

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет МИСиС»

Львов Владислав Александрович

Структура и физико-механические свойства биомедицинских метаматериалов с отрицательным коэффициентом Пуассона

1.3.8. «Физика конденсированного состояния»

Автореферат диссертации  
на соискание ученой степени кандидата *физико-математических* наук

Научный руководитель: к.ф.-м.н. Сенатов Фёдор Святославович

Москва – 2022

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы исследования

Разработка медицинских изделий для возмещения дефектов позвоночного столба остается актуальной проблемой в современной вертебральной хирургии. Необходимость в возмещении дефектов обуславливается развитием опухолевых процессов, разрушением костной ткани и межпозвоночных дисков вследствие травмы или возрастных изменений. Процессы старения и травмы могут привести к дегенерации межпозвоночных дисков и вызвать нежелательную компрессию соседних позвонков и спинномозговых нервов, что вызывает боль и влияет на качество жизни значительной части взрослого населения. Межпозвоночные диски выполняют функцию амортизатора механических нагрузок и обеспечивают определенный угол сгибания, скручивания и вращения между соседними позвонками.

Хирургические решения, используемые для замены или реконструкции межпозвоночных дисков, делятся на следующие группы: искусственные диски и устройства для соединения позвонков, такие как межтеловые спинальные кейджи. Искусственные диски обычно сочетают в себе центральный гибкий элемент, окруженный двумя жесткими пластинами, закрепленными на соседних позвонках. Среди межтеловых спинальных кейджей распространены кольцеобразные, коробчатые и цилиндрические кейджи, которые во всех случаях обычно заполняются костными трансплантатами или синтетическими аналогами. Межтеловые кейджи производятся из таких материалов, как металлические сплавы (Ti-6Al-4V, NiTi, сталь), и высокомолекулярные полимеры, такие как полиэфирэфиркетон (ПЭЭК). В качестве синтетической замены костного трансплантата интерес представляют нерезорбируемые материалы на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ). СВМПЭ активно применяется в эндопротезировании тазобедренного и коленного суставов, а также в отдельных случаях челюстно-лицевой хирургии. Рассматривая межтеловые кейджи, как наиболее распространённый метод реконструкции межпозвоночных дисков, то согласно клиническим исследованиям: в 12% случаев отмечалась миграция кейджа и в 5% полное разрушение кейджа, которое вызвано эффектом «экранирования напряжений».

Для решения выявленных проблем в области биомедицины и разработки медицинских изделий выделяются аддитивные метаматериалы, формируемые методами 3D-печати и лежащие в их основе сотовые структуры, обладающие возможностью оптимизации биомеханических характеристик и потенциальным использованием в медицинских изделиях. Оптимизация механических характеристик аддитивных, таких как

модуль Юнга, жесткость структуры и других, может достигаться за счет корректировки геометрии элементарной ячейки ауксетика. Геометрия образующая ауксетические метаматериалы может сыграть важную роль в варьировании механических свойств спинальных межтеловых кейджей, потенциально снижая эффект экранирования напряжений и увеличения срока службы изделия.

Настоящая диссертационная работа имеет в своей структуре три объекта исследований. Первый объект исследований затрагивает изучение влияния геометрических параметров ячейки ауксетического метаматериала и сотовой структуры полученных методами 3D-печати из различных типов материалов на механические характеристики при статических и усталостных испытаниях на сжатие. Второй объект направлен на создание расчетной моделей ауксетического метаматериала и сотовой структуры для определения смещений при одноосных сжимающих нагрузках. Третий объект исследований заключается в оптимизации спинальных межтеловых кейджей на основе ауксетического метаматериала с целью улучшения механических характеристик при статических и динамических нагрузках.

### **Целью диссертационной работы является**

Исследование связи между механическими и параметрическими характеристиками ячеек ауксетического метаматериала и сотовой структуры для увеличения функциональности спинальных межтеловых кейджей, полученных методом 3D-печати.

### **Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:**

- Разработка методики создания трехмерных ауксетических метаматериалов и сотовых структур с использованием параметрической системы элементарной конфигурации с взаимосвязанными размерами;
- Разработка расчетной модели ауксетического метаматериала и сотовой структуры с использованием методов конечных элементов и машинного обучения;
- Исследование механических свойств ауксетического метаматериала и сотовой структуры, полученных методами 3D-печати из различных типов материалов, при испытаниях на статическое сжатие, усталостных малоцикловых нагружениях и при помощи компьютерной симуляции статических испытаний на сжатие;
- Разработка методики создания биомедицинского изделия путем оптимизации коммерчески доступного межтелового кейджа под ауксетический метаматериал с использованием параметрического твердотельного моделирования в системе автоматизированного проектирования (САПР);

- Создание экспериментального прототипа каркаса спинального межтелового кейджа на основе ауксетического метаматериала методом 3D печати;
- Исследование механических свойств прототипа спинального межтелового кейджа на основе ячеек ауксетического метаматериала и сотовой структуры в сравнении с типовым коробчатым кейджем при испытаниях на статическое сжатие, усталостных малоцикловых нагружениях и при помощи компьютерной симуляции статических испытаний на сжатие.

### **Научная новизна**

1. Предложена расчетная модель для трехмерной элементарной ячейки ауксетического метаматериала и сотовой структуры, разработанная с помощью методов конечных элементов и машинного обучения. Модель предназначена для определения смещений ауксетического метаматериала и сотовой структуры с произвольными геометрическими параметрами ячеек при одноосных сжимающих нагрузках.

2. Установлена роль угла наклона между ребрами ячейки ауксетического метаматериала и сотовой структуры при механических нагружениях. Установлено, что структуры, полученные методом 3D печати, с углом наклона между ребрами ячейки меньше  $90^\circ$  демонстрируют повышенные прочностные характеристики при статическом сжатии и усталостном нагружении на примере эластомера, высокомолекулярного полимера и сплавов металлов.

3. Показана возможность применения ауксетических метаматериалов для создания межтелового кейджа шейного отдела позвоночника при лечении дегенеративного заболевания диска.

### **Теоретическая значимость**

Теоретическая значимость работы определяется созданием параметрической системы элементарной конфигурации ячейки сотовой структуры с взаимосвязанными размерами геометрических параметров, определяющих ячейку; разработкой расчетной модели ауксетического метаматериала и сотовой структуры. Расчетная модель способна определять смещения, возникающие в результате приложения сжимающих нагрузок. При этом используемый алгоритм подбирающий интерполятор функции и описывающий конкретный процесс можно адаптировать для определения других физических величин в зависимости от задачи, используя постоянно пополняемую статистическую базу экспериментов.

### **Практическая значимость**

Практическая значимость работы определяется разработкой принципов моделирования биомедицинского изделия путем оптимизации коммерчески доступного межтелового кейджа под ауксетический метаматериал с использованием параметрического твердотельного моделирования в САПР; созданием и исследованием механических характеристик экспериментального прототипа межтелового кейджа на основе ячеек ауксетического метаматериала и сотовой структуры, полученного по технологии 3D-печати методом SLM (*Selective Laser Melting*) из Ti-6Al-4V. Исследования механических характеристик показали, что модуль Юнга ауксетического каркаса межтелового кейджа составляет  $14,9 \pm 0,66$  ГПа, что соответствует коммерческому коробчатому кейджу,  $E = 14,3 \pm 2,13$  ГПа, и лежит в области модуля упругости костной ткани взрослого человека, что потенциально может снизить эффект экранирования напряжений. При этом ауксетический кейдж не разрушается после 3500 циклов при нагрузке до 14 кН с остаточными деформациями на уровне 1% при смещениях  $0,21 \pm 0,10$  мм.

В совокупности это дает возможность для проведения дальнейших исследований применения и внедрения ауксетического метаматериала в области спинальной хирургии.

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

1. Принципы проектирования трехмерных ячеек ауксетических метаматериалов и сотовых структур методами компьютерного моделирования с использованием параметрической системы элементарной конфигурации с взаимосвязанными размерами.
2. Зависимость модуля Юнга трехмерного ауксетического метаматериала и сотовой структуры от угла наклона между ребрами ячейки при статическом сжатии и усталостном малоцикловом нагружении.
3. Принципы проектирования изделия медицинского назначения на основе ауксетического метаматериала с использованием компьютерного и твердотельного параметрического моделирования.
4. Экспериментальные результаты исследований механических характеристик межтеловых кейджей на основе ауксетического метаматериала и сотовой структуры при статических и малоцикловых усталостных испытаниях на сжатие; результаты исследований геометрических параметров ауксетического метаматериала и сотовой структуры в зависимости от материала основы при статических и малоцикловых усталостных испытаниях на сжатие.

### **Степень достоверности**

Все эксперименты, представленные в работе, проведены с использованием современных методов исследования механических свойств и высокоточного аналитического оборудования. Степень достоверности представленных количественных данных определяется инструментальной погрешностью используемого оборудования и статистической обработкой полученных результатов.

### **Апробация результатов**

Результаты работы были представлены на отечественных и международных семинарах и конференциях: международная конференция «Новые материалы и перспективные технологии», 2018 г, Москва, Россия; онлайн семинар Biomedical materials: current opportunities, challenges and future perspectives, 13–14 декабря 2021 г., НИТУ МИСИС – БТУ, Москва, Россия; Smart Composites International School 2022, 14–20 августа 2022 г., Калининград, Россия.

### **Публикации**

Основное содержание работы изложено в 3 публикациях, включенных в библиографические базы данных цитирования ВАК, Web of Science и Scopus и 1 заявке на патент РФ на изобретение.

### **Личный вклад автора**

Личный вклад автора состоит в анализе литературных данных, моделировании в САПР, проведение компьютерной симуляции статических механических испытаний, приготовлении образцов, проведении механических испытаний и статистической обработке полученных результатов. Постановка задач, обсуждение научных результатов, выводов и положений, изложенных в работе, проводилось совместно с научным руководителем.

## **Аббревиатуры и сокращения**

В работе используются следующие аббревиатуры и сокращения:

- Ауксетический метаматериал:
  - «Ауксетик-90», в сокращении А-90
  - «Ауксетик-45», в сокращении А-45
- Сотовая структура:
  - «Сотовая структура-90», в сокращении С-90
  - «Сотовая структура-45», в сокращении С-45

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность выбранной темы исследования, определены цель и задачи исследований, решение которых необходимы для ее достижения. Сформулированы научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, положения, выносимые на защиту, а также представлена степень достоверности и апробация результатов исследования.

**В первой главе** приведен литературный обзор данных, в которых рассматриваются:

- Общее определение и основная классификация ауксетических метаматериалов
  - Модели упругой деформации и влияние геометрических параметров на свойства сотовой структуры и ауксетического метаматериала
  - Роль и возможность применения ауксетических метаматериалов и сотовых структур в областях биомедицины и создании медицинских изделий
  - Сформулированы принципы проектирования изделия медицинского назначения на основе ауксетического метаматериала с использованием компьютерного и твердотельного параметрического моделирования
    - Основные сведения об межпозвоночных дисках и их механических свойствах
    - Явление дегенеративного заболевания диска (ДЗД) и его влияние на функции и механические свойства межпозвоночных дисков
    - Основные методы лечения ДЗД, в частности, замена искусственным диском и межтеловые спинальные кейджи с учетом преимуществ и недостатков каждого типа.

