Optimization and experimental analysis of mechanical properties and porosity on FDM based 3D printed ABS sample// Materials Today Proceedings. – 2023. doi: 10.1016/j.matpr.2023.10.096

46. Egamberdiev E., Turabdjano S., Akmalova G., Mukhtarova N., Ayubova I., Mirzakhmedova M., Rakhmonberdiev G. Obtaining paper from composition of different fibers and its analysis// E3S Web of Conferences. – 2023. – Vol. 371. – P. 01004. doi: 10.1051/e3sconf/202337101004

47. Eltahir M.A., Aleryani O.A., Melaibari A., Abdelrahman A.A. Bending and vibration of a Bio-Inspired Bouligand composite plate using the Finite-Element method// Mechanics of Composite Materials. – 2024. – Vol. 59, № 6. – P. 1199–1216. doi: 10.1007/s11029-023-10166-y

48. Eyer P., Enzler S., Trauth A., Weidenmann K.A. Investigating the Mechanical Properties of Polymer Samples from Different Additive Manufacturing Processes Using Ultrasonic Phase Spectroscopy// 3D Printing and Additive Manufacturing. – 2022. – Vol. 11, № 2. – P. e666–e674. doi: 10.1089/3dp.2022.0148
49. Feng L., Fahrenholtz W.G., Brenner D.W. High-Entropy Ultra-High-Temperature borides and carbides: a new class of materials for extreme environments// Annual Review of Materials Research. – 2021. – Vol. 51, № 1. – P. 165–185. doi: 10.1146/annurev-matsci-080819-121217
50. Fernandes F.B., Braga A.M.B., De Souza A.L.S., Soares A.C. Mechanical formation damage control in permeability Biot's effective stress-sensitive oil reservoirs with source/sink term// Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2023. – Vol. 220. – P. 111180. doi: 10.1016/j.petrol.2022.111180
51. Gao Y., Chang C.-W., Roper J. et al. Single energy CT-based mass density and relative stopping power estimation for proton therapy using deep learning method// Frontiers in Oncology. – 2023. – Vol. 13.
52. Gao Y., Lalevée J., Simon-Masseron A. An overview on 3D printing of structured porous materials and their applications// Advanced Materials Technologies. – 2023. – Vol. 8, № 17. doi: 10.1002/admt.202300377
53. Grachev D.I., Chizhnikov E.A., Stepanov D.Y., Buslovich D.G., Khulaev I.V., Deshev A.V., Kirakosyan L.G., Arutyunov A.S., Kardanova S.Y., Panin K.S., Panin S.V. Dental material selection for the additive manufacturing of removable Complete dentures (RCD)// International Journal of Molecular Sciences. – 2023. – Vol. 24, № 7. – P. 6432. doi: 10.3390/ijms24076432
54. Griffiths L., Heap M.J., Xu T., Chen C., Baud P. The influence of pore geometry and orientation on the strength and stiffness of porous rock// Journal of Structural Geology. – 2017. – Vol. 96. – P. 149–160. doi: 10.1016/j.jsg.2017.02.006

55. Guillon O., Rheinheimer W., Bram M. A perspective on emerging and future sintering technologies of ceramic materials// *Advanced Engineering Materials*. – 2023. – Vol. 25, № 18. doi: 10.1002/adem.202201870
56. Gunda S., Natarajan S., Barrera O. On the fractional transversely isotropic functionally graded nature of soft biological tissues: Application to the meniscal tissue// *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*. – 2023. – Vol. 143. – P. 105855. doi: 10.1016/j.jmbbm.2023.105855
57. Guo H., Wang W., He C., Liu B., Yu D., Liu G., Gao X. Entropy-Assisted High-Entropy Oxide with a Spinel Structure toward High-Temperature Infrared Radiation Materials// *ACS Applied Materials & Interfaces*. – 2021. – Vol. 14, № 1. – P. 1950–1960. doi: 10.1021/acami.1c20055
58. Hafiz D.A., Bayumy A.B.Y., Sheta W.M., Hanan A.H. Interest point detection in 3D point cloud data using 3D Sobel-Harris operator// *International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence*. – 2015. – Vol. 29, № 7. – P. 1555014. doi: 10.1142/S0218001415550149
59. Han X., Cai H., Sun J., Wei Z., Huang Y., Meng L., Wang A. Numerical investigation on behaviors of composite laminates with initial delamination defects under impact and compression after impact// *Polymer Composites*. – 2022. – Vol. 44, № 1. – P. 413–431. doi: 10.1002/pc.27106
60. He Y., Shen Y., Tang B., An Q. Raman Spectroscopy Signatures of Boron-Rich Superhard Materials from Density Functional Theory// *The Journal of Physical Chemistry C*. – 2023. – Vol. 127, № 4. – P. 2104–2115. doi: 10.1021/acs.jpcc.2c08606
61. Hill R. The essential structure of constitutive laws for metal composites and polycrystals// *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. – 1967. – Vol. 15. – P. 79–95.
62. Hu Z., Feng X., Mu X., Song G., Zhang L., Gao Y. Eshelby tensors and effective stiffness of one-dimensional orthorhombic quasicrystal composite materials containing ellipsoidal particles// *Archive of Applied Mechanics*. – 2023. – Vol. 93, № 8. – P. 3275–3295. doi: 10.1007/s00419-023-02438-9

