

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по учебной работе автономной некоммерческой образовательной организации высшего профессионального образования «Сколковский институт науки и технологий», Фортин Клеман



«8» декабря 2022 г.

ОТЗЫВ

Ведущей организации

на диссертационную работу Львова Владислава Александровича «**Структура и физико-механические свойства биомедицинских метаматериалов с отрицательным коэффициентом Пуассона**», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по научной специальности

1.3.8. «Физика конденсированного состояния»

Актуальность исследования заключается в решении проблемы экранирования напряжений при использовании межтеловых кейджей путем оптимизации биомеханических характеристик изделия за счет использования ауксетика. Оптимизация механических свойств кейджа заключается в изменении геометрии элементарной ячейки ауксетика. Оптимизация механических характеристик ауксетиков, таких как модуль Юнга, жесткость структуры и других может сыграть важную роль в увеличении срока службы изделия. В связи с этим целью 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.

Научная новизна исследования состоит в следующем:

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 нагрузках. Установлено, что структуры, полученные методом 3D печати, с углом наклона между ребрами ячейки меньше 90° демонстрируют повышенные прочностные характеристики при статическом сжатии и усталостном нагружении на примере эластомера, высокомодульного полимера и сплавов металлов.

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

Практическая значимость работы заключается в создании принципов моделирования биомедицинского изделия путем оптимизации межтеловых кейджей под ауксетический метаматериал с использованием методов систем автоматизированного проектирования. Получен экспериментальный прототип межтелового кейджа на основе ячеек ауксетического метаматериала и сотовой структуры, а также проведены исследования механических характеристик прототипов, полученных по технологии 3D-печати методом SLM из сплава титана Ti-6Al-4V. Результаты проведенного исследования

представляют интерес для научно-исследовательских, медицинских и производственных организаций, деятельность которых связана с проектированием, производством и использованием медицинских изделий, включая межтеловые кейджи, относящиеся к продукции в частности ООО «Конмет-Холдинг».

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждаются корректностью постановки цели и задач, выбранными методами исследования. Достоверность результатов обосновывается использованием современных методов исследования механических свойств и высокоточного аналитического оборудования. Степень достоверности представленных количественных данных определяется инструментальной погрешностью используемого оборудования и статистической обработкой результатов.

Оценка содержания диссертации. Работа, состоит из введения, семи глав, заключения, списка литературы из 232 источников, содержит 75 рисунков и 36 таблиц на 182 страницах.

В диссертации сформулирована актуальность, цель и задачи исследования необходимые для ее выполнения. Прослеживается логическое построение глав диссертационной работы, позволяющие автору корректно и обоснованно выбирать цели и методы исследования. Работа составлена в соответствии с требованиями, предъявляемым к кандидатским диссертациям. Материал диссертации изложен грамотным языком в академическом стиле. Автореферат диссертации соответствует её содержанию.

Введение содержит актуальность темы диссертации, цель и задачи исследований. Также, во введении 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 котором рассмотрены основные типы ауксетиков, модели упругой деформации и влияние геометрических параметров на свойства сотовой структуры и ауксетического метаматериала. Кроме того, рассмотрена роль ауксетиков и сотовых структур в создании медицинских изделий. Сформулированы принципы проектирования изделия медицинского назначения на основе ауксетического метаматериала и сотовой структуры с использованием компьютерного и твердотельного параметрического моделирования. В заключение первой главы рассматривается явление дегенеративного заболевания диска и основные методы лечения.

Вторая глава содержит описание изучаемых материалов, теоретических и экспериментальных методов исследования, формулировку принципов проектирования трехмерных ауксетиков и сотовых структур методами компьютерного моделирования.

В третьей главе приведены результаты применения методов машинного обучения расчетной модели для двух типов трехмерных структур А-90 и С-90. Выборки на основе данных, полученных с помощью метода конечных элементов и машинного обучения на примере АБС статистически равны при уровне значимости 0,01.

В четвертой главе содержатся результаты механических испытаний ауксетического метаматериала и сотовой структуры на основе фотополимерной смолы при значениях угла между ребрами ячеек в диапазоне $\theta = 20\text{--}140^\circ$, которые показали, что ауксетики превосходят сотовые структуры по механическим характеристикам. В ауксетиках модуль Юнга при увеличении угла θ уменьшился на 40%. Значения σ_M и σ_B аналогично снижаются в среднем на 75%. Модуль Юнга сотовых структур снижается по мере увеличения угла наклона, более чем на 90%. Значения σ_M и σ_B снизились в среднем на 65%, при этом деформации при максимальном и разрушающем напряжении увеличилась. Сделан предположение о том, что сжимающая нагрузка на структуры с углом наклона больше 90° (сотовые структуры) приводит к повышенным продольным деформациям преимущественно в области боковых ребер, что и провоцирует низкие механические характеристики и преждевременное разрушение конструкции.