**Во второй главе**, описаны применяемые материалы, методы теоретических и экспериментальных исследований, сформулированы принципы проектирования трехмерных ауксетических метаматериалов и сотовых структур методами компьютерного моделирования.

Для получения образцов ауксетического метаматериала и сотовой структуры использовались материалы:

- Фотополимерная смола Basic Resin марки HARZ Labs на основе полиуретанов с длиной волны полимеризации 405 нм;
- Термопластичный полиуретан (ТПУ) марки Sealant в виде нити диаметром 1,75 мм;

- Акрилонитрил бутадиен стирол (АБС) марки SEM в виде нити диаметром 1,75 мм;
- Алюминиевый сплав AlSi<sub>11</sub>CuMn в виде порошка со средним размером частиц 40 мкм.

Получение образцов экспериментального прототипа каркаса кейджа проводилось с использованием титанового сплава Ti-6Al-4V в виде порошка со средним размером частиц 40-60 мкм. Для получения конечного прототипа межтелового кейджа дополнительно использовался сверхвысокомолекулярный полиэтилен (СВМПЭ) марки GUR 4113 в виде порошка с молекулярной массой  $3,9 \cdot 10^6$  г/моль и соль NaCl в виде порошка размером 300–500 мкм.

Получение образцов ауксетического метаматериала и сотовой структуры проводилось по технологии 3D-печати методами:

- LCD (*Liquid Crystal Display*) для образцов на основе фотополимерной смолы. Выдержка базы 80 сек, скорость подъема платформы 100 мм/мин, скорость опускания платформы 1,7 мм/сек, задержка перед печатью 1 сек при толщине слоя 50 мкм.

- FDM (*Fused Deposition Modeling*) для образцов на основе ТПУ и АБС. Для ТПУ скорость подачи нити составляла 10–15 мм/сек, температура сопла 225 °С, температура печатного стола 75 °С при толщине слоя 200 мкм. Для АБС скорость подачи составляла нити 20 мм/сек, температура сопла 240 °С, температура печатного стола 110 °С при толщине слоя 200 мкм.

- SLM (*Selective Laser Melting*) для образцов на основе сплава AlCu<sub>11</sub>Mn. Скорость сканирования 1650 мм/сек, мощность лазера 370 Вт при толщине слоя 30 мкм.

Получение образцов экспериментального прототипа каркаса кейджа проводилось по технологии 3D-печати методом SLM из титанового сплава Ti-6Al-4V. Скорость сканирования 800 мм/сек, мощность лазера 120 Вт при толщине слоя 30 мкм с использованием титанового сплава Ti-6Al-4V.

Получение конечного прототипа кейджа осуществлялось методом термопрессования металлического каркаса с порошковой смесью СВМПЭ и NaCl в соотношении масс 1:9 при 190 °С, 180 минут выдержки и давлении 55 МПа. Смесью СВМПЭ и NaCl предварительно смешивались с использованием шаровой мельницы в течение 12 циклов со скоростью 90 об/мин. Удаление NaCl из полимера СВМПЭ проводилось путем вымывания частиц в дистиллированной воде с использованием ультразвуковой ванны в течение 12 часов.

Принципы проектирования трехмерных ауксетических метаматериалов и сотовых структур методами компьютерного моделирования представлены в Таблице 1.

**Таблица 1** – Принципы проектирования трехмерных ауксетических метаматериалов и сотовых структур методами компьютерного моделирования с использованием параметрической системы элементарной конфигурации с взаимосвязанными размерами

---

### **1 Выбор геометрии ауксетического метаматериала**

---

Выбор геометрии ауксетика определяется медицинской проблемой, возможностью проектирования в САПР, получением методами аддитивных технологий и результатами исследования систематических испытаний.

---

### **2 Выбор геометрии ауксетика для решения медицинской проблемы**

---

Ауксетики на основе сотовой ячейки, также называемые «обратными (*re-entrant*)» подходят для использования в нагруженных изделиях, таких как скаффолды, костные имплантаты, кейджи и другие.

Ауксетики на основе вращающейся геометрии подходят для гибких медицинских изделий, таких как стенты, кожно-мышечные пластыри или скаффолды мягких тканей.

---

### **3 Получение САПР-модели ауксетической геометрии**

---

На первом этапе моделирования выделяется элементарная конфигурация ячейки ауксетика. В элементарную конфигурацию входит базовый участок ячейки, описываемый геометрическими параметрами, такими как угол, длина и ширина ребер и так далее.

На втором этапе создается параметрическая система элементарной конфигурации с взаимосвязанными размерами в САПР. Система объединяет в себе базовый участок ячейки с геометрическими параметрами делая их взаимосвязанными, таким образом, что при изменении одного геометрического параметра, изменяются другие параметры, связанные с ним. Параметрическая система позволит при необходимости варьировать геометрию всего ауксетического метаматериала.

На третьем этапе проводится моделирование конструкции ауксетического метаматериала с использованием булевых операций, операций массивов и копирования в САПР.

---

### **4 Получение образцов ауксетических метаматериалов**

---

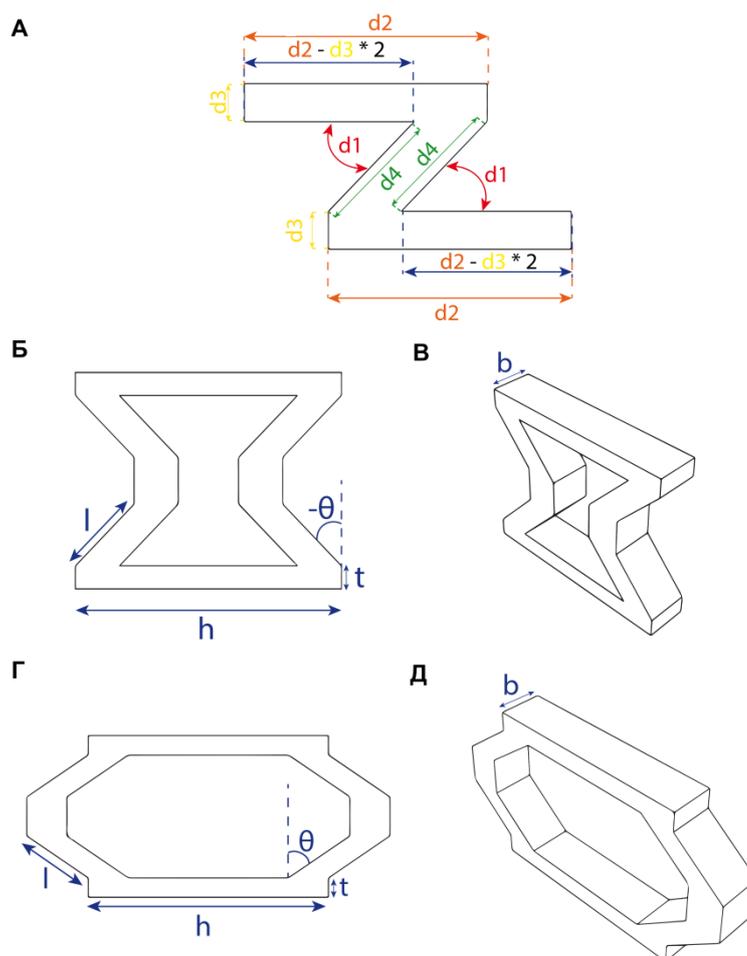
3D-печать образцов ауксетиков с использованием модельных материалов или материалов, медицинского назначения, позволит оценить качество и потенциал конструкции ауксетического метаматериала для дальнейших исследований. 3D-печать используется как для получения образцов в соответствии со стандартами для исследования характеристик, так и для получения прототипа изделия.

---

## 5 Исследование характеристик ауксетического метаматериала

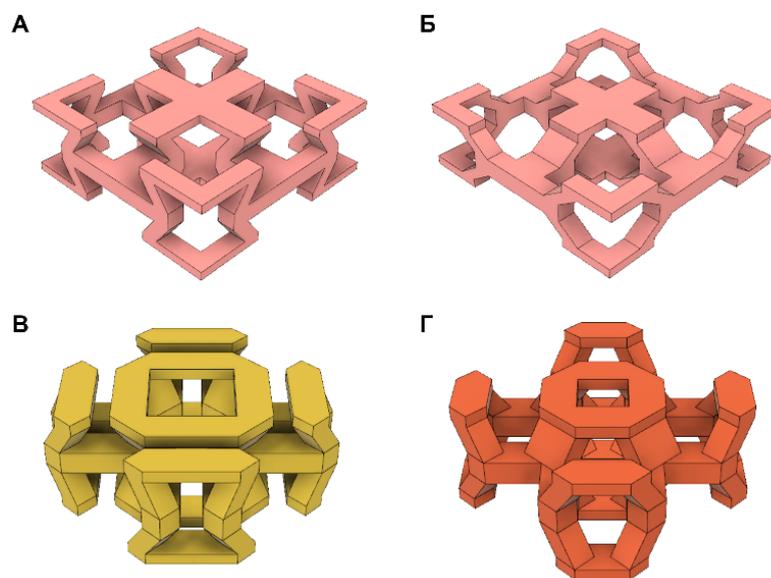
Моделирование упрощенных механических, тепловых и других испытаний методом конечных элементов, с использованием искусственного интеллекта (ИИ) или машинного обучения; проведение систематических механических, тепловых и других испытаний в соответствии с международными стандартами.

Этапы проектирования могут использоваться многократно для получения оптимальной геометрии ауксетика и необходимых свойств, при этом стоит отметить, что система элементарной конфигурации с взаимосвязанными размерами увеличивает скорость получения оптимальной геометрии. В работе были использованы ячейки ауксетического метаматериала и сотовой структуры, которые показаны на Рисунке 1 с описанием геометрических параметров.



**Рисунок 1** – Элементарная ячейка ауксетического метаматериала и сотовой структуры с описанием геометрических параметров. А) Параметрическая система элементарной конфигурации с взаимосвязанными размерами.  $d_1 = \theta$ ,  $d_2 = h/2$ ,  $d_3 = t$ ,  $d_2 - d_3 * 2 = h/2 - 2 * t$ ,  $d_4 = l$ , Б, В) – Ячейка ауксетика. Г, Д) – ячейка сотовой структуры.  $h$  - горизонтальное ребро,  $l$  - боковое ребро,  $\theta$  - угол наклона,  $t$  - ширина ребра,  $b$  - толщина ребер

Ячейки использовались для выделения элементарной конфигурации и создании параметрической системы с взаимосвязанными размерами. Соответственно параметрическая система применялась для построения САПР-моделей трехмерных ячеек ауксетического метаматериала «Ауксетик-90», «Ауксетик-45» и сотовой структуры «Сотовая структура-90» и «Сотовая структура-45», как показано на Рисунке 2.