63. Huang J., Chen P., Li R., Fu K., Wang Y., Duan J., Li Z. Systematic evaluation of ultrasonic In-Line inspection techniques for oil and gas pipeline defects based on bibliometric analysis// *Sensors*. – 2024. – Vol. 24, № 9. – P. 2699. doi: 10.3390/s24092699
64. Hufenbach W., Böhm R., Gude M., Berthel M., Hornig A., Ručevskis S., Andrich M. A test device for damage characterisation of composites based on in situ computed tomography// *Composites Science and Technology*. – 2012. – Vol. 72, № 12. – P. 1361–1367. doi: 10.1016/j.compscitech.2012.05.007
65. Hyla B., Sobczak M., Synaszko P., Roemer J. Laser spot thermography and Pulse thermography – comparison of performance for non-destructive testing of composite structures// *The International Journal of Multiphysics*. – 2023. – Vol. 17, № 1. doi: 10.21152/1750-9548.17.1.91
66. Jalali M., Mohammadi K., Movahhedy M.R., Karimi F., Sadrnezhad S.K., Chernyshikhin S.V., Shishkovsky I.V. SLM Additive Manufacturing of NITI Porous Implants: A review of constitutive models, finite element simulations, manufacturing, heat treatment, mechanical, and biomedical studies// *Metals and Materials International*. – 2023. – Vol. 29, № 9. – P. 2458–2491. doi: 10.1007/s12540-023-01401-1
67. Jerban S., Ma Y., Alenezi S., Moazamian D., Athertya J., Jang H., Dorthe E., Dlima D., Woods G., Chung C.B., Chang E.Y., Du J. Ultrashort Echo Time (UTE) MRI porosity index (PI) and suppression ratio (SR) correlate with the cortical bone microstructural and mechanical properties: Ex vivo study// *Bone*. – 2023. – Vol. 169. – P. 116676. doi: 10.1016/j.bone.2023.116676
68. Ji W., Zhou R., Vivegananthan P., Wu M.S., Gao H., Zhou K. Recent progress in gradient-structured metals and alloys// *Progress in Materials Science*. – 2023. – Vol. 140. – P. 101194.
69. Kami M.R., Toufigh V. Ultrasonic evaluation for the detection of contact defects of the timber and fiber-reinforced polymer// *Structural Health Monitoring*. – 2022. – Vol. 22, № 4. – P. 2868–2887. doi: 10.1177/14759217221130499