В пятой главе содержатся результаты исследования механических свойств ауксетика и сотовой структуры на основе ТПУ и АБС при $\theta = 50^\circ$ и 140° соответственно. Статические испытания подтвердили, что ауксетик обладает более высоким сопротивлением при сжатии, чем соты. Результаты испытаний образцов на основе АБС продемонстрировали повышенный модуль упругости у ауксетика более чем в 3 раза по сравнению с сотовой структурой. При испытаниях образцов на основе ТПУ, в ауксетике наблюдается «уплотнении» ячеек в составе структуры, что также приводит к увеличению модуля Юнга в 5,5 раз по сравнению с сотами.

В шестой главе приведены результаты исследования механических испытаний ауксетического метаматериала и сотовой структуры в другой конфигурации (А-45 и С-45) на основе ТПУ, АБС и сплава $\text{AlCu}_{11}\text{Mn}$. Механические характеристики образцов С-45 улучшились по сравнению образцами типа С-90. По результатам статических испытаний на сжатие образцов А-45 и С-45 на основе АБС выявлено, что образцы с С-45 и А-45 имеют более высокую прочность относительно А-90 и С-90, механизм деформации не изменился. Результаты испытаний образцов на основе $\text{AlCu}_{11}\text{Mn}$ подтвердили, что ауксетический метаматериал имеет повышенные механические характеристики по сравнению с сотовой структурой.

В седьмой главе представлены результаты механических испытаний прототипов кейджей на основе ячеек А-90, С-90 в сравнении с упрощенной коробчатой моделью кейджа. Образцы из сплава ВТ-6 (Ti-6Al-4V) получали 3D-печатью методом SLM. Образцы кейджей со структурой С-90 продемонстрировали худшие прочностные характеристики. Результаты малоцикловых усталостных испытаний показали, что кейдж со структурой ауксетика не разрушился после 3500 циклов, достигнув нагрузки 14 кН. Кейдж со структурой С-90 разрушился после 501 цикла при нагрузке 4 кН.

Заключение содержит описание полученных результатов моделирования и экспериментов и выводы по диссертации. Все выводы соответствуют цели работы и поставленным задачам, обоснованы и достоверны.

Результаты исследований полностью отражены в публикациях автора (5 публикаций). Получен 1 патент РФ. Результаты обсуждены и апробированы на российских и международных конференциях.

Замечания по диссертационной работе

1. В диссертационной работе говорится, что ауксетические метаматериалы характеризуются отрицательным коэффициентом Пуассона. Однако не исследовано или не описано влияния параметров ауксетика и сотовой структуры на отрицательный коэффициент Пуассона, а также связь коэффициента Пуассона с другими фундаментальными и эксплуатационными характеристиками материала, в частности, с модулем Юнга.

2. Способ оптимизации коммерчески доступных межтеловых кейджей путем интеграции ауксетических или сотовых структур, а в дальнейшем и исследование механических характеристик проводится на одном типе кейджа–коробчатом. При этом в Главе 1 «Аналитический обзор» рассматриваются три типа межтеловых кейджей – коробчатый, цилиндрический и кольцеобразный.

Приведенные замечания не влияют на общую положительную оценку диссертационного исследования.

Заключение

Оценивая выполненную работу, важно отметить, что по совокупности полученных результатов она является научным исследованием с перспективой дальнейшего развития. Основные выводы исследования базируются на анализе большого объема данных. Автореферат и публикации полностью отражают содержание диссертации. В работе

получен ряд новых, важных в научном и практическом отношении результатов, которые могут быть использованы как основа для дальнейшего исследования и внедрения ауксетика в области спинальной хирургии.

Актуальность, степени обоснованности научных положений, выводы и рекомендации, сформулированные в диссертации, их достоверность и новизна, делает диссертацию Львова Владислава Александровича значимой научно-исследовательской работой, соответствующей поставленным целям и задачам.

Диссертация «Структура и физико-механические свойства биомедицинских метаматериалов с отрицательным коэффициентом Пуассона» соответствует требованиям Положения о порядке присуждения ученых степеней в Национальном исследовательском технологическом университете "МИСиС", а ее автору, Львову Владиславу Александровичу может быть присвоена ученая степень кандидата физико-математических наук по научной специальности 1.3.8. «Физика конденсированного состояния».

Отзыв подготовлен:

Директор ЦНИО Цифрового
Конструирования, доцент, к.т.н.



Подладчикова Т.В.

Автономная некоммерческая образовательная организация высшего профессионального образования Соколовский институт науки и технологий, 121205 территория Сколково инновационного центра, г. Москва

Отзыв заслушан и обсужден на заседании Лаборатории Цифрового Конструирования Материалов ЦНИО Цифрового Конструирования 05. 12. 2022.

подпись Подладчиковой Т.В. заверяю,



Фортин Клеман,
Проректор по научной
работе, Профессор