**Рисунок 2** – Общий вид трехмерных САПР-моделей ауксетического метаматериала и сотовой структуры. А) – «Ауксетик-90». Б) – «Сотовая структура-90». В) – «Ауксетик-45». Г) – «Сотовая структура-45»

Разработка расчетной модели заключалась в определении смещений трехмерных структур А-90 и С-90 при помощи САПР в совокупности с симуляцией линейных статических испытаний методом конечных элементов. Смещения определялись в качестве систем уравнения общего вида:

$$\begin{cases} \Delta Z = F \cdot \alpha_Z + h \cdot \beta_Z + \theta \cdot \gamma_Z + C_Z \\ \Delta X = F \cdot \alpha_X + h \cdot \beta_X + \theta \cdot \gamma_X + C_X \\ \Delta Y = F \cdot \alpha_Y + h \cdot \beta_Y + \theta \cdot \gamma_Y + C_Y \end{cases} \quad (1)$$

где  $F$ ,  $H$  – сжимающее усилие;  $\theta$ , град – угол наклона;  $h$ , мм – горизонтальное ребро, параметры описывающие функции смещений вдоль осей  $Z$ ,  $X$  и  $Y$ . Коэффициенты  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  и  $C$  подбирались с помощью алгоритма DEPS – Differential Evolution and Particle Swarm Optimization работающий по условиям Каруша-Куна-Такера. В качестве исследуемых

материалов использовались термопластичный полиуретан (ТПУ), акрилонитрил бутадиен стирол (АБС) и алюминий.

Статические и малоцикловые усталостные испытания на сжатие проводились для образцов прямоугольного сечения в соответствии с ASTM D695-15, ASTM D7615 и ASTM F 2077–14 с использованием универсальной испытательной машины.

Размеры образцов рассчитывались согласно значению коэффициента  $x/l \geq 0,4$ , где  $x$  (мм) – наиболее короткая сторона поперечного сечения образца;  $l$  (мм) – длина образца, измеренная параллельно направлению сжимающей силы, мм. Скорость испытания рассчитывалась исходя из соотношений:

- $V = 0,5l$  ( $l$ , мм) – для измерения напряжения при сжатии вязких материалов, которые проявляют текучесть.
- $V = 10$  мм/мин – для измерения напряжения при сжатии полимерных и металлических материалов.
- $V = 0,02l$  ( $l$ , мм) – для измерения модуля Юнга.

Испытания на малоцикловую усталость проводились в двух режимах. Испытания в режиме «мягкого» цикла при постоянном напряжении от нуля до максимального значения с поэтапным увеличением нагрузки, каждый этап состоял из 500 циклов для образцов на основе полимеров и металлов. Испытания в режиме «жесткого» цикла при постоянной деформации от нуля до максимального значения для образцов на основе эластомера. Выбор начального напряжения для первого этапа осуществлялся с учетом результатов статических испытаний.

Компьютерный анализ результатов статических испытаний на одноосное сжатие был проведен с помощью анализа методом конечных элементов. Дискретизация геометрии проводилась с учетом предписанных параметров используемого программного обеспечения. Выбор величины прикладываемой нагрузки, а также граничные условия определялись с учетом результатов статических испытаний и методики натуральных экспериментов.

Дополнительные испытания на сжатие образцов на основе полиуретановой фотополимерной смолы проводились с использованием универсального испытательного устройства Deben MT 1 kN с постоянной скоростью 1 мм/мин до 50 % деформации. Процесс сжатия синхронизировался с цифровой видеокамерой с частотой съемки 1 кадр/мин. Полученные изображения были обработаны с помощью метода корреляции цифровых изображений с целью извлечения карт распределения деформаций.

В сотрудничестве с НМИЦ онкологии им. Н. Н. Блохина и ветеринарной клиникой «Биоконтроль» (Москва, Россия) были, проведены исследования механических характеристик 4-го грудного и 7-го поясничного позвонка собаки средней породы.

**В третьей главе** представлены результаты разработки расчетной модели для трехмерных структур А-90 и С-90.

Системы уравнений для определения смещений с подобранными коэффициентами с помощью алгоритма представлены ниже.

- системы уравнений для материала алюминий

$$\begin{cases} \Delta Z = -0.00015F - 0.05528h - 0.01170\theta + 2.07372 \\ \Delta X = 2.19 \cdot 10^{-5}F + 0.00309h + 0.00291\theta - 0.37522 \\ \Delta Y = 2.19 \cdot 10^{-5}F + 0.00302h + 0.00290\theta - 0.37480 \end{cases} \quad (2)$$

- системы уравнений для материала АБС

$$\begin{cases} \Delta Z = -0.00123F + 0.00014h + 0.000139\theta + 2.48856 \\ \Delta X = -0.14509F - 0.04140h - 0.04139\theta - 0.09036 \\ \Delta Y = -0.00291F + 0.01431h + 0.01431\theta - 0.09102 \end{cases} \quad (3)$$

- системы уравнений для материала ТПУ

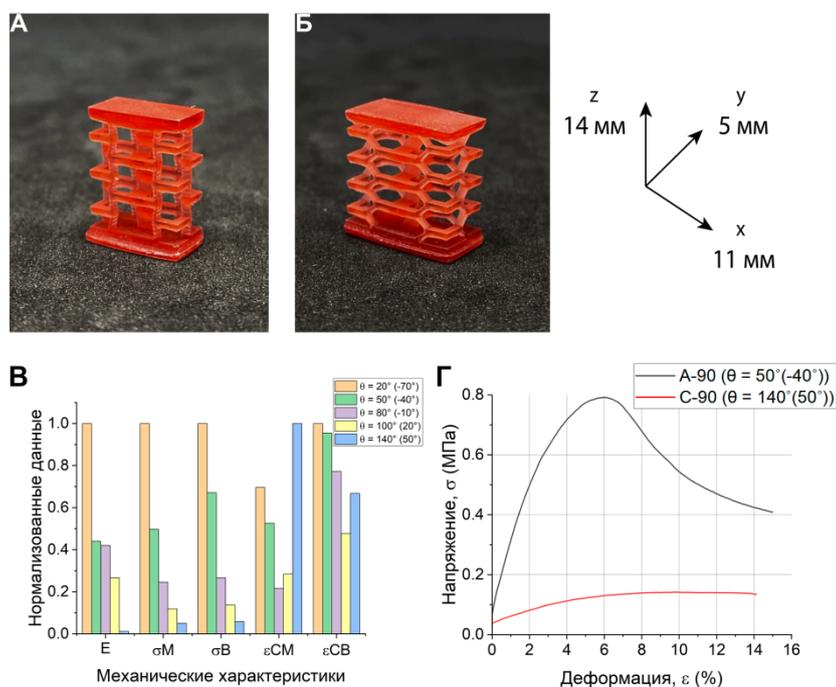
$$\begin{cases} \Delta Z = -0.03733F + 0.00864h + 0.00643\theta + 3,94109 \\ \Delta X = -0.2686F - 0.03633h - 0.03626\theta - 0.05041 \\ \Delta Y = 0.00128F + 0.01371h + 0.01369\theta - 0.04821 \end{cases} \quad (4)$$

Проверка выборок на основе данных, полученных с помощью метода конечных элементов и машинного обучения в размере 106 наблюдений на примере материала АБС показала, что данные имеют нормальное распределение. Проверка гипотез о равенстве средних данных выборок согласно  $t$ -критерию при уровне значимости 0,01, показала, что средние значения выборок статистически равны ( $t_{эксн} = 0,6597$ ,  $t_{кр} = 2,58$  при уровне значимости 0,01).

**В четвертой главе** представлены результаты исследования механических характеристик ауксетического метаматериала А-90 и сотовой структуры С-90 на основе фотополимерной смолы при  $\theta = 20^\circ - 140^\circ$  ( $h = 6$  мм,  $l = 2,5$  мм,  $t = 0,5$  мм,  $b = 1$  мм). На Рисунке 3 показаны результаты механических испытаний на статическое сжатие в виде

нормализованных данных, а также пример кривой «напряжение-деформация». В Таблице 2 представлены результаты в виде исходных данных. Результаты испытаний показали, что ауксетические метаматериалы обладают повышенными механическими характеристиками по сравнению с сотовыми структурами. В образцах А-90 значение  $E$  уменьшилось на 40% в диапазоне  $\theta$  от  $20^\circ$  ( $-70^\circ$ ) до  $80^\circ$  ( $-10^\circ$ ), соответственно с наблюдаемым максимумом при  $20^\circ$  ( $-70^\circ$ ). Значения  $\sigma_M$  и  $\sigma_B$  аналогично снижаются в диапазоне  $\theta$  от  $20^\circ$  до  $80^\circ$  в среднем на 75% при незначительном снижении  $\varepsilon_{CB}$ . Модуль Юнга для сотовых структур резко снижается по мере увеличения угла наклона, более чем на 90% и достигая минимума при  $\theta = 140^\circ$  ( $50^\circ$ ). Значения  $\sigma_M$  и  $\sigma_B$  снизились в среднем на 65%, при этом деформации при максимальном и разрушающем напряжении увеличивались.

Предположительно, сжимающая нагрузка на структуры с углом наклона больше  $90^\circ$  (сотовые структуры) приводит к повышенным продольным деформациям преимущественно в области боковых ребер, что и провоцирует низкие механические характеристики и преждевременное разрушение конструкции. С другой стороны, в структурах с углом наклона меньше  $90^\circ$  (ауксетические метаматериалы), сжатие приводит к накоплению деформаций на стыке горизонтальных и боковых ребер вдоль всей конструкции.



**Рисунок 3** – Результаты исследования механических характеристик ауксетического метаматериала А-90 и сотовой структуры С-90 на основе фотополимерной смолы при  $\theta = 20^\circ - 140^\circ$ . А) Образец А-90,  $\theta = 70^\circ (-20^\circ)$ . Б) Образец С-90,  $\theta = 140^\circ (50^\circ)$ . В) Относительное сравнение углов наклона между ребрами ячейки с исследуемыми механическими характеристиками. Г) Кривая напряжение-деформация при  $\theta = 50^\circ (-40^\circ)$  и  $140^\circ (50^\circ)$ ,  $h = 6$  мм,  $l = 2,5$  мм,  $t = 0,5$  мм,  $b = 1$  мм

**Таблица 2.** Результаты механических испытаний на статическое сжатие трехмерных структур А-90 и С-90 на основе фотополимерной смолы\*

$\theta$ , град	$E$ , МПа	$\sigma_M$ , МПа	$\sigma_B$ , МПа	$\epsilon_{CM}$ , %	$\epsilon_{CB}$ , %
20	$271,55 \pm 37,11$	$3,68 \pm 1,66$	$1,15 \pm 1,04$	$9,05 \pm 1,07$	$22,26 \pm 5,66$
50	$119,56 \pm 53,16$	$1,57 \pm 0,65$	$0,77 \pm 0,3$	$6,83 \pm 0,91$	$21,24 \pm 8,09$
80	$114,27 \pm 24,23$	$0,64 \pm 0,34$	$0,31 \pm 0,19$	$2,81 \pm 1,14$	$17,21 \pm 10,43$
100	$72,37 \pm 17,9$	$0,37 \pm 0,05$	$0,16 \pm 0,04$	$3,70 \pm 0,21$	$10,6 \pm 2,94$
140	$3,04 \pm 0,42$	$0,10 \pm 0,05$	$0,07 \pm 0,05$	$13,01 \pm 2,39$	$14,85 \pm 0,25$

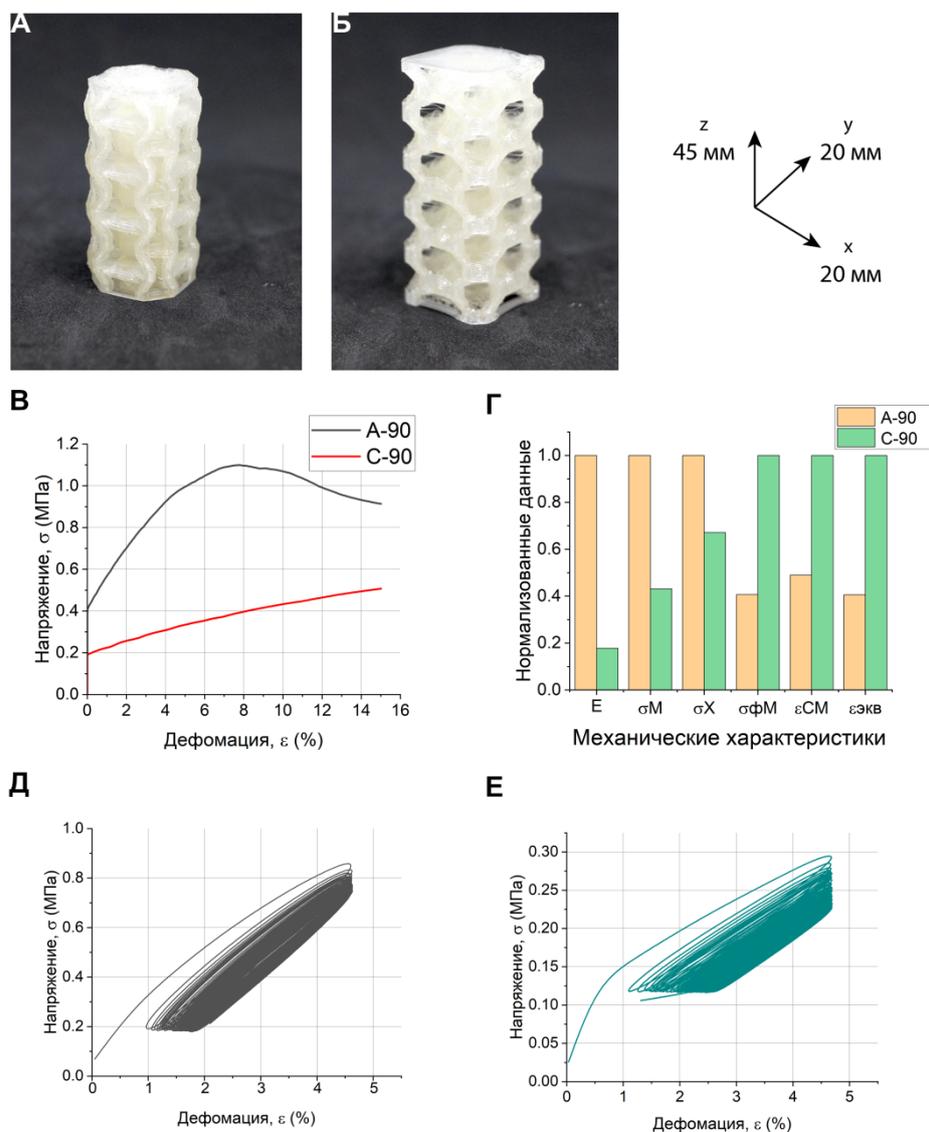
\*  $\theta$  – угол наклона между ребрами ячейки;  $E$  – модуль Юнга при сжатии;  $\sigma_M$  – максимальное напряжение;  $\sigma_B$  – разрушающее напряжение при сжатии;  $\epsilon_{CM}$  – деформация при максимальном напряжении;  $\epsilon_{CB}$  – деформация при разрушающем напряжении.

Соответственно, для дальнейшего исследования влияния угла наклона на механические характеристики трехмерных структур А-90 и С-90, были выбраны ячейки ауксетического метаматериала с  $\theta = 50^\circ$  и сотовой структуры с  $\theta = 140^\circ$ .

**В пятой главе** представлены результаты исследования механических характеристик ауксетического метаматериала А-90 и сотовой структуры С-90 на основе ТПУ и АБС при  $\theta = 50^\circ$  и  $140^\circ$  ( $h = 10$  мм,  $l = 10$  мм,  $t = 2,5$  мм,  $b = 10$  мм).

На Рисунке 4 показаны результаты механических испытаний образцов А-90 и С-90 на статическое сжатие из ТПУ в виде нормализованных данных и кривая «напряжение-деформация». В Таблице 3 представлены результаты в виде исходных данных.

Исследования механических характеристик подтвердили, что ауксетический метаматериал ( $\theta < 90^\circ$ ) обладает более высоким сопротивлением при сжатии, чем сотовая структура ( $\theta > 90^\circ$ ). Увеличение  $\sigma_M$  ауксетического метаматериала более чем в 2 раза при меньших продольных деформациях ( $\varepsilon_{CM}$ ) по сравнению с сотами свидетельствует об «уплотнении» ячеек А-90, что также приводит к увеличению модуля Юнга в 5,5 раз. Тем не менее, дальнейшее снижение напряжений характеризуется упругой потерей устойчивости ауксетических образцов, предположительно связанное с неравномерной деформацией боковых ребер. При испытаниях образцов С-90 не наблюдалось явной потери устойчивости, поскольку образцы принимали «бочкообразный» вид с монотонным увеличением напряжений и продольных деформаций. При этом симуляция квазистатических испытаний на сжатие показала, что в локальных областях образца А-90 концентрируется на 40% меньше напряжений по фон Мизесу (0,4269 МПа), чем в образце С-90 (1,05 МПа).



**Рисунок 4** – Результаты исследования механических характеристик ауксетического метаматериала А-90 и сотовой структуры С-90 на основе ТПУ при  $\theta = 50^\circ$  ( $-40^\circ$ ) и  $140^\circ$  ( $50^\circ$ ). А) Образец А-90 на основе ТПУ. Б) Образец С-90 на основе ТПУ. В) Кривая напряжение-деформация. Г) Относительное сравнение типов образцов с исследуемыми механическими характеристиками. Д) Кривая напряжение-деформация для образца А-90 при циклических нагрузках. Е) Кривая напряжение-деформация для образца С-90 при циклических нагрузках

**Таблица 3.** Результаты механических испытаний на статическое сжатие трехмерных структур А-90 и С-90 на основе ТПУ\*.

	Тип образца	
	А-90	С-90
$E$ , МПа	$13,41 \pm 0,88$	$2,38 \pm 0,15$
$\sigma_M$ , МПа	$1,18 \pm 0,03$	$0,51 \pm 0,01$
$\sigma_X$ , МПа	$0,91 \pm 0,02$	$0,51 \pm 0,01$
$\sigma_{\text{фонМизес}}$ , МПа (МКЭ)	0,43	1,05
$\varepsilon_{CM}$ , %	$7,34 \pm 1,01$	$15,02 \pm 0,02$
$\varepsilon_{\text{экв}}$ (МКЭ)	0,23	0,55

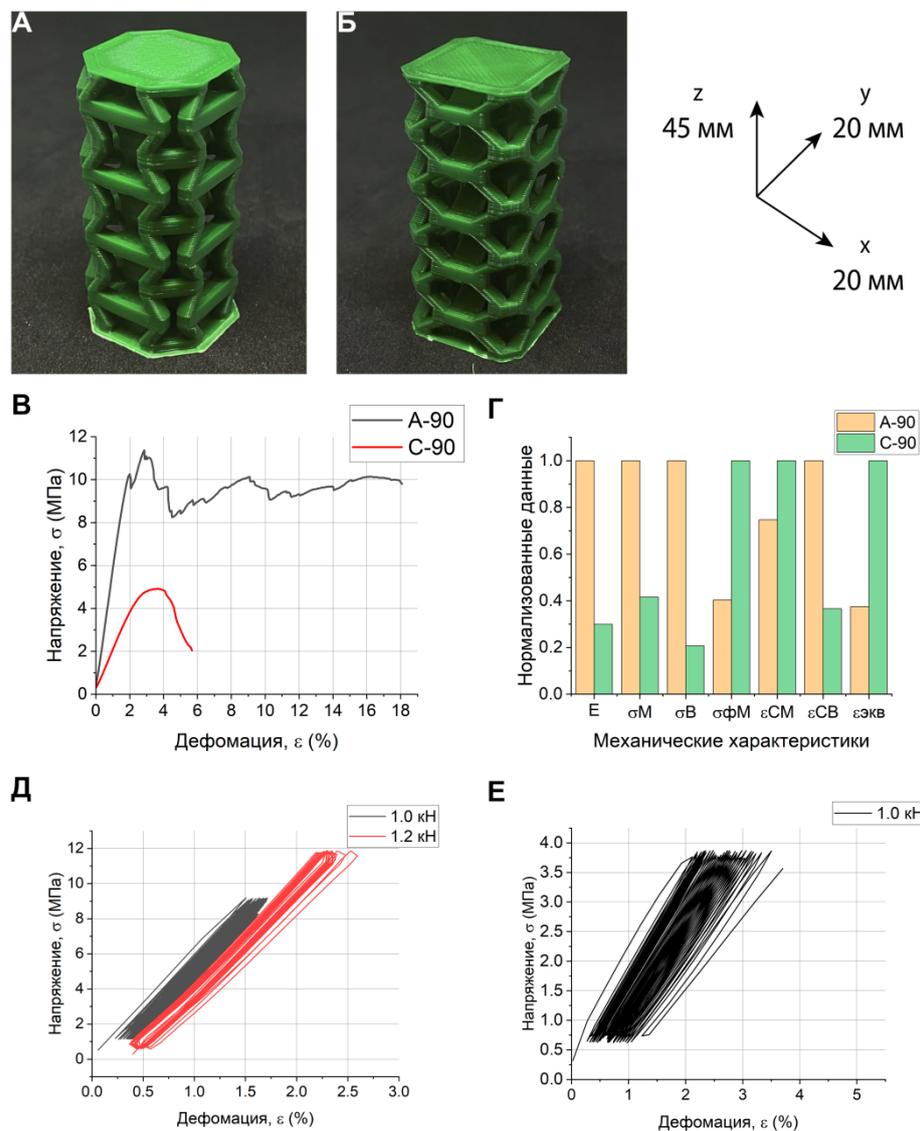
\* $E$  – модуль Юнга при сжатии;  $\sigma_M$  – максимальное напряжение;  $\sigma_X$  – напряжение при фиксированной деформации;  $\varepsilon_{CM}$  – деформация при максимальном напряжении;  $\sigma_{\text{фонМизес}}$  – напряжение по фон Мизесу (МКЭ),  $\varepsilon_{\text{экв}}$  – эквивалентные деформации (МКЭ)

Кривая «напряжение-деформация» и зависимость продольной деформации от количества циклов для образцов А-90 и С-90 после 500 циклов нагружения при фиксированной деформации 5% представлена на Рисунке 4. Из результатов видно, что под действием циклического нагружения А-90 достигает значений напряжений 0,89 МПа, С-90 достигает 0,29 МПа. Остаточные деформации ауксетического образца увеличились в 1,8 раз. С другой стороны, остаточные деформации образца с сотовой структурой монотонно увеличивались с 0,93 до 2,55%, то есть в 2,7 раз. Перманентное увеличение остаточных деформаций С-90 может быть связано с тем, что соты при скорости нагружения 0,2 Гц полностью не восстанавливают первоначальную форму после снятия нагрузки, в отличие от ауксетического аналога. Дополнительная оценка механических характеристик показала, что жесткость конструкции А-90 после 500-го цикла усталостных испытаний выросла на 9,6%, в то же время жесткость конструкции С-90 выросла на 7,6%, соответственно.

Результаты статических испытаний на сжатие образцов А-90 и С-90 на основе АБС, представлены на Рисунке 5 и в Таблице 4. Ауксетик демонстрирует повышенный модуль упругости более чем в 3 раза по сравнению с сотовой структурой 625 и 187 МПа, соответственно. Условный предел текучести ауксетика сопровождался разрушением печатных слоев в области горизонтальных ребер при деформации ~2%. Последующие разрушения приводили к уплотнению ячейки, и как следствие, упрочнению метаматериала без существенного снижения напряжений, достигая деформации в среднем до 20%.

Условный предел текучести сотовой структуры фиксировался с последующим разрушением печатных слоев в области боковых ребер, который сопровождался дальнейшим разрушением конструкции и падением напряжений более чем на 50%.

Результаты компьютерной симуляции показали, что максимальные напряжения по фон Мизесу для ауксетического образца составили 4,2 МПа при эквивалентной деформации 0,003, что на 40% меньше, чем у неауксетического образца: 10,38 МПа при 0,008 эквивалентной деформации.



**Рисунок 5** – Результаты исследования механических характеристик ауксетического метаматериала А-90 и сотовой структуры С-90 на основе АБС при  $\theta = 50^\circ$  ( $-40^\circ$ ) и  $140^\circ$  ( $50^\circ$ ). А) Образец А-90 на основе АБС. Б) Образец С-90 на основе АБС,  $\theta = 140^\circ$ . В) Кривая напряжение-деформация д. Г) Относительное сравнение типов образцов с исследуемыми механическими характеристиками. Д) Кривая напряжение-деформация для образца А-90 при циклических нагрузках. Е) Кривая напряжение-деформация для образца С-90 при циклических нагрузках

**Таблица 4.** Результаты механических испытаний на статическое сжатие трехмерных структур А-90 и С-90 на основе АБС\*

	Тип образца	
	А-90	С-90
$E$ , МПа	$624,89 \pm 18,77$	$186,75 \pm 5,53$
$\sigma_M$ , МПа	$12,42 \pm 0,55$	$5,16 \pm 0,36$
$\sigma_B$ , МПа	$9,8 \pm 1,89$	$2,03 \pm 0,94$
$\sigma_{\text{фонМизес}}$ , МПа (МКЭ)	4,19	10,38
$\varepsilon_{CM}$ , %	$2,44 \pm 0,16$	$3,27 \pm 0,54$
$\varepsilon_{CB}$ , %	$15,56 \pm 5,09$	$5,69 \pm 1,07$
$\varepsilon_{\text{экв}}$ (МКЭ)	0,003	0,008

\* $E$  – модуль Юнга при сжатии;  $\sigma_M$  – максимальное напряжение;  $\sigma_B$  – напряжение при разрушении;  $\varepsilon_{CM}$  – деформация при максимальном напряжении;  $\varepsilon_{CB}$  – деформация при разрушающем напряжении;  $\sigma_{\text{фонМизес}}$  – напряжение по фон Мизесу (МКЭ),  $\varepsilon_{\text{экв}}$  – эквивалентные деформации (МКЭ)

Кривая гистерезиса после поэтапного нагружения при фиксированной нагрузке и зависимость деформации от количества циклов показана на Рисунке 5. Разрушение образцов А-90 происходило после 520 цикла при нагрузке 1,2 кН, что в среднем соответствует 12 МПа при деформации 2–2,5%. Разрушение образцов С-90 отмечалось после 140 цикла при нагрузке 0,4 кН, что соответствует 3,6 МПа при деформации 3,7%.

Оценка остаточных деформаций показала, что возможные дефекты в образцах А-90 возникали после 250 цикла, где наблюдались скачки остаточной деформации до 0,9%. Остаточные деформации в образцах С-90 монотонно возрастали с увеличением циклов и достигали значений 1,4% в момент разрушения. Жесткость метаматериалов заметно снизилась в среднем до 13% для А-90 и до 23% для С-90 предположительно в результате накопления дефектов. При этом механизм разрушения соответствовал механизму, отмеченному при статическом сжатии.

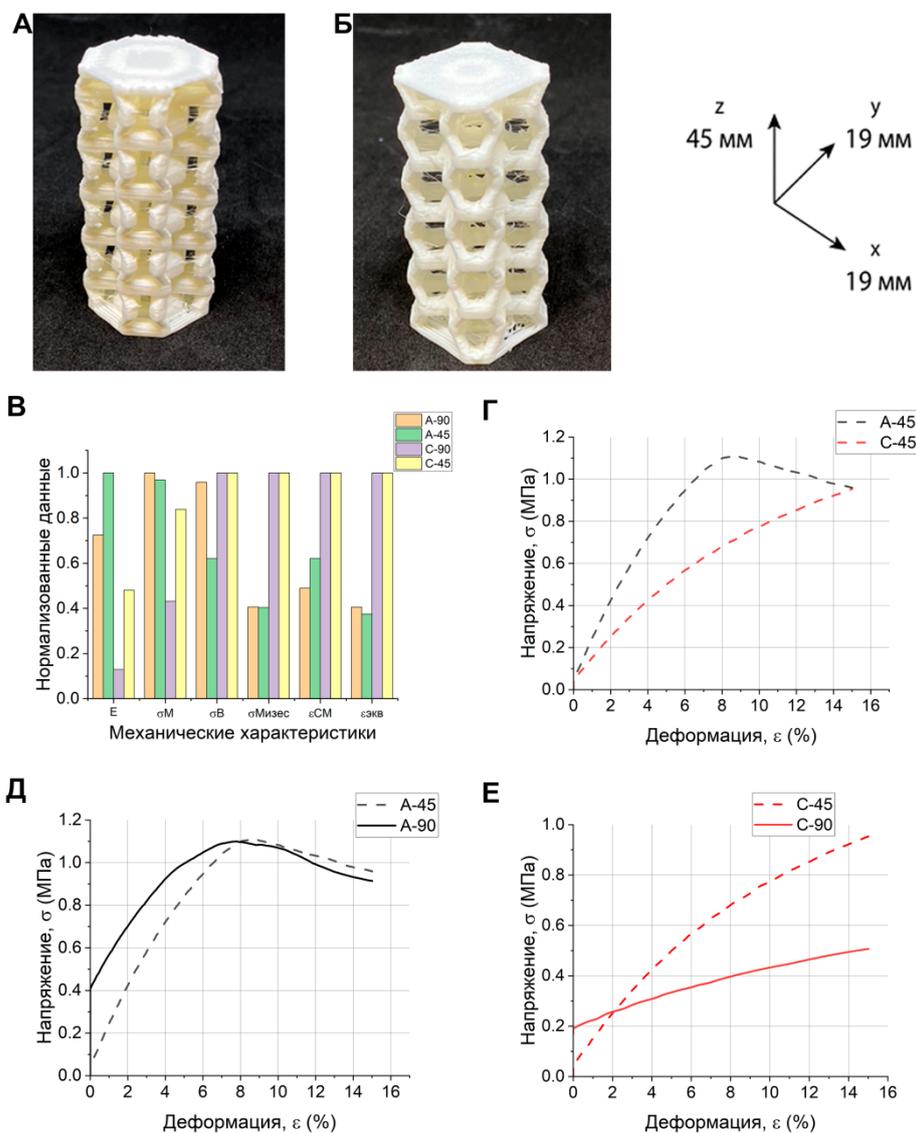
**В шестой главе** представлены результаты исследования механических характеристик ауксетического метаматериала А-45 и сотовой структуры С-45 на основе ТПУ, АБС и  $\text{AlCu}_{11}\text{Mn}$  при  $\theta = 50^\circ$  и  $140^\circ$  ( $h = 10$  мм,  $l = 10$  мм,  $t = 2,5$  мм,  $b = 10$  мм).

На Рисунке 6 показаны результаты механических испытаний образцов А-45 и С-45 на статическое сжатие из ТПУ в виде нормализованных данных и кривая «напряжение-

деформация» в сравнении с А-90 и С-90. В Таблице 5 представлены результаты в виде исходных данных.

Результаты механических испытаний показали увеличение прочности образцов С-45 по сравнению с конфигурацией С-90. Значение  $E$  выросло в 4 раза, при этом  $\sigma_x$  достигает значений сопоставимых с образцами А-90 и А-45 при 15% продольной деформации. Увеличение прочности образцов с сотовой структурой в конфигурации С-45, предположительно объясняется равномерным перераспределением нагрузки на горизонтальные ребра за счет уменьшения площади контакта. В то же время, механические характеристики ауксетического метаматериала А-45 практически не изменилась относительно А-90. В процессе статического сжатия при достижении максимального напряжения отмечалась аналогичная упругая потеря устойчивости, возникающая при 8% продольной деформации и 1,1 МПа.

Результаты компьютерного моделирования испытаний на сжатие показывают, что в ауксетическом метаматериале А-45 в локальных областях концентрируется на ~20% больше напряжений, чем в конфигурации А-90. В образце С-45 максимальные напряжения уменьшились на 37% по сравнению с С-90, но все еще на 20% выше, чем в А-45.