70. Kanematsu N, Inaniwa T, Nakao M. Modeling of body tissues for Monte Carlo simulation of radiotherapy treatments planned with conventional x-ray CT systems // *Physics in Medicine and Biology* – 2016 – Vol. 61 № 5037–50.
71. Kanwar S., Al-Ketan O., Vijayavenkataraman S. A novel method to design biomimetic, 3D printable stochastic scaffolds with controlled porosity for bone tissue engineering// *Materials & Design*. – 2022. – Vol. 220. – P. 110857. doi: 10.1016/j.matdes.2022.110857
72. Kechagias J., Zaoutsos S. Effects of 3D-printing processing parameters on FFF parts' porosity: outlook and trends// *Materials and Manufacturing Processes*. – 2024. – Vol. 39, № 6. – P. 804–814. doi: 10.1080/10426914.2024.2304843
73. Kennedy S.M., Vasanthanathan A., Rb J.R., Amudhan K. Advancements and prospects of polymer-based hybrid composites for bone plate applications// *Polymer-Plastics Technology and Materials*. – 2023. – Vol. 63, № 1. – P. 68–87.
74. Khan I., Chinyoka T., Ismail E.A., Awwad F.A., Ahmad Z. MHD flow of third-grade fluid through a vertical micro-channel filled with porous media using semi implicit finite difference method// *Alexandria Engineering Journal*. – 2024. – Vol. 86. – P. 513–524. doi: 10.1016/j.aej.2023.11.070
75. Kharin N., Akifyev K., Spiridonova K., Statsenko E., Semenova E., Bolshakov P., Sachenkov O. Inter-track porosity and macroporosity insights into mechanical properties of FDM printed samples using in-situ 4D XCT// *International Journal of Mechanics and Materials in Design*. – 2025. – P. 1–19.
76. Kumar R.S., Balasundar P., Al-Dhabi N.A., Prithivirajan R., Ramkumar T., Bhat K., Senthil S., Narayanasamy P. A New Natural Cellulosic Pigeon Pea (*Cajanus cajan*) Pod Fiber Characterization for Bio-degradable Polymeric Composites// *Journal of Natural Fibers*. – 2019. – Vol. 18, № 9. – P. 1285–1295. doi: 10.1080/15440478.2019.1689887
77. Kumar S., Singh H., Singh I., Bharti S., Kumar D., Siebert G., Kolor S. A comprehensive review of FDM printing in sensor applications: Advancements

and future perspectives// *Journal of Manufacturing Processes*. – 2024. – Vol. 113. – P. 152–170. doi: 10.1016/j.jmapro.2024.01.030

78. Lee J., Kim J., Hong C., Oh T. Permeability Monitoring of Underground Concrete Structures using Elastic wave Characteristics with Biot's Model// *Research Square*. – 2024. doi: 10.21203/rs.3.rs-4446598/v1

79. Lekurwale S., Karanwad T., Banerjee S. Impact of laser power ratios on the prototyping of 3D printlets using selective laser sintering printer comprised of Infrared/Red-Diode Laser// *Journal of Materials Engineering and Performance*. – 2023. doi: 10.1007/s11665-023-09016-8

80. Li M., Jiang J., Liu W., Huang X., Wu X., Wei W., Zhu H., Zhang J., Xiao J., Dai H. Bioadaptable bioactive glass- $\beta$ -tricalcium phosphate scaffolds with TPMS-gyroid structure by stereolithography for bone regeneration// *Journal of Material Science and Technology*. – 2023. – Vol. 155. – P. 54–65. doi: 10.1016/j.jmst.2023.01.025

81. Li T., Peng Z., Lv Q., Li L., Zhang C., Pang L., Zhang C., Li Y., Chen Y., Tang X. SLS 3D Printing To Fabricate Poly(vinyl alcohol)/Hydroxyapatite Bioactive Composite Porous Scaffolds and Their Bone Defect Repair Property// *ACS Biomaterials Science & Engineering*. – 2023. – Vol. 9, № 12. – P. 6734–6744. doi: 10.1021/acsbmaterials.3c01014

82. Li X., Zheng J., Shao J., Loutou M., Bai C., Qiao Y., Miao Y., Wang X., Zheng T., Colombo P. Evaluation of porosity, mechanical and thermal properties of self-ignition coal gangue-based foams via fast microwave foaming// *Journal of Building Engineering*. – 2023. – Vol. 68. – P. 106062. doi: 10.1016/j.jobbe.2023.106062

83. Li Y., Song Y., Yang Z., Xie X. Use of line laser scanning thermography for the defect detection and evaluation of composite material// *Science and Engineering of Composite Materials*. – 2022. – Vol. 29, № 1. – P. 74–83. doi: 10.1515/secm-2022-0007

84. Li Y., Xiao X., Zhang Y., Tang Z., Pan A. Acoustic optimization design of porous materials on sandwich panel under flow-induced vibration//

International Journal of Aeroacoustics. – 2023. – Vol. 22, № 1–2. – P. 60–84. doi: 10.1177/1475472x221150180

85. Liu J., Jiang C., Yang X., Sun S. Review of the Application of acoustic Emission Technology in green Manufacturing// International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology. – 2023. doi: 10.1007/s40684-023-00557-w

