На правах рукописи

Ахметшин Линар Ришатович

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ И ЗАВИСИМОСТИ ЭФФЕКТИВНЫХ СВОЙСТВ МЕХАНИЧЕСКОГО ТЕТРАХИРАЛЬНОГО МЕТАМАТЕРИАЛА ОТ ЕГО СТРУКТУРЫ

1.1.8. Механика деформируемого твердого тела

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Томск – 2023

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» и Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
доцент **Смолин Игорь Юрьевич**

Официальные оппоненты:

Вершинин Анатолий Викторович, доктор физико-математических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», кафедра вычислительной механики, профессор

Кривошеина Марина Николаевна, доктор физико-математических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук, лаборатория физики нелинейных сред, ведущий научный сотрудник

Гришаева Наталия Юрьевна, кандидат физико-математических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники», кафедра механики и графики, доцент

Защита состоится 22 декабря 2023 года в 14 ч. 30 мин. на заседании диссертационного совета «НИ ТГУ.1.1.01», созданного на базе физико-технического факультета федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет», по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36 (учебный корпус № 10 ТГУ, компьютерный класс № 1).

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке и на официальном сайте федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» www.tsu.ru.

Материалы по защите диссертации размещены на официальном сайте ТГУ: https://dissertations.tsu.ru/PublicApplications/Details/6987c309-236d-472b-aee5-3bbb702abf2c

Автореферат разослан «____» ноября 2023 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат физико-математических наук Усанина Анна Сергеевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования. Работа посвящена изучению закономерностей деформирования и изменения эффективных свойств механических метаматериалов в зависимости от особенностей их структуры. Метаматериалы представляют собой новый бурно развивающийся в последние десятилетия класс материалов. Необычные свойства метаматериалов определяются специальным образом организованной структурой, а не их химическим составом. Большая часть известных исследований и примеров метаматериалов связана с особыми значениями электромагнитных или акустических свойств. Механические метаматериалы менее известны и обладают необычными эффективными свойствами, например, отрицательными значениями коэффициента Пуассона (такие материалы называют ауксетиками) или теплового расширения. Исследование метаматериалов позволило разработать подходы для программирования их механического поведения за счет целенаправленного изменения их структуры на разных масштабных уровнях. Создание механических метаматериалов позволяет вывести на качественно более высокий уровень проектирование ответственных конструкций техно- и биосистем и использовать их новые функциональные возможности для эффективной адаптации к заданным, в том числе экстремальным, условиям эксплуатации. Одним из наиболее эффективных инструментов дизайна архитектуры метаматериалов является топологическая оптимизация их внутренней структуры. Топологический многоуровневый дизайн осуществляется с учетом прогнозируемых изменений условий нагружения конструкции/системы и свойств окружающей среды.

Степень разработанности темы исследования. На протяжении истории материаловедения работы учёных были направлены на достижение наилучших, иногда нетривиальных свойств материалов за счет их внутренней структуры, к примеру, материалы с отрицательным коэффициентом Пуассона подробно изучались Гольдштейном Р.В. и Городцовым В.А. Подобные исследования приобретают иной характер, когда можно говорить про программируемость изучаемых характеристик для промышленного использования. Механические метаматериалы продолжают указанную тенденцию по программируемости механического поведения и актуальной задачей в настоящее время является управление свойствами метаматериалов. Данная область исследований активно развивается такими исследователями, как Френцель Т. (Frenzel T.), Кадик М. (Kadic M.) и Вегенер М. (Wegener M.) из Германии, Бертольди К. (Bertoldi K.) и Рузене М. (Ruzzene M.) из США, Фан Д. (Fang D.), Лу Т.Дж. (Lu T.J.) из КНР и Скрипняк В.А. из России. Несмотря на обширный мировой охват исследователей, большое число работ посвящены поиску существующих и способам разработки новых видов структур, но отсутствуют детальные изучения уже известных метаматериалов. Достаточно много работ посвящено методикам получения необычных свойств

метаматериалов за счет выбора их конкретной структуры не хирального типа. В свою очередь, группа ученых из Германии под руководством Френцель Т. (Frenzel T.) получила широкую известность за изучение оптических и акустических свойств тетрахиральных структур метаматериалов. В меньшей степени раскрыт вопрос механического поведения и изучения механических свойств тетрахирального метаматериала.

Цель и задачи исследования. Цель диссертационной работы заключается в установлении на основе численного моделирования закономерностей деформирования механического тетрахирального метаматериала, а также изменения его эффективных свойств в зависимости от параметров, характеризующих его тетрахиральную структуру.

Для достижения поставленной цели в работе поставлены и решены следующие задачи:

1. Выбрать частные случаи структуры тетрахирального метаматериала при изменении параметров элементов его элементарной ячейки, метода соединения ячеек в образце и топологических преобразований в ячейках.
2. Провести численные эксперименты по одноосному нагружению образцов ячеистого тетрахирального метаматериала с разными параметрами структуры.
3. Выявить закономерности влияние параметров тетрахиральной структуры на деформационное поведение метаматериала.
4. Проанализировать зависимости эффективных упругих свойств изучаемого метаматериала от параметров его структуры.
5. Определить параметры структуры, соответствующие рациональному сочетанию механических свойств тетрахирального метаматериала.