**Рисунок 6** – Результаты исследования механических характеристик ауксетического метаматериала A-45 и сотовой структуры C-45 на основе ТПУ при  $\theta = 50^\circ$  ( $-40^\circ$ ) и  $140^\circ$  ( $50^\circ$ ). А) Образец A-45 на основе ТПУ. Б) Образец A-45 на основе ТПУ. В) Относительное сравнение типов образцов с исследуемыми механическими характеристиками. Г) Кривая напряжение-деформация для образцов A-45 и C-45. Д) Кривая напряжение-деформация для образцов A-45 и A-90. Е) Кривая напряжение-деформация для образцов C-45 и C-90

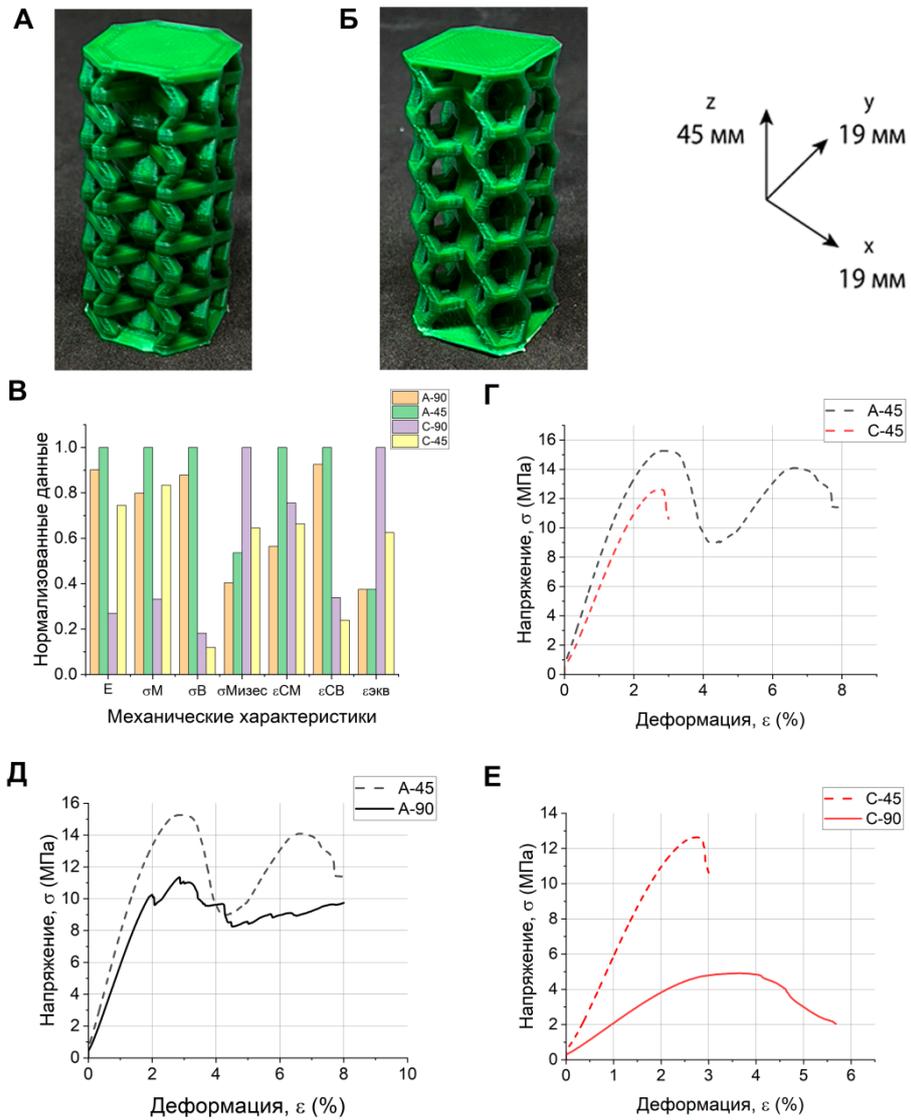
**Таблица 5.** Результаты механических испытаний на статическое сжатие трехмерных структур А-45 и С-45 на основе ТПУ\*

	Тип образца			
	А-90	А-45	С-90	С-45
$E$ , МПа	$13,41 \pm 0,88$	$18,50 \pm 0,69$	$2,38 \pm 0,15$	$8,89 \pm 0,72$
$\sigma_M$ , МПа	$1,18 \pm 0,03$	$1,15 \pm 0,05$	$0,51 \pm 0,01$	$0,99 \pm 0,07$
$\sigma_X$ , МПа	$0,91 \pm 0,02$	$0,93 \pm 0,1$	$0,51 \pm 0,01$	$0,95 \pm 0,02$
$\sigma_{\text{фонМизес}}$ , МПа (МКЭ)	0,43	4,19	1,05	10,38
$\varepsilon_{CM}$ , %	$7,34 \pm 1,01$	$9,32 \pm 0,3$	$15,02 \pm 0,02$	$15,01 \pm 0,01$
$\varepsilon_{\text{экв}}$ (МКЭ)	0,23	0,003	0,55	0,008

\* $E$  – модуль Юнга при сжатии;  $\sigma_M$  – максимальное напряжение;  $\sigma_X$  – напряжение при фиксированной деформации;  $\varepsilon_{CM}$  – деформация при максимальном напряжении;  $\sigma_{\text{фонМизес}}$  – напряжение по фон Мизесу (МКЭ),  $\varepsilon_{\text{экв}}$  – эквивалентные деформации (МКЭ)

Результаты статических испытаний на сжатие образцов А-45 и С-45 на основе АБС, представлены на Рисунке 7 и в Таблице 6 в виде исходных данных. Образцы с С-45 и А-45 аналогично продемонстрировали увеличение прочности относительно аналогов А-90 и С-90. Значение  $E$  сотовой структуры увеличилось в 3 по сравнению с С-90 и составило 75% от ауксетического метаматериала С-45.

Несмотря на увеличение прочности конфигурации А-45 и С-45, механизм деформации образцов не изменился. При достижении максимального напряжения ( $\sigma_M = 12,973 \pm 0,949$  МПа) деформации в области боковых ребер сотовых структур приводили к разрушению конструкции под углом в  $45^\circ$  и падению величины усилия более чем на 50%, как уже отмечалось ранее. В то же время разрушение ауксетического метаматериала А-45 сопровождался разрушением печатных слоев на стыке горизонтальных и боковых ребер, с последующим уплотнением и упрочнением образцов, как и в конфигурации А-90.



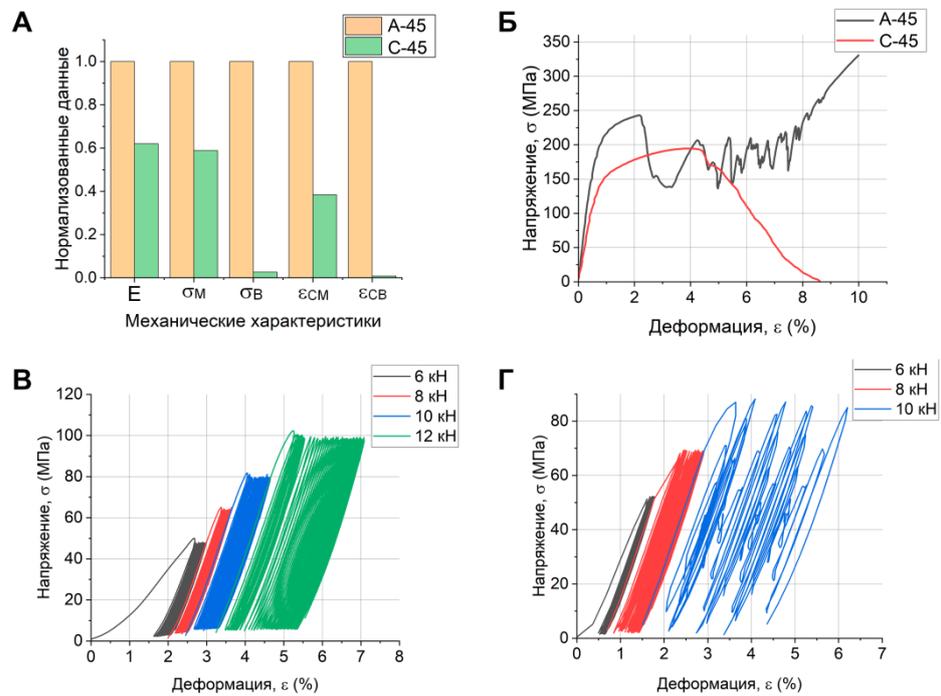
**Рисунок 7** – Результаты исследования механических характеристик ауксетического метаматериала A-45 и сотовой структуры C-45 на основе АБС при  $\theta = 50^\circ$  ( $-40^\circ$ ) и  $140^\circ$  ( $50^\circ$ ). А) Образец A-45 на основе АБС. Б) Образец C-45 на основе АБС. В) Относительное сравнение типов образцов с исследуемыми механическими характеристиками. Г) Кривая напряжение-деформация для образцов A-45 и C-45. Д) Кривая напряжение-деформация для образцов A-45 и A-90. Е) Кривая напряжение-деформация для образцов C-45 и C-90

**Таблица 6.** Результаты механических испытаний на статическое сжатие трехмерных структур А-45 и С-90 на основе АБС\*

	Тип образца			
	А-90	А-45	С-90	С-45
$E$ , МПа	624,89 ± 18,77	692,50 ± 24,76	186,75 ± 5,53	515,94 ± 29,51
$\sigma_M$ , МПа	12,42 ± 0,55	15,56 ± 1,56	5,16 ± 0,36	12,97 ± 0,95
$\sigma_B$ , МПа	9,8 ± 1,89	11,16 ± 4,37	2,03 ± 0,94	1,34 ± 0,91
$\sigma_{\text{фонМизес}}$ , МПа (МКЭ)	4,19	5,56	10,38	6,7
$\varepsilon_{CM}$ , %	2,44 ± 0,16	4,40 ± 2,78	3,27 ± 0,54	2,92 ± 0,18
$\varepsilon_{CB}$ , %	15,56 ± 5,09	16,81 ± 1,53	5,69 ± 1,07	5,69 ± 1,07
$\varepsilon_{\text{экв}}$ (МКЭ)	0,003	0,003	0,008	0,005

\* $E$  – модуль Юнга при сжатии;  $\sigma_M$  – максимальное напряжение;  $\sigma_B$  – напряжение при разрушении;  $\varepsilon_{CM}$  – деформация при максимальном напряжении;  $\varepsilon_{CB}$  – деформация при разрушающем напряжении;  $\sigma_{\text{фонМизес}}$  – напряжение по фон Мизесу (МКЭ),  $\varepsilon_{\text{экв}}$  – эквивалентные деформации (МКЭ)

Согласно результатам статических и усталостных испытаний образцов А-45 и С-45 на основе  $\text{AlCu}_{11}\text{Mn}$ , как и ожидалось, ауксетический метаматериал имеет повышенные механические характеристики, по сравнению с сотовой структурой, как показано на Рисунке 10 и Таблице 7. А-45 разрушается при нагрузке 12 кН после 2000 циклов при номинальном напряжении 110 МПа. В то же время С-45 разрушается под нагрузкой 8 кН после 1000 циклов при номинальном напряжении 70 МПа. Полное разрушение сотовой структуры происходит при нагрузке 10 кН после 1500 циклов. Следует отметить, что ауксетическая структура, как ожидалось, "складывается" и становится более плотной при разрушении, в то же время, сотовая структура подвергается общему разрушению в области боковых ребер.



**Рисунок 8** – Результаты исследования механических характеристик ауксетического метаматериала А-45 и сотовой структуры С-45 на основе  $AlCu_{11}Mn$  при  $\theta = 50^\circ$  ( $-40^\circ$ ) и  $140^\circ$  ( $50^\circ$ ). А) Относительное сравнение типов образцов с исследуемыми механическими характеристиками. Б) Кривая напряжение-деформация для образцов А-45 и С-45. В) Кривая напряжение-деформация при циклическом нагружении образцов А-45. Г) Кривая напряжение-деформация при циклическом нагружении С-45

**Таблица 7.** Результаты механических испытаний на статическое сжатие трехмерных структур А-45 и С-90 на основе  $AlCu_{11}Mn$ \*

	Тип образца	
	А-45	С-45
$E$ , МПа	378,43	234,45
$\sigma_M$ , МПа	330,59	194,52
$\sigma_B$ , МПа	330,59	8,61
$\varepsilon_{CM}$ , %	9,99	3,840
$\varepsilon_{CB}$ , %	9,99	0,078

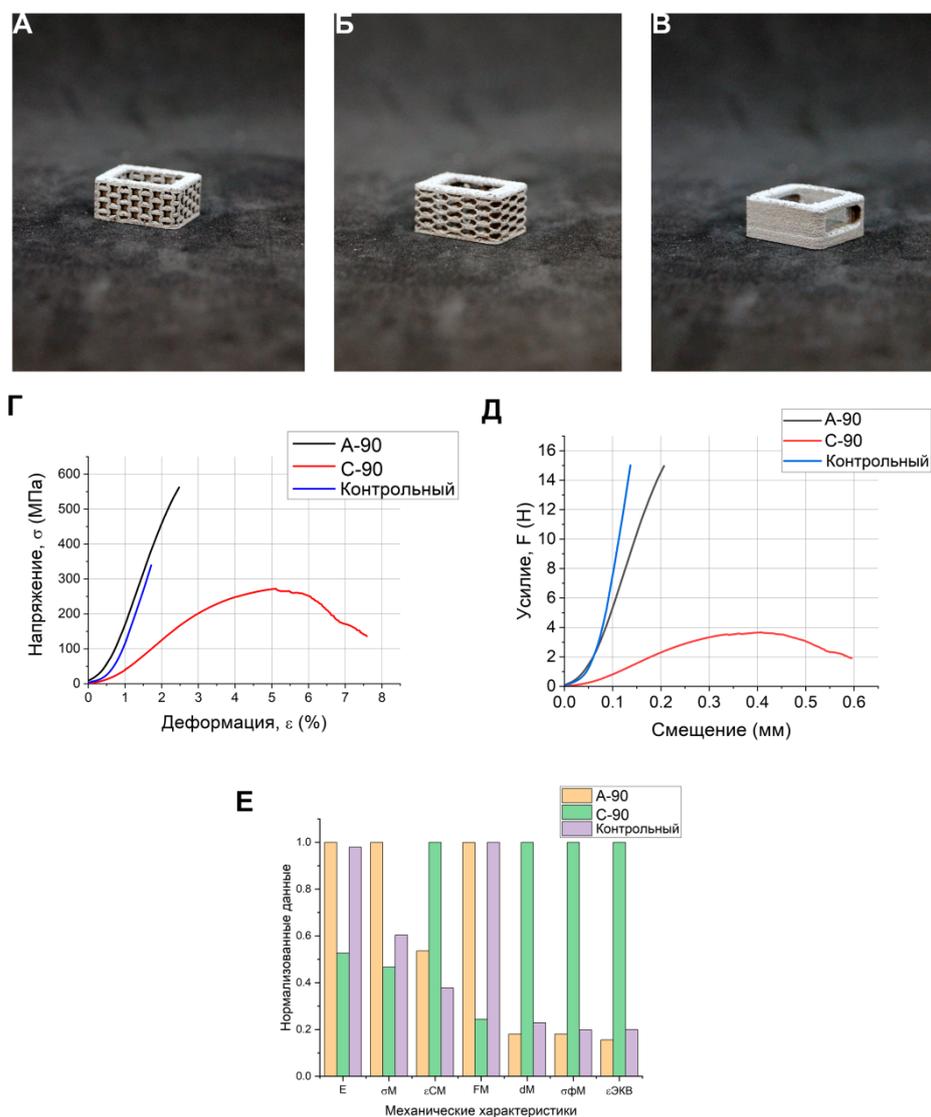
\* $E$  – модуль Юнга при сжатии;  $\sigma_M$  – максимальное напряжение;  $\sigma_B$  – напряжение при разрушении;  $\varepsilon_{CM}$  – деформация при максимальном напряжении;  $\varepsilon_{CB}$  – деформация при разрушающем напряжении;  $\sigma_{фонМизес}$  – напряжение по фон Мизесу (МКЭ),  $\varepsilon_{экв}$  – эквивалентные деформации (МКЭ)

**В седьмой главе** представлены результаты исследования механических характеристик каркасов кейджей на основе метаматериала А-90, сотовой структуры С-90 при  $\theta = 50^\circ$  ( $-40^\circ$ ) и  $140^\circ$  ( $50^\circ$ ),  $h = 3$  мм,  $l = 1,75$  мм,  $t = 0,5$  мм,  $b = 1$  мм в сравнении с

коробчатым межтеловым кейджем, выполненных из сплава Ti-6Al-4V. Результаты статических испытаний на сжатие, представлены на Рисунке 9 и в Таблице 8

Образцы С-90 показали наименьшие прочностные характеристики: разрушение сотовых конструкций наблюдалось при 135 МПа и 7,5% продольной деформации ( $d_M = 0,6 \pm 0,03$  мм), модуль Юнга оценивался как  $7,7 \pm 0,15$  ГПа. В то же время, в образцах А-90 и контрольных образцах не наблюдалось видимых разрушений. Однако при максимальном усилии 15 кН в аусетическом образце значения напряжений на 40% выше ( $E = 14,9 \pm 0,66$  ГПа), чем в контрольных образцах коробчатого типа ( $E = 14,3 \pm 2,13$  ГПа) при смещениях  $0,21 \pm 0,10$  мм и  $0,14 \pm 0,02$ , соответственно.

Исследование областей напряжений по фон Мизесу в образцах показало, что локальные области предполагаемого разрушения концентрируют на 80% меньше напряжений в образце А-90 – 126 МПа при эквивалентной деформации 0,0014. В сравнении с аналогичными областями в образце С-90 – 697,2 МПа при эквивалентной деформации 0,0090 и на 9% процентов меньше, чем в контрольном образце – 138 МПа при эквивалентной деформации 0,0018.

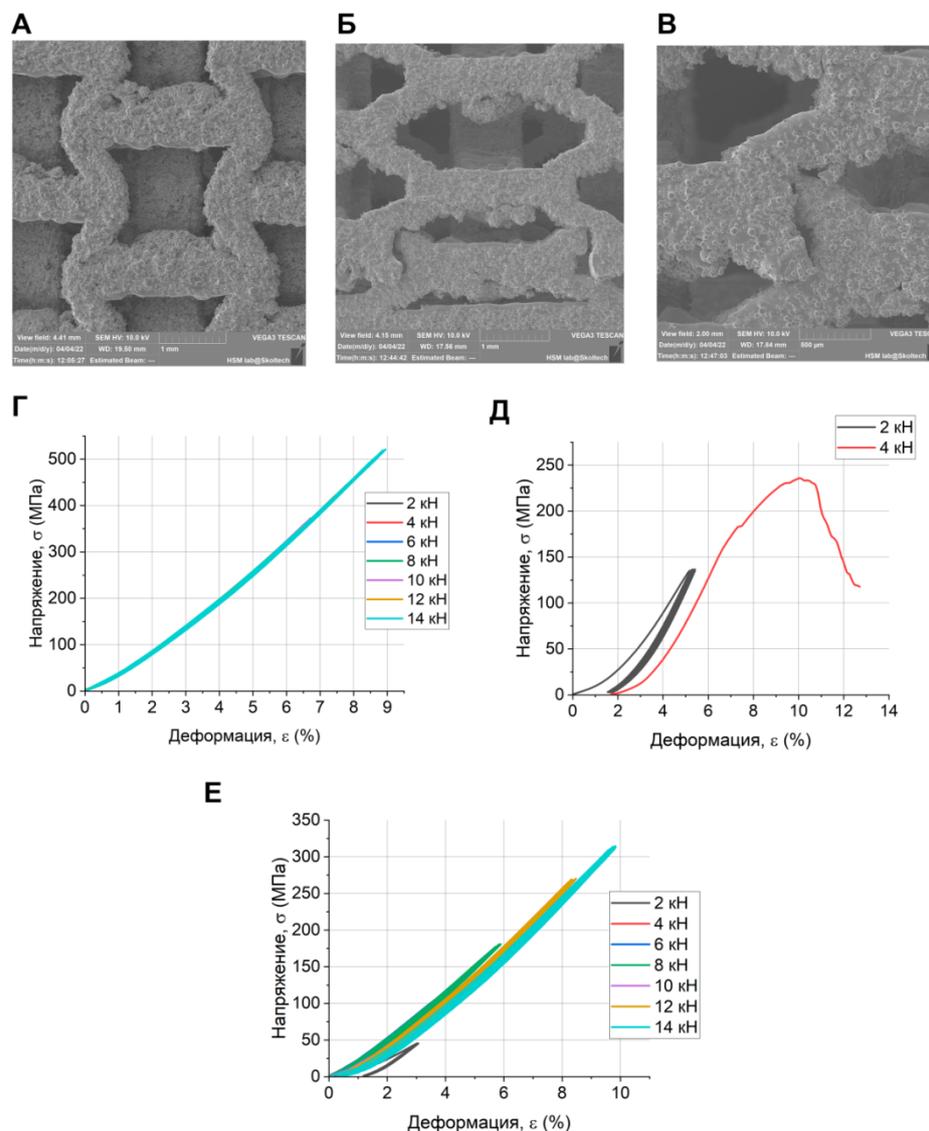


**Рисунок 9** – Результаты исследования механических характеристик при статическом сжатии экспериментальных прототипов кейджей A-90, C-90 и типового кейджа на основе Ti-6Al-4V. А) Каркас кейджа на основе A-90 ( $\theta = 50^\circ$  ( $-40^\circ$ ),  $h = 3$  мм,  $l = 1,75$  мм,  $t = 0,5$  мм,  $b = 1$  мм). Б) Фотография каркаса кейджа на основе C-90 ( $\theta = 140^\circ$  ( $50^\circ$ ),  $h = 3$  мм,  $l = 1,75$  мм,  $t = 0,5$  мм,  $b = 1$  мм). В) Фотография каркаса кейджа коробчатого типа, контрольный образец. Г) Кривая напряжение-деформация для A-90, C-90 и контрольного образца. Д) Кривая усилие-смещение для A-90, C-90 и контрольного образца. Е) Относительное сравнение типов образцов с исследуемыми механическими характеристиками

**Таблица 8.** Результаты исследования механических характеристик экспериментальных прототипов кейджей А-90, С-90 и коробчатого кейджа на основе Ti-6Al-4V

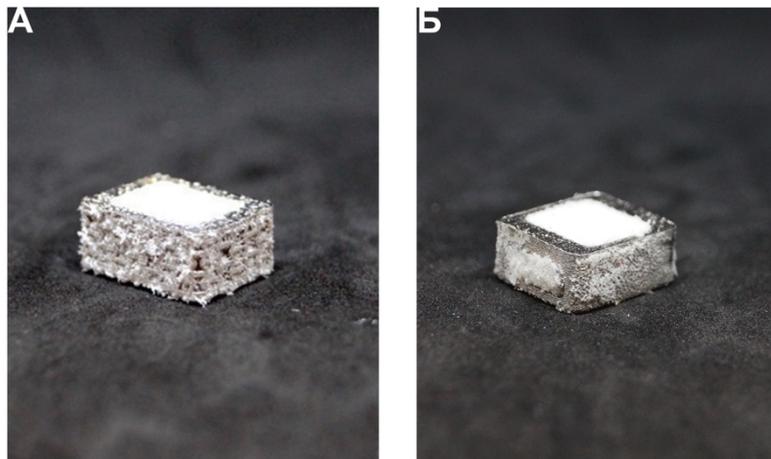
	Тип образца		
	А-90	С-90	Контрольный
$E$ , ГПа	$14,60 \pm 0,66$	$7,68 \pm 0,15$	$14,3 \pm 0,66$
$\sigma_M$ , МПа	$562,05 \pm 0,01$	$261,84 \pm 14,37$	$339,3 \pm 0,01$
$\varepsilon_{CM}$ , %	$2,7 \pm 0,32$	$5,05 \pm 0,09$	$1,9 \pm 0,27$
$F_M$ , кН	$15,01 \pm 0,0003$	$3,67 \pm 0,2$	$15,02 \pm 0,0004$
$d_M$ , мм	$0,21 \pm 0,10$	$0,6 \pm 0,03$	$0,14 \pm 0,02$
$\sigma_{\text{фонМизес}}$ , МПа (МКЭ)	126	697,2	138
$\varepsilon_{ЭКВ}$	0,0014	0,009	0,0018

Согласно результатам усталостных испытаний, Рисунок 10, сотовая структура разрушается при нагрузке 4 кН после 501 цикла (235 МПа, 12%) в области боковых ребер, что видно из фотографий СЭМ. В свою очередь, кейдж на основе ауксетического метаматериала не разрушается после 3500 циклов при нагрузке до 14 кН, что также видно из результатов СЭМ, достигая напряжений 520 МПа при продольной деформации 8,67%. Петля гистерезиса образцов А-90 характеризуется малой площадью петли и как следствие малыми значения остаточных деформаций. По оценкам, возможные дефекты структуры проявлялись после 1500 цикла при нагрузке 8 кН, где значение остаточной деформации составило 0,9%. После 3500 циклов остаточные деформации в среднем остались на уровне не превышающие 1%. Стоит отметить, что максимальные значения напряжений ауксетических кейджей на 40% выше, чем у сотовых структур и коробчатых кейджей. При циклических испытаниях коробчатых кейджей наблюдалась повышенная остаточная деформация до 1,3% при 2 кН, после чего деформация снижалась в среднем на 70%. Дальнейшее увеличение остаточных деформаций до 1,5% наблюдалось в диапазоне 1500–3000 циклов нагружения.



**Рисунок 10** – Результаты исследования механических характеристик при циклическом нагружении экспериментальных прототипов кейджей. А) Микрофотография СЭМ участка образца А-90 после усталостных испытаний, увеличение 1 мм. Б) Микрофотография СЭМ участка образца С-90 после усталостных испытаний, увеличение 1 мм. В) Микрофотография СЭМ участка образца С-90 после усталостных испытаний, увеличение 500 мкм. Г) Кривая напряжение-деформация при циклическом нагружении образцов А-90. Д) Кривая напряжение-деформация при циклическом нагружении образцов С-90. Е) Кривая напряжение-деформация при циклическом нагружении контрольных образцов

Согласно результатам исследования механических характеристик экспериментальных образцов кейджей позволили исключить сотовую структуру из дальнейшего исследования ауксетических метаматериалов в области спинальной хирургии. На Рисунке 11 представлены фотографии экспериментальных образцов межтелового кейджа на основе метаматериала А-90 с параметрами  $\theta = 50^\circ$  ( $-40^\circ$ ),  $h = 3$  мм,  $l = 1,75$  мм,  $t = 0,5$  мм,  $b = 1$  мм и коробчатый кейдж, заполненные высокопористым СВМПЭ.



**Рисунок 11** – Фотографии экспериментальных образцов межтеловых кейджей выполненных из сплава Ti-6Al-4V, заполненных высокопористым СВМПЭ. А) – Кейдж на основе метаматериала А- 90 ( $\theta = 50^\circ$  ( $-40^\circ$ ),  $h = 3$  мм,  $l = 1,75$  мм,  $t = 0,5$  мм,  $b = 1$  мм). Б) – Каркас кейджа коробчатого типа, контрольный образец

## ВЫВОДЫ

1. Предложена методика проектирования трехмерных ауксетических метаматериалов и сотовых структур методами компьютерного моделирования с использованием параметрической системы элементарной конфигурации с взаимосвязанными размерами.

2. Предложена расчетная модель для трехмерной элементарной ячейки ауксетического метаматериала и сотовой структуры методами конечных элементов и машинного обучения, предназначенная для определения смещений ячеек с произвольными геометрическими параметрами при одноосном нагружении. Показано, что выборки на основе данных, полученных с помощью метода конечных элементов и машинного обучения имеют нормальное распределение. Проверка гипотез о равенстве средних данных выборок показала, что средние значения выборок статистически равны.

3. Показано, что структуры, полученные методом 3D-печати, с углом наклона между ребрами ячейки меньше  $90^\circ$  (ауксетик) демонстрируют повышенные прочностные характеристики при статическом сжатии и усталостном малоцикловом нагружении по сравнению со структурами с углом наклона больше  $90^\circ$  (соты):

- Ауксетик на основе ТПУ обладает модулем Юнга в 5,5 раз выше, чем сотовая структура. Под действием циклического нагружения ауксетические образцы достигают значений напряжений 0,89 МПа, сотовые структуры достигает

напряжений 0,29 МПа. Остаточные деформации ауксетических образцов на 25% ниже, чем у образцов с сотовой структурой;

- Ауксетик на основе АБС демонстрирует модуль Юнга в 3 раза больше по сравнению с сотовой структурой. Малоцикловые испытания показали, что разрушение образцов ауксетиков происходило после 520 цикла при нагрузке 1,2 кН при деформации 2–2,5 %. Разрушение образцов сотовых структур происходило после 140 цикла при нагрузке 0,4 кН при деформации 3,7%. Остаточные деформации ауксетического образца на 36% ниже, чем у образцов с сотами.

4. Исследованы механические свойства ауксетических метаматериалов, полученных методами 3D-печати из различных типов материалов при испытаниях на статическое сжатие, усталостных малоцикловых нагружениях и при помощи метода конечных элементов:

5. Предложена методика создания биомедицинского изделия путем оптимизации коммерчески доступного межтелового кейджа под ауксетический метаматериал с использованием стандартных булевых операций в системе автоматизированного проектирования;

6. Разработан экспериментальный прототип ауксетического спинального межтелового кейджа методом 3D-печати и термопрессования на основе Ti-6Al-4V и СВМПЭ.

7. Исследованы механические свойства прототипа спинального межтелового кейджа на основе ячеек ауксетического метаматериала и сотовой структуры в сравнении с типовым коробчатым кейджем при испытаниях на статическое сжатие, усталостных малоцикловых нагружениях и при помощи компьютерной симуляции статических испытаний на сжатие.

- Показано, что модуль Юнга ауксетического каркаса межтелового кейджа составляет  $14,9 \pm 0,66$  ГПа, что соответствует коробчатому кейджу,  $E = 14,3 \pm 2,13$  ГПа, и лежит в области модуля упругости костной ткани взрослого человека.

- Кейдж на основе ауксетиков не разрушается после 3500 циклов при нагрузке до 14 кН при 501 МПа и 9% деформации. Остаточные деформации, возникшие после 3500 цикла, были на уровне не превышающие 1%. Кейдж на основе сотовых структур разрушается при нагрузке 4 кН после 501 цикла, при номинальном напряжении 235 МПа и деформации 12%.

## ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ

1. **Lvov, V.A.**, Senatov, F.S.; Korsunsky, A.M.; Salimon, A.I.; Design and Mechanical Properties of 3D-Printed Auxetic Honeycomb structure, *Materials Today Communication* 24 (2020) 101173, <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2020.101173>
2. **Lvov V.A.**, Senatov F.S., Stepashkin A.A., Veveris A.A., Pavlov M.D., Komissarov A.A. Low-Cycle fatigue behavior of 3D-printed metallic auxetic structure, *Materials Today Proceedings*, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.06.130>
3. **Lvov, V.A.**; Senatov, F.S.; Veveris, A.A.; Skrybykina, V.A.; Díaz Lantada, A. Auxetic Metamaterials for Biomedical Devices: Current Situation, Main Challenges, and Research Trends. *Materials* 2022, 15, 1439. <https://doi.org/10.3390/ma15041439>
4. **Львов В. А.** Архитектурированные ауксетические структуры, полученные методом 3D – печати. Четвертый междисциплинарный научный форум с международным участием «Новые материалы и перспективные технологии». Сборник материалов том 1. 2018. С. 702.
5. Заявка на патент № 2020135811/04(065947) «Способ получения трехмерного ауксетика с обратной сотовой структурой (варианты)», **Львов В. А.**, Сенатов Ф.С., Калошкин С.Д.

## ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ

1. N. Vijayakumar, I. Bulygina, **V.A. Lvov** et al. Effect of Formulation on the Release Kinetics of the Antibiotics from Biocompatible Ceramics / *Trends Biomater. Artif. Organs*, 36(S1), 11-17 (2022)
2. M Samuel Collin, Senthil Kumar Venkatraman, Naveensubramaniam Vijayakumar, V Kanimozhi, S Muhammad Arbaaz, R G Sibiya Stacey, Jogannagari Anusha, Rajan Choudhary, **Vladislav Lvov**, Gabriel Ibrahim Tovar, Fedor Senatov, Sivasankar Koppala, Sasikumar Swamiappan, Bioaccumulation of lead (Pb) and its effects on human: A review, *Journal of Hazardous Materials Advances*, Volume 7, 2022, 100094, ISSN 2772-4166, <https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2022.100094>