86. Liu R., Yang H. Multimodal probabilistic modeling of melt pool geometry variations in additive manufacturing// Additive Manufacturing. – 2023. – Vol. 61. – P. 103375. doi: 10.1016/j.addma.2022.103375

87. Liu X., Zheng M., Chen G., Dang Z., Zha J. High-temperature polyimide dielectric materials for energy storage: theory, design, preparation and properties// Energy & Environmental Science. – 2022. – Vol. 15, № 1. – P. 56–81. doi: 10.1039/d1ee03186d

88. Liu Y., Rao X., Zhao H., Zhan W., Xu Y., Liu Y. Generalized finite difference method based meshless analysis for coupled two-phase porous flow and geomechanics// Engineering Analysis With Boundary Elements. – 2023. – Vol. 146. – P. 184–203. doi: 10.1016/j.enganabound.2022.10.011

89. Long X., Chong K., Su Y., Chang C., Zhao L. Meso-scale low-cycle fatigue damage of polycrystalline nickel-based alloy by crystal plasticity finite element method// International Journal of Fatigue. – 2023. – Vol. 175. – P. 107778. doi: 10.1016/j.ijfatigue.2023.107778

90. Luo F., Jiang X., Sun H., Mo D., Zhang Y., Shu R., Xue L. Microstructures, mechanical and thermal properties of diamonds and graphene hybrid reinforced laminated Cu matrix composites by vacuum hot pressing// Vacuum. – 2023. – Vol. 207. – P. 111610. doi: 10.1016/j.vacuum.2022.111610

91. Mandel J. Plasticité classique et viscoplasticité. – Vienna: Springer-Verlag, 1971. – (CISM Lecture Notes, Udine, Italy).

92. Mann G.S., Singh L.P., Kumar P., Singh S. Green composites: A review of processing technologies and recent applications// Journal of

Thermoplastic Composite Materials. – 2018. – Vol. 33, № 8. – P. 1145–1171. doi: 10.1177/0892705718816354

93. Maurice M.S., Barros N., Kachkachi H. Beyond the Maxwell Garnett approximation for interacting plasmonic nanoparticles: An analytical and numerical study// *Journal of Applied Physics*. – 2023. – Vol. 134, № 9. doi: 10.1063/5.0161031

94. Maya-Anaya D., Urriolagoitia-Sosa G., Romero-Ángeles B., Martínez-Mondragon M., German-Carcaño J.M., Correa-Corona M.I., Trejo-Enríquez A., Sánchez-Cervantes A., Urriolagoitia-Luna A., Urriolagoitia-Calderón G.M. Numerical analysis applying the finite element method by developing a complex Three-Dimensional biomodel of the biological tissues of the elbow joint using computerized axial tomography// *Applied Sciences*. – 2023. – Vol. 13, № 15. – P. 8903. doi: 10.3390/app13158903

95. Mirmahdi E., Afshari D., Ivanaki M.K. A review of ultrasonic testing applications in spot welding: Defect evaluation in experimental and simulation results// *Transactions of the Indian Institute of Metals*. – 2023. – Vol. 76, № 6. – P. 1381–1392. doi: 10.1007/s12666-022-02738-8

96. Mojumder S., Gan Z., Li Y., Amin A.A., Liu W.K. Linking process parameters with lack-of-fusion porosity for laser powder bed fusion metal additive manufacturing// *Additive Manufacturing*. – 2023. – Vol. 68. – P. 103500. doi: 10.1016/j.addma.2023.103500

97. Morshed S.M., Chesnokov E.M., Vikhoreva A.A. Biot effective stress parameter in poroelastic anisotropic media: Static and dynamic case// *Geophysical Prospecting*. – 2020. – Vol. 69, № 3. – P. 530–541. doi: 10.1111/1365-2478.13046

98. Naresh D., Raju R., Parveen S. Design and development of alternate layer printing method to reduce the porosity in FDM printing process// *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*. – 2023. doi: 10.1007/s12008-023-01624-x

99. Nakao M, Ozawa S, Yogo K, et al. Tolerance levels of mass density for CT number calibration in photon radiation therapy // *Journal of Applied Clinical Medical Physics* – 2019 – Vol. 20, P. 45–52.
100. Ni D., Cheng Y., Zhang J., Liu J., Zou J., Chen B., Wu H., Li H., Dong S., Han J., Zhang X., Fu Q., Zhang G. Advances in ultra-high temperature ceramics, composites, and coatings// *Journal of Advanced Ceramics*. – 2021. – Vol. 11, № 1. – P. 1–56. doi: 10.1007/s40145-021-0550-6
101. Ni T., Fan X., Zhang J., Zaccariotto M., Galvanetto U., Schrefler B.A. A Peridynamic-enhanced finite element method for Thermo–Hydro–Mechanical coupled problems in saturated porous media involving cracks// *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. – 2023. – Vol. 417. – P. 116376. doi: 10.1016/j.cma.2023.116376
102. Nivedhitha D.M., Jeyanthi S., Kumar S.V., Manoj A. An experimental and numerical investigation of Bio-Based polyurethane foam for acoustical applications// *CRC Press eBooks*. – 2023. – P. 285–307. doi: 10.1201/9781003270980-16
103. Okolie O., Latto J., Faisal N., Jamieson H., Mukherji A., Njuguna J. Manufacturing Defects in Thermoplastic Composite Pipes and Their Effect on the in-situ Performance of Thermoplastic Composite Pipes in Oil and Gas Applications// *Applied Composite Materials*. – 2022. – Vol. 30, № 1. – P. 231–306. doi: 10.1007/s10443-022-10066-9
104. Par M., Attin T., Tarle Z., Tauböck T.T. A new customized bioactive glass filler to functionalize resin composites: Acid-Neutralizing capability, degree of conversion, and apatite precipitation// *Journal of Clinical Medicine*. – 2020. – Vol. 9, № 4. – P. 1173. doi: 10.3390/jcm9041173
105. Peng B., Xu H., Song F., Wen P., Tian Y., Zheng Y. Additive manufacturing of porous magnesium alloys for biodegradable orthopedic implants: Process, design, and modification// *Journal of Material Science and Technology*. – 2024. – Vol. 182. – P. 79–110. doi: 10.1016/j.jmst.2023.08.072

106. Peng X., Peng Y., Huo M., Zhao J., Ma Q., Liu B., Deng C., Yang M., Dong B., Sun C., Chen G. High efficient pre-combustion CO<sub>2</sub> capture by using porous slurry formed with ZIF-8 and isoparaffin C16// *Separation and Purification Technology*. – 2023. – Vol. 305. – P. 122424. doi: 10.1016/j.seppur.2022.122424
107. Petrova V., Schmauder S., Georgiadis A. Thermal Fracture of Functionally Graded Coatings with Systems of Cracks: Application of a Model Based on the Rule of Mixtures// *Ceramics*. – 2023. – Vol. 6, № 1. – P. 255–264. doi: 10.3390/ceramics6010015
108. Pogorelko V.V., Mayer A.E. Dynamic tensile fracture of iron: Molecular dynamics simulations and micromechanical model based on dislocation plasticity// *International Journal of Plasticity*. – 2023. – Vol. 167. – P. 103678. doi: 10.1016/j.ijplas.2023.103678
109. Pournoori N., Soares G.C., Lukić B., Isakov M., Belone M.C.L., Hokka M., Kanerva M. In situ damage characterization of CFRP under compression using high-speed optical, infrared and synchrotron X-ray phase-contrast imaging// *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. – 2023. – Vol. 175. – P. 107766. doi: 10.1016/j.compositesa.2023.107766
110. Qian W., Wu S., Lei L., Hu Q., Liu C. Time lapse in situ X-ray imaging of failure in structural materials under cyclic loads and extreme environments// *Journal of Material Science and Technology*. – 2024. – Vol. 175. – P. 80–103. doi: 10.1016/j.jmst.2023.07.041
111. Qin F., Wei X., Lu Y., Zhang Z., Di J., Yin Z. Flexural behaviour of high strength engineered cementitious composites (ECC)-reinforced concrete composite beams// *Case Studies in Construction Materials*. – 2023. – Vol. 18. – P. e02002. doi: 10.1016/j.cscm.2023.e02002
112. Razinkov E., Saveleva I. On the Implementation of ALFA – Agglomerative Late Fusion Algorithm for Object Detection// *Lecture Notes in Computer Science*. – 2019. – Vol. 11455. – P. 98–103. doi: 10.1007/978-3-030-23987-9\_9

113. Razinkov E., Saveleva I., Matas J. ALFA: Agglomerative Late Fusion Algorithm for Object Detection// 24th International Conference on Pattern Recognition (ICPR). – 2018. – P. 2594–2599. doi: 10.1109/ICPR.2018.8545182
114. Riccio A., Castaldo R., Palumbo C., Russo A. Delamination effect on the buckling behaviour of Carbon–Epoxy composite typical aeronautical panels// Applied Sciences. – 2023. – Vol. 13, № 7. – P. 4358. doi: 10.3390/app13074358
115. Richter R.F., Vater C., Korn M., Ahlfeld T., Rauner M., Pradel W., Stadlinger B., Gelinsky M., Lode A., Korn P. Treatment of critical bone defects using calcium phosphate cement and mesoporous bioactive glass providing spatiotemporal drug delivery// Bioactive Materials. – 2023. – Vol. 28. – P. 402–419. doi: 10.1016/j.bioactmat.2023.06.001
116. Schwerz C., Bircher B.A., Küng A., Nyborg L. In-situ detection of stochastic spatter-driven lack of fusion: Application of optical tomography and validation via ex-situ X-ray computed tomography// Additive Manufacturing. – 2023. – Vol. 72. – P. 103631. doi: 10.1016/j.addma.2023.103631
117. Simeon P., Unkovskiy A., Sarmadi B.S., Nicic R., Koch P.J., Beuer F., Schmidt F. Wear resistance and flexural properties of low force SLA- and DLP-printed splint materials in different printing orientations: An in vitro study// Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials. – 2024. – P. 106458. doi: 10.1016/j.jmbbm.2024.106458
118. Sipiran I., Bustos B. Harris 3D: A robust extension of the Harris operator for interest point detection on 3D meshes// The Visual Computer. – 2011. – Vol. 27, № 11. – P. 963–976. doi: 10.1007/s00371-011-0610-y
119. Šleiniūtė A., Denafas G., Mumladze T. Analysis of the Delamination Process with Nitric Acid in Multilayer Composite Food Packaging// Applied Sciences. – 2023. – Vol. 13, № 9. – P. 5669. doi: 10.3390/app13095669
120. Spiridon I., Anghel N.C., Darie-Nita R.N., Iwańczuk A., Ursu R.G., Spiridon I.A. New composites based on starch/Ecoflex®/biomass wastes: Mechanical, thermal, morphological and antimicrobial properties// International

Journal of Biological Macromolecules. – 2020. – Vol. 156. – P. 1435–1444. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2019.11.185

121. Stefaniuk D., Kachanov M. Voigt-Reuss and Hashin-Shtrikman bounds revisited// International Journal of Engineering Science. – 2023. – Vol. 191. – P. 103903. doi: 10.1016/j.ijengsci.2023.103903

122. Sun H., Ramuhalli P., Jacob R.E. Machine learning for ultrasonic nondestructive examination of welding defects: A systematic review// Ultrasonics. – 2023. – Vol. 127. – P. 106854. doi: 10.1016/j.ultras.2022.106854

123. Sun Y., Roubin E., Shao J., Colliat J. Meso-scale Finite Element modeling of the Fracture Process Zone evolution for concrete// Theoretical and Applied Fracture Mechanics. – 2023. – Vol. 125. – P. 103869. doi: 10.1016/j.tafmec.2023.103869

124. Suquet P. Sur les equations de la plasticité: existence et régularité des solutions// Journal de Mécanique. – 1981. – Vol. 20. – P. 3–40.

125. Taherzadeh-Fard A., Cornejo A., Jiménez S., Barbu L.G. A rule of mixtures approach for delamination damage analysis in composite materials// Composites Science and Technology. – 2023. – Vol. 242. – P. 110160. doi: 10.1016/j.compscitech.2023.110160

126. Teixidó H., Staal J., Caglar B., Michaud V. Capillary effects in fiber reinforced Polymer Composite processing: a review// Frontiers in Materials. – 2022. – Vol. 9. doi: 10.3389/fmats.2022.809226

127. Tuhaise V.V., Tah J.H.M., Abanda F.H. Technologies for digital twin applications in construction// Automation in Construction. – 2023. – Vol. 152. – P. 104931. doi: 10.1016/j.autcon.2023.104931

128. Vidhu N., Gupta A., Salajeghe R., Spangenberg J., Marla D. A computational model for stereolithography apparatus (SLA) 3D printing// Progress in Additive Manufacturing. – 2023. doi: 10.1007/s40964-023-00525-5

129. Wang J., Zhu K., Zhang W., Zhu X., Lu X. Microstructural and defect evolution during WAAM resulting in mechanical property differences for AA5356

component// *Journal of Materials Research and Technology*. – 2023. – Vol. 22. – P. 982–996. doi: 10.1016/j.jmrt.2022.11.116

130. Wang X., Luo Z., Li Z., Zhao Q., Dai J. The impact of groundwater recharge on land subsidence: a case study from the Cangzhou test area, Hebei Province, China// *Hydrogeology Journal*. – 2023. – Vol. 31, № 3. – P. 813–825. doi: 10.1007/s10040-023-02603-y

131. Wang X., Wang Y., Zhang M., Liu H. Superhard BC<sub>2</sub>N in cubic diamondlike structure// *Physical Review B*. – 2023. – Vol. 107, № 13. doi: 10.1103/physrevb.107.134101

132. Wang Z., Wang C., Gao Y., Li Z., Shang Y., Li H. Porous thermal insulation polyurethane foam materials// *Polymers*. – 2023. – Vol. 15, № 18. – P. 3818. doi: 10.3390/polym15183818

133. Wilms M.B., Rittinghaus S., Goßling M., Gökce B. Additive manufacturing of oxide-dispersion strengthened alloys: Materials, synthesis and manufacturing// *Progress in Materials Science*. – 2023. – Vol. 133. – P. 101049. doi: 10.1016/j.pmatsci.2022.101049

134. Wu H., Han Y., Huang G., Zong N., Mao J., Shi H., Lu W. Configuration of new fiber-like structure driven high matching of strength-ductility in TiB reinforced titanium matrix composites// *Composites Part B: Engineering*. – 2022. – Vol. 231. – P. 109564. doi: 10.1016/j.compositesb.2021.109564

135. Xu R., Yu H., Dong H., Ye Y., Xie S. Preparation and properties of modified starch-based low viscosity and high consolidation foam dust suppressant// *Journal of Hazardous Materials*. – 2023. – Vol. 452. – P. 131238. doi: 10.1016/j.jhazmat.2023.131238

136. Xu X., Takeda S., Wisnom M.R. Investigation of fracture process zone development in quasi-isotropic carbon/epoxy laminates using in situ and ex situ X-ray Computed Tomography// *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. – 2023. – Vol. 166. – P. 107395. doi: 10.1016/j.compositesa.2022.107395

137. Yadav S.P., Pawade R.S. Manufacturing methods induced property variations in Ti6Al4V using High-Speed machining and additive manufacturing (AM)// *Metals*. – 2023. – Vol. 13, № 2. – P. 287. doi: 10.3390/met13020287
138. Yang F., Jiang T., Lalier G., Bartolone J., Chen X. Process control of surface quality and part microstructure in selective laser sintering involving highly degraded polyamide 12 materials// *Polymer Testing*. – 2021. – Vol. 93. – P. 106920. doi: 10.1016/j.polymertesting.2020.106920
139. Yang G., Xie Y., Zhao S., Qin L., Wang X., Wu B. Quality Control: internal defects formation mechanism of selective laser melting based on laser-powder-melt pool interaction: a review// *Chinese Journal of Mechanical Engineering: Additive Manufacturing Frontiers*. – 2022. – Vol. 1, № 3. – P. 100037. doi: 10.1016/j.cjmeam.2022.100037
140. Yang S., Yang Q., Qu Z., Wei K. Influence of manufacturing defects on mechanical behavior of the laser powder bed fused InVAR 36 alloy: In-Situ X-ray Computed Tomography Studies// *Materials*. – 2023. – Vol. 16, № 8. – P. 2956. doi: 10.3390/ma16082956
141. Yang Y., Xu Y., Ji Y., Wei Y. Functional epoxy vitrimers and composites// *Progress in Materials Science*. – 2021. – Vol. 120. – P. 100710. doi: 10.1016/j.pmatsci.2020.100710
142. Yao Y., Chen J., Liu J., Chen S. An alternative constitutive model for elastic particle-reinforced hyperelastic matrix composites with explicitly expressed Eshelby tensor// *Composites Science and Technology*. – 2022. – Vol. 221. – P. 109343. doi: 10.1016/j.compscitech.2022.109343
143. Yaylacı M., Öner E., Adıyaman G., Öztürk Ş., Yaylacı E.U., Birinci A. Analyzing of continuous and discontinuous contact problems of a functionally graded layer: theory of elasticity and finite element method// *Mechanics Based Design of Structures and Machines*. – 2023. – P. 1–19. doi: 10.1080/15397734.2023.2262562
144. Ye Y., Yang Q., Zhang J., Meng S., Wang J. A dynamic data driven reliability prognosis method for structural digital twin and experimental

validation// Reliability Engineering & System Safety. – 2023. – Vol. 240. – P. 109543. doi: 10.1016/j.ress.2023.109543

145. Yun-Xia H., Chao G., Shan-Min W., Yu-Sheng Z. Opportunities and challenges for nanostructured superhard materials// wuli.iphy.ac.cn. – n.d. doi: 10.7693/wl20230403

146. Yusufov A., Khamidov O., Zayniddinov N., Abdurasulov S. Prediction of the stress - strain state of the bogie frames of shunting locomotives using the finite element method// E3S Web of Conferences. – 2023. – Vol. 401. – P. 03041. doi: 10.1051/e3sconf/202340103041

147. Zaitsev A.A., Lopatin S.S., Fozilov T.T., Babaytsev A.V. Application of a Pantographic Design Obtained by the Method of SLM Printing and Study of the Influence of Postprocessing with Application of Damping Coatings// Journal of Machinery Manufacture and Reliability. – 2023. – Vol. 52, № 4. – P. 361–366. doi: 10.3103/s1052618823040180

148. Zhang M., Sun H., Song C. et al. Pores evolution of soft clay under loading/unloading process// Applied Sciences. – 2020. – Vol. 10, № 23. – P. 8468. doi: 10.3390/app10238468

149. Zhang S., Zhuang Q., Zhang M., Wang H., Gao Z., Sun J., Yuan J. Poly(ionic liquid) composites// Chemical Society Reviews. – 2020. – Vol. 49, № 6. – P. 1726–1755. doi: 10.1039/c8cs00938d

150. Zhang W., Zhang S., Wei J., Huang Y. Flexural behavior of SFRC-NC composite beams: An experimental and numerical analytical study// Structures. – 2024. – Vol. 60. – P. 105823. doi: 10.1016/j.istruc.2023.105823

151. Zhang X., Gui Y., Lai M., Lu X., Gu J., Wang F., Yang T., Wang Z., Song M. Enhanced strength-ductility synergy of medium-entropy alloys via multiple level gradient structures// International Journal of Plasticity. – 2023. – Vol. 164. – P. 103592.

152. Zhang X., Ning R., Yang D. Cone beam breast CT noise reduction using 3D adaptive Gaussian filtering// Journal of X-ray Science and Technology. – 2009. – Vol. 17, № 4. – P. 319–333.

153. Zhao C., Wang Z., Zhu Z., Guo Q., Wu X., Zhao R. Research on different types of fiber reinforced concrete in recent years: An overview// *Construction and Building Materials*. – 2023. – Vol. 365. – P. 130075. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.130075

154. Zhao K., Su Z., Ye Z., Cao W., Pang J., Wang X., Wang Z., Xu X., Zhu J. Review of the types, formation mechanisms, effects, and elimination methods of binder jetting 3D-printing defects// *Journal of Materials Research and Technology*. – 2023. – Vol. 27. – P. 5449–5469. doi: 10.1016/j.jmrt.2023.11.045

155. Zhou Y., Tian Y., Peng X. Applications and challenges of supercritical foaming technology// *Polymers*. – 2023. – Vol. 15, № 2. – P. 402. doi: 10.3390/polym15020402

156. Zou Y., Zheng K., Zhou Z., Zhang Z., Guo J., Jiang J. Experimental study on flexural behavior of hollow steel-UHPC composite bridge deck// *Engineering Structures*. – 2023. – Vol. 274. – P. 115087. doi: 10.1016/j.engstruct.2022.115087

157. Zuo Q., Wang C., Pei X., Lin L., Li Y., Sun W. Analysis and prediction of tensile properties based on rule of mixtures model for multi-scale ramie plain woven fabric reinforced composite// *Composite Structures*. – 2023. – Vol. 311. – P. 116785. doi: 10.1016/j.compstruct.2023.116785