Научная новизна. В процессе проведения исследования получены новые научные результаты:

- Исследован нетривиальный отклик (эффект «нагружение–скручивание») образца из тетрахирального метаматериала при независимом и совместном изменении базовых параметров структуры;
- Определены эффективные характеристики, такие как модуль Юнга и коэффициент Пуассона для различных вариаций параметров элементов тетрахиральной структуры метаматериала;
- Предложены способы программируемости механических свойств метаматериала на уровне структурных параметров, топологического расположения тетрахиральных структур в кубической ячейке, соединения элементарных ячеек;
- Получены аналитические формулы для расчета объема базового материала в образце из метаматериала;

- Предложен новый способ соединения элементарных ячеек для достижения лучшего эффекта «нагружение–скручивание»;
- Исследованы механические свойства элементарных ячеек хирального метаматериала без топологического дефекта и с его наличием.

Теоретическая и практическая значимость работы. Теоретическая значимость обусловлена тем, что:

- поставлена и решена задача о влиянии параметров тетрахиральной структуры метаматериала на особенности его механического поведения;
- установлена связь между геометрической микроструктурой и особенностями напряженного состояния в тетрахиральном метаматериале;
- раскрыты механизмы необычного деформационного поведения хирального метаматериала, позволяющие находить рациональное соотношение параметров его структуры для функциональных применений.

Практическая значимость заключается в возможных приложениях полученных результатов: на основе полученных зависимостей эффективных упругих модулей метаматериала могут быть разработаны и обоснованы варианты структурной организации метаматериала, реализующие заданные значения выбранных упругих характеристик; по результатам численных исследований могут вырабатываться рекомендации по созданию натурных образцов, обеспечивающих заданные механическое поведение и значения упругих модулей (например, отрицательное или нулевое значение коэффициента Пуассона) механического метаматериала; полученные результаты могут быть применены для разработки метаматериалов для конкретной практической сферы применения (ударозащитные материалы, крепеж, медицинская техника, спортивный инвентарь, и т.п.).

Личный вклад автора. Автором диссертационной работы совместно с научным руководителем определена цель, поставлены и решены задачи исследования, проведен теоретический анализ выбранного направления исследований. Выбор тетрахиральной структуры механического метаматериала, анализ базовых параметров структуры, выбор математической модели и численные эксперименты проведены соискателем самостоятельно. Построение зависимостей, выявление особенностей напряженно-деформируемого состояния и описание эффективных характеристик при варьировании параметров структуры выполнены самостоятельно. Анализ и обсуждение полученных результатов, формулировка выводов и положений диссертации, подготовка публикаций по выполненному исследованию проводились совместно с научным руководителем.

Методология и методы исследований. В качестве основного метода исследования используется математическое моделирование с применением аналитических способов расчета

механического поведения и средств вычислительной механики деформируемого твердого тела. Численное моделирование одноосного нагружения образца из механического тетрахирального метаматериала проводилось методом конечных элементов в ведущем инженерном программном комплексе ANSYS. Задача о статическом нагружении образцов решена в рамках теории упругости. Нетривиальный отклик (скручивание) метаматериала на макроуровне рассматривается как результат коллективной согласованной реакции структурных элементов мезоскопического пространственного масштаба, который сопровождается взаимовлиянием разных элементов структуры.

Детальное исследование особенности структурной организации метаматериалов на мезоуровне (масштабном уровне элементарной ячейки структуры) позволяет определить эффективные упругие свойства метаматериала на макроуровне в результате процедуры численного усреднения.

Положения, выносимые на защиту:

1. Результаты численного моделирования необычного механического отклика (эффект «нагружение–скручивание») образца из тетрахирального метаматериала при независимом и совместном изменении базовых параметров структуры, позволяющие найти их рациональное соотношение для обеспечения требуемых механических свойств.

2. Метод внедрения и исключения топологических дефектов на масштабах элементарной ячейки и образца из метаматериала для управления его свойствами: увеличения или уменьшения эффекта «нагружение–скручивание», достижения ортотропии эффективных упругих характеристик.

3. Установленные закономерности влияния геометрических параметров тетрахиральной структуры на эффективные упругие характеристики метаматериала, демонстрирующие изменение относительного модуля Юнга (по сравнению с модулем базового материала) в диапазоне от 0,005 до 0,1 и нулевое значение коэффициента Пуассона для тетрахирального метаматериала с пористостью 84–99%.

Степень достоверности результатов исследования и выводов обосновывается применением апробированных программных комплексов, выбором современных методов численного моделирования и корректной математической постановкой решаемых задач, а также согласием полученных в работе результатов с результатами других авторов, известными из литературного обзора.

Апробация результатов исследования. Основные результаты и положения научно–квалификационной работы (диссертации) доложены и обсуждены на следующих конференциях:

IX Международная молодежная научная конференция «Актуальные проблемы современной механики сплошных сред и небесной механики» (Томск, 2019, 2020), V

Всероссийский научный семинар «Междисциплинарные проблемы аддитивных технологий» (Томск, 2019), Международная конференция «Физическая мезомеханика. Материалы с многоуровневой иерархически организованной структурой и интеллектуальные производственные технологии» (Томск, 2020, 2021, 2022), XIV Международная конференция «Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций» (Екатеринбург, 2020, 2021, 2022), Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Перспективы развития фундаментальных наук» (Томск, 2020, 2021, 2022, 2023), Международная научно-техническая молодежная конференция «Перспективные материалы конструкционного и функционального назначения» (Томск, 2020, 2022), 2nd International Workshop on Plasticity, Damage and Fracture of Engineering Materials (Анкара, