

На правах рукописи



Харин Никита Вячеславович

**Методика оценки механических свойств пористых материалов,
изготовленных методом послойного наплавления**

Специальность 1.1.8. – «Механика деформируемого твердого тела»

Автореферат диссертации на соискателя ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва 2026

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Казанский (Приволжский) федеральный университет».

Научный руководитель: **Саченков Оскар Александрович** кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой компьютерной математики и информатики федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Казанский (Приволжский) федеральный университет», г. Казань

Официальные оппоненты: **Маслов Леонид Борисович** доктор физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой «Теоретическая и прикладная механика» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», г. Иваново

Садырин Евгений Валерьевич кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории механики биосовместимых материалов НОЦ «Материалы» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Донской государственный технический университет», г. Ростов-на-Дону

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского», г. Саратов

Защита диссертации состоится 28 октября 2026 г. в 13⁰⁰ на заседании диссертационного совета 24.2.327.07 при федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» по адресу: 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» по адресу: 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4. и на сайте: https://mai.ru/events/defence/?ELEMENT_ID=187734

Автореферат разослан «___» _____ 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
24.2.327.07



Сердюк Д.О.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования: Современные технологии позволяют создавать материалы с улучшенными функциональными и механическими свойствами, такие как метаматериалы, биоактивные стёкла, композиты и материалы, устойчивые к высоким температурам. Однако неоднородная внутренняя структура таких материалов и наличие производственных дефектов затрудняют оценку их механических характеристик в реальных изделиях. Классические методы анализа, основанные на предположении об идеальных условиях производства, не учитывают внутренние дефекты, что приводит к значительному разбросу механических свойств. Например, при аддитивном производстве титана (методом селективного лазерного плавления или методом лазерного спекания порошкового слоя) возникают микродефекты, снижающие прочность. При моделировании методом наплавления в изделиях образуются межслойные пустоты, которые могут быть частично устранены при последующей термической обработке.

Для выявления дефектов, возникающих в процессе производства, широко применяются методы неразрушающего контроля. Одним из самых информативных методов неразрушающего контроля является рентгеновская компьютерная томография. Однако данный метод не позволяет изучать изменение внутренней структуры под действием механической нагрузки. Для этого необходимо дополнительное использование специализированных оснасток (*in situ* оснастки), которые позволяют нагружать образец непосредственно внутри компьютерного томографа с одновременным сканированием изучаемого объекта.

Проведение комплексных *in situ* испытаний, сочетающих механические испытания с рентгеновской томографией, является трудоёмким, длительным и дорогостоящим процессом. Следовательно, возникает необходимость в разработке и применении математических подходов, позволяющих оценивать

влияние производственных дефектов на эффективные механические свойства изделий, изготовленных методами аддитивного производства.

Целью диссертационной работы является разработка математической модели и методики оценки эффективных физико-механических свойств пористых материалов с учетом особенностей их внутренней структуры, изготовленных методом послойного наплавления. Для достижения цели решаются следующие **задачи**:

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

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

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

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

Методология 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* проводилось 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).

Достоверность и обоснованность результатов исследования обеспечивается использованием сертифицированного оборудования, корректной постановкой задач, строгим соблюдением экспериментальных процедур, а также верификацией полученных данных с помощью численного моделирования и результатов 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.

Научная новизна работы заключается в получении следующих результатов:

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

2. 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;

3. предложен метод анализа неоднородных материалов под сжимающими нагрузками с использованием рентгеновской компьютерной

томографии и разработана экспериментальная оснастка и методика проведения *in situ* испытаний;

4. 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.

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 от 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 состоит в определении области применимости полученной инженерной формулы, позволяющей скорректировать значения механических свойств изделий с учетом 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. На защиту выносятся:

1. математическая модель для оценки эффективных механических свойств пористых материалов, изготовленных методом послойного наплавления, с учетом влияния межслойных дефектов на упругие характеристики;

2. инженерная формула для количественной оценки эффективных механических свойств при наличии межслойных дефектов, возникающих при аддитивном производстве методом послойного наплавления, и область применимости формулы;

3. 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;

4. результаты анализа численных и натуральных *in situ* экспериментов, показывающие влияние межслойной пористости и макропористости на изменение эффективных механических свойств и внутреннюю структуру материалов, изготовленных методом послойного наплавления, под действием сжимающей нагрузки.

Апробация основных результатов 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», 1 статья в журнале, включенная в Перечень ВАК Минобрнауки РФ. Также 2 публикации опубликованы в изданиях, индексируемых в базах данных Web of Science, Scopus. Помимо этого, получен 1 патент на изобретение, зарегистрировано 4 программы для ЭВМ и опубликовано 10 тезисов докладов.

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 натуральных 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 [1] 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 [2] применил лично 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. В работе [3] проводил 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. В работе [4] проводил численных эксперименты, анализировал полученные результаты, показавший зависимость эффективных модулей упругости от эллиптичности и размера пор. Полученные результаты были применены в статье для оптимизации конструкции эндопротеза тазобедренного сустава. В работе [5] проводил экспериментальное исследование 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.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа общим объемом 149 страниц состоит из введения, пяти глав, заключения и списка

литературы, включающего 157 источник. Текст иллюстрируется 50 рисунками и 10 таблицами.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Первая глава диссертации носит обзорный характер и посвящена современному состоянию исследований неоднородных структур, включая методы их изготовления, а также подходы к анализу физико-механических характеристик.

Во второй главе выделены характерные дефекты, возникающие при производстве изделий методом послойного наплавления, и построена феноменологическая математическая модель для оценки их влияния на эффективные упругие свойства. Установлено, что межслойная пористость имеет вытянутую (игловидную или эллипсоидную) форму и обусловлена недостаточной адгезией между слоями (Рис. 1).

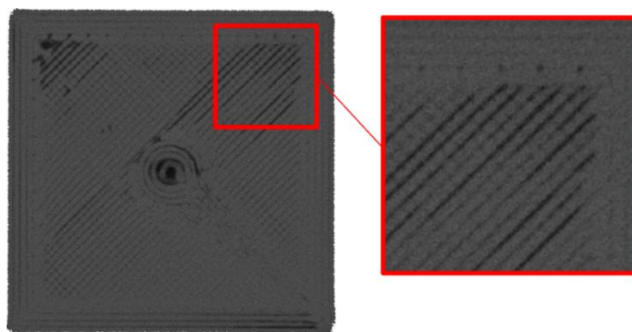


Рис. 1 – Результаты компьютерной томографии образцов с межслойными дефектами.

Для описания гетерогенной структуры применён двухмасштабный подход гомогенизации. Локальная деформация представлена как сумма макроскопической $\boldsymbol{\varepsilon}^*(\vec{u}^*)$ и флуктуационной $\boldsymbol{\varepsilon}'(\vec{u}')$ компонент:

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \boldsymbol{\varepsilon}^*(\vec{u}^*) + \boldsymbol{\varepsilon}'(\vec{u}'), \quad (1)$$

где $\vec{u}^*(x)$ – вектор макроскопического перемещения, а $\vec{u}'(y)$ – вектор флуктуационного перемещения с условием $\langle \vec{u}' \rangle_V = 0$.

Задача на представительном объёме имеет вид:

$$\begin{cases} \boldsymbol{\sigma}(y) = \mathbf{C}(y) : \boldsymbol{\varepsilon}(y) = \mathbf{C}(y) : [\boldsymbol{\varepsilon}^* + \boldsymbol{\varepsilon}'(\vec{u}'(y))] \\ \operatorname{div} \boldsymbol{\sigma} = 0 \\ \text{граничные условия} \end{cases} \quad (2)$$

Задача (2) является линейной, решение которой может быть разложено, используя принцип суперпозиции, как линейная комбинация шести независимых компонент тензора деформации:

$$\vec{u}'(y) = \sum_{k=1}^3 \sum_{l=1}^3 \vec{u}^{kl}(y) \varepsilon^*_{kl}, \quad (3)$$

где \vec{u}^{kl} – это характеристические перемещения, полученные путем решения задачи (2) при заданных граничных условиях и соответствующих макроскопических деформаций.

Полагая что $\varepsilon^{ij} = \varepsilon(\vec{u}^{ij}(y))$, получим следующее:

$$\varepsilon'(\vec{u}') = \sum_{k=1}^3 \sum_{l=1}^3 \varepsilon(\vec{u}^{kl}(y)) \varepsilon^*_{kl}, \quad (4)$$

Подставляя (4) в выражение (1), получаем:

$$\begin{aligned} \varepsilon'(\vec{u}') &= \varepsilon(\vec{u}^{kl}(y)) : \varepsilon^*, \\ D_{ijkl} &= \left(I_{ijkl} + \varepsilon_{ij}(\vec{u}^{kl}(y)) \right), \\ I_{ijkl} &= \frac{1}{2} (\delta_{ik} \delta_{jl} + \delta_{il} \delta_{jk}). \end{aligned} \quad (5)$$

Усреднение напряжений приводит к выражению для эффективного тензора упругих констант:

$$\mathbf{C}^{hom} = \langle \mathbf{C} : \mathbf{D} \rangle. \quad (6)$$

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

$$\mathbf{S}^{hom} = \langle \mathbf{S} : \mathbf{A} \rangle. \quad (7)$$

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 справедлива следующая оценка:

$$\mathbf{C}^{hom} : \mathbf{S}^{hom} = \mathbf{I} + O((d/l)^3), \quad (8)$$

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

Рассмотрим представительный элемент, содержащий пору, которую в дальнейшем будем называть макропорой. Среднее напряжение, возникающее в представительном элементе, обозначим как σ^* . Воспользуемся аддитивным разложением средних напряжений:

$$\sigma^* = \langle \sigma \rangle = \sigma^0 + \sigma^P, \quad (9)$$

где σ^P – это тензор напряжений, возникающий от наличия пор, σ^0 – тензор напряжений без дефектов и проектировочных пор.

Для представительного элемента с макропорой межслойными дефектами используется аддитивное разложение деформаций:

$$\varepsilon^P = \varepsilon^M + \varepsilon^{IT}, \quad (10)$$

где ε^M – тензор деформаций от макропоры, ε^{IT} – тензор деформации от микропористости.

Тогда, используя (8), (9), принцип взаимности и обобщенный закон Гука, получим следующее выражение:

$$C^{hom} : \varepsilon^0 = C : \varepsilon^0 - C : \varepsilon^M - C : \varepsilon^{IT}. \quad (11)$$

Таким образом, в рамках линейной теории упругости вклад проектировочной поры и межслойных дефектов аддитивен.

Для определения области применимости данной теории был проведен численный эксперимент одного межслойного дефекта. Размер дефекта задавался при помощи безразмерных параметров: эллиптичность λ и размер поры β . Зона применимости определялась из условия линейного изменения модуля упругости в зависимости от безразмерных параметров с коэффициентом детерминации $R^2 > 0.95$, а затем пересчитывалась для значения объемной доли пористости ρ образца по формуле:

$$\rho(\lambda, \beta) = \frac{\pi}{6} \lambda^2 \beta^3. \quad (12)$$

Впоследствии была получена зона применимости для пористости относительно безразмерных параметров (красная пунктирная линия на Рис.2).

Из расчётов следует, что форму и распределение межслойной пористости можно не учитывать, в случае если объем межслойной пористости составляет до 4.4%. В случае если пористость лежит в диапазоне от 4.4% до 8.8%, необходимо учитывать влияние формы пор.

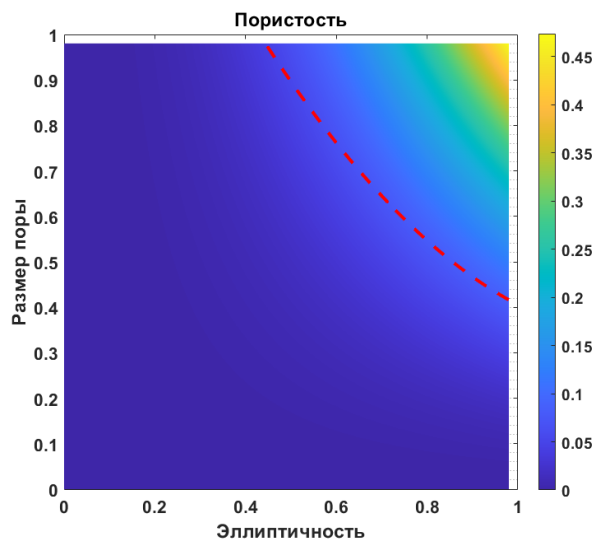


Рис. 2 – Значение пористости в зависимости от безразмерных параметров.

Для верификации модели был предложен алгоритм генерации микроструктуры образцов, соответствующих реальному процессу изготовления методом послойного наплавления. Суть алгоритма заключается в учете ключевых особенностей послойного наплавления. В частности, максимальный поперечный диаметр возможного возникающего дефекта, ограничивается диаметром сопла экструдера. На основе данного алгоритма был сгенерирован ансамбль из 1000 численных образцов для структуры II и III (Рис.3).

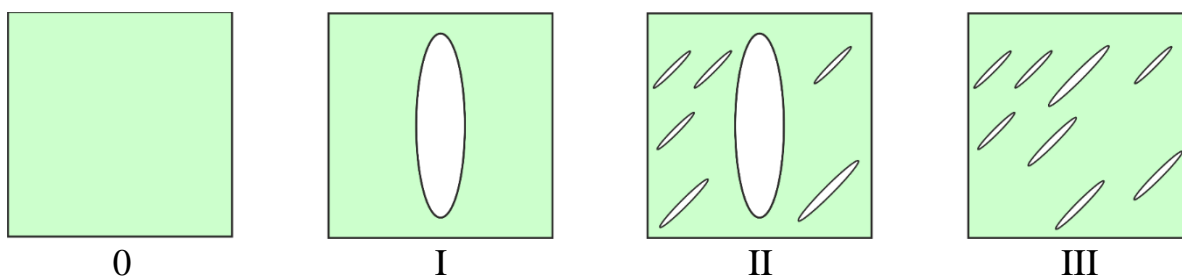


Рис. 3 – Центральное сечение образцов: 0 – сплошной образец, I – образец с макропорой II – образец с макро и микропорами, III – образец с микропористостью.

На этапе проектирования изделия, содержащего заранее заданные геометрические особенности, его эффективные свойства могут быть

определены на основе численных испытаний. Тогда предлагается записать следующее:

$$\mathbf{C}^{pr} : \boldsymbol{\varepsilon}^0 = \mathbf{C} : \boldsymbol{\varepsilon}^0 - \mathbf{C} : \boldsymbol{\varepsilon}^M, \quad (13)$$

где \mathbf{C}^{pr} – это эффективный тензор упругих констант проектировочного образца.

Тогда формулу (11) можно записать следующим образом:

$$\mathbf{C}^{hom} : \boldsymbol{\varepsilon}^0 = \mathbf{C}^{pr} : \boldsymbol{\varepsilon}^0 - \mathbf{C} : \boldsymbol{\varepsilon}^{IT}, \quad (14)$$

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

$$\mathbf{S}^{pr} : \mathbf{C}^{hom} = \mathbf{I} - \mathbf{S}^{pr} : \mathbf{C} : \mathbf{G} \quad (15)$$

или

$$\begin{aligned} \mathbf{C}^{hom} &= \mathbf{C}^{pr} : (\mathbf{I} - \mathbf{K}^h), \\ \mathbf{K}^h &= \mathbf{S}^{pr} : \mathbf{C} : \mathbf{G}, \end{aligned} \quad (16)$$

где \mathbf{S}^{pr} – это тензор податливости для проектировочных образцов, \mathbf{G} – это тензор четвертого ранга связывающий микродеформацию $\boldsymbol{\varepsilon}^{IT}$ и деформацию материала $\boldsymbol{\varepsilon}^0$.

На основе численных экспериментов было показано, что вклад межслойной пористости в общее снижение жёсткости может быть аппроксимирован скалярной поправкой, пропорциональной объёмной доле пор:

$$\mathbf{C}^{hom} = \mathbf{C}^{pr} (1 - \rho^{IT}), \quad (17)$$

Таким образом, разработана инженерная зависимость для определения эффективных упругих характеристик изделий, учитывающая вклад межслойной пористости и устанавливающая её область применимости.

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

Для изготовления компонентов оснастки (шпильки, крышка и фланцы) был выбран дюралюминий марки Д16Т. Данные компоненты оснастки рассчитывались на прочность в соответствии с ГОСТ 26158-84. Для уменьшения возникновения артефактов, возникающих от нагружающего винта

и динамометра, были разработаны специальные композитные проставки. Общий вид разработанной оснастки и системы управления показан на рисунке 4а. На рисунке 4б представлена оснастка, установленная в РКТ.

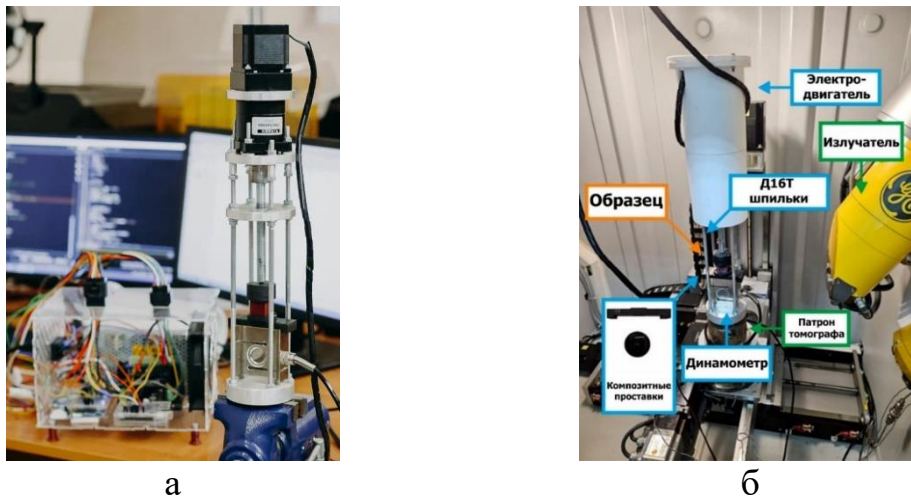


Рис. 4 – Разработанная оснастка: а – оснастка и управляющее устройство; б – оснастка внутри РКТ.

В четвертой главе представлены методы обработки экспериментальных данных, получаемых с помощью разработанного устройства. В главе описаны методы обработки данных компьютерной томографии с целью количественной оценки структурных параметров, подсчета физико-механических характеристик и оценки погрешности измерений.

Для использования данных, полученных при помощи компьютерного томографа, в качестве экстензометрических измерений необходимо разработать автоматизированный метод, позволяющий рассчитывать поле перемещений по реперным точкам исследуемого образца.

Томография представляет собой трёхмерный массив вокселей с коэффициентом рентгеновского ослабления η .

$$\eta(x, y, z) = \eta \in N, \forall x, y, z \in \Omega, \quad (18)$$

где $\Omega \in \mathbb{R}^3$ – набор точек, полученной компьютерной модели.

Для подавления шума и одновременного сохранения значимых структурных деталей применяется трёхмерная гауссова фильтрация. Сегментация многофазной структуры выполняется с использованием метода ядерной оценки плотности распределения значений η . Этот подход позволяет

автоматически определить пороговые уровни и сформировать бинарные маски, выделяющие отдельные фазы.

Для оценки деформаций вводится система реперных точек, автоматически детектируемых с помощью алгоритма Харриса обобщенного для трёхмерных данных с уточнением положения по градиенту интенсивности. Траектории перемещений реперных точек между шагами нагружения восстанавливались с использованием меры бутылочного горлышка.

Поле перемещений интерполируется во всём объёме образца на основе полиномов Лагранжа, а тензор деформаций вычисляется через матрицу градиентов. Пористость определялась как отношение объёма пор к общему объёму деформированного образца.

Для оценки достоверности полученных результатов на каждом шаге нагружения рассчитывается оптическая масса образца для каждой отдельной фазы. Оптическая масса p -ой фазы на i -ом шаге вычисляется по следующей формуле:

$$m_i^p = V_{vox} \cdot \sum_{H_i^p \in M_p} H_i^p, \quad (19)$$

где m_i^p – оптическая масса образца на i -ом шаге нагружения для p -го фазы материала, H_i^p – значение нормированной проницаемости вокселя, V_{vox} – объём вокселя.

Относительное отклонение оптической массы можно записать следующим образом:

$$\partial m_i^p = \frac{m_i^p - m_0^p}{m_0^p}. \quad (20)$$

В работе показано, что величина ∂m позволяет дать оценку сверху на возможные ошибки оценки линейных и объёмных измерений, связанных с погрешностями сегментации.

В пятой главе представлены результаты экспериментальных исследований, направленных на верификацию разработанной инженерной

модели оценки эффективных упругих характеристик образцов с эллипсоидальной пористостью, полученных методом послойного наплавления.

Исследуемые образцы представляют собой кубы, содержащие закрытую эллипсоидальную пору. Геометрия поры описывалась безразмерными параметрами: λ – отношение малой полуоси к большей, β – относительный размер поры, и φ – угол между направлением нагрузки и большой полуосью поры (Рис. 5).

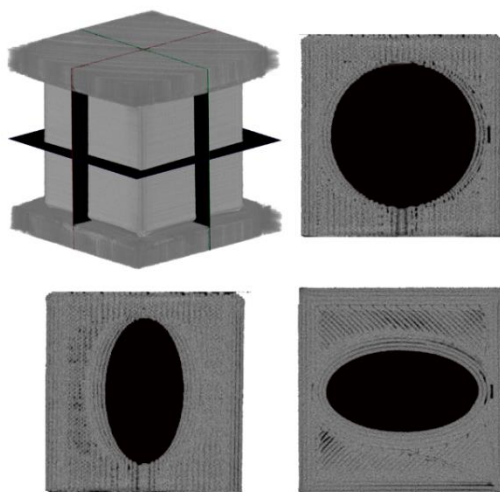


Рис. 5 – Томограмма образца из PLA-пластика в проекциях.

Для анализа физико-механических свойств образцов проводились испытания на универсальной испытательной машине, исследование при помощи разработанной *in situ* оснастки совместно со сканированием компьютерным томографом. В качестве определяемых параметров, по полученной диаграмме, выступают: модуль упругости, верхний предел текучести, нижний предел текучести и угол линии текучести. Все полученные параметры нормировались на параметры сплошного образца.

Для оценки эффективного модуля упругости пористого образца (E_{eff}) предлагается аппроксимирующая кривая, суть которой отношение площади критического сечения, исследуемых образцов, относительно сплошного образца (E_M).

$$\frac{E_{eff}(\varphi)}{E_M} = 1 - \frac{a_1 + a_4 \cos(2\varphi)}{a_2 (\sin(\varphi)^2 + a_3 \cos(\varphi)^2)^2 \cdot A} \quad (21)$$

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

По значениям нормированной проницаемости для каждого шага нагружения и для каждого образца рассчитывалось относительное отклонение массы по формуле (20). Отклонение оптической массы не превышало 8%. При производстве методом послойного наплавления возникают межслойные дефекты, которые приводят к разбросу механических характеристик (Рис. 6).

Дополнительно были проведены численные расчеты на модели без учета межслойной пористости. Результаты численного моделирования, красная линия на рисунке 6, получились завышенными, так как в численной модели не учитывается пористость, возникающая при производстве. При добавлении влияния межслойной в численное решение по формуле, показанной в главе 2, результаты численного исследования приближаются к экспериментальным данным. Коэффициенты a_i были определены на основе формулы критического сечения и построена регрессионная кривая – серая линия на рисунке 6.

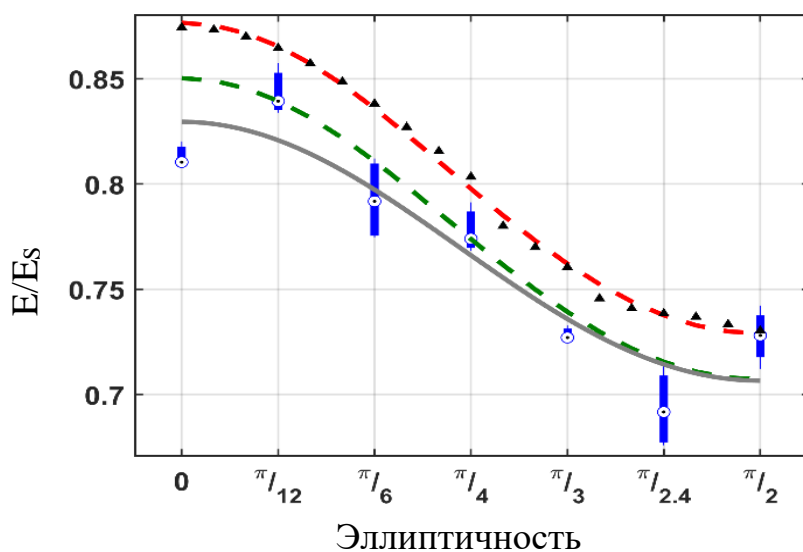


Рис. 6 – Нормированные значения модуля упругости, где ящик с усами – нормированные значения модуля упругости в ходе натурального эксперимента, серая линия – аппроксимирующая кривая натуральных экспериментов, треугольники – нормированное значение модуля упругости численного испытания, красная линия – аппроксимирующая кривая численного эксперимента, зеленая линия – аппроксимирующая кривая численного эксперимента с добавлением пористости межслойных дефектов.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

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 ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в журналах из перечня ВАК:

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

2. 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 пораами, под действием внешней нагрузки// Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки. – 2024. – № 3 (114). – С. 70–91.

3. 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.

Публикации в журналах индексируемых Scopus и Web of Science:

4. 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.

5. 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.

Свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ

6. 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.

7. Герасимов О.В., Саченков О.А., Балтина Т.В., Харин Н.В. Программа определения механических свойств образцов из негомогенных 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.

8. 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.

9. 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.

Патент на изобретение

10. 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.

Публикации в сборниках трудов конференций

11. 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, 29 февраля – 02 2024 года. – Москва: Общество с ограниченной ответственностью "Центр полиграфических услуг " РАДУГА", 2024. – С. 332.

12. 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, Кремёнки, 20–24 мая 2024 года. – Москва: ООО "ТРП", 2024. – С. 11-12.

13. Харин Н.В., Бережной Д.В., Акифьев К.Н., Большаков П.В., Саченков О.А., Спиридонова К.О. 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, Кремёнки, 20–24 мая 2024 года. – Москва: ООО "ТРП", 2024. – С. 215-216.

14. Большаков П. В., Харин Н. В., Акифьев К. Н. и Хамзин Д.Э., Спиридонова К.О., Саченков О.А. 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, Кремёнки, 20–24 мая 2024 года. – Москва: ООО "ТРП", 2024. – С. 55-56.

15. Харин Н.В., Акифьев К.Н., Багаутдинов И.А., Агафонов А.А., Большаков П.В., Саченков О.А. Оптимизация микроструктуры изделия для производства аддитивными технологиями // Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред: Материалы XXIX Международного симпозиума им. А.Г. Горшкова, Кремёнки, 15–19 мая 2023 года. – Москва: Общество с ограниченной ответственностью "ТРП", 2023. – С. 208-209.

16. Харин Н.В., Акифьев К.Н., Семенова Е.В., Спиридонова К.О., Стаценко Е.О., Саченков О.А., Большаков П.В. Исследование структурных изменений пористых образцов под нагрузкой // Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред: Материалы XXIX Международного симпозиума им. А.Г. Горшкова, Кремёнки, 15–19 мая 2023 года. – Москва: Общество с ограниченной ответственностью "ТРП", 2023. – С. 209-210.

17. 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, Санкт-Петербург, 12–13 октября 2023 года. – Санкт-Петербург: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого", 2023. – С. 54-57.

18. 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. – Санкт-Петербург: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого", 2023. – С. 97-100.

19. 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, Кремёнки, 16–20 мая 2022 года. Том 1. – Москва: ООО "ТРП", 2022. – С. 5-7.

20. 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, Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, 2024. – С. 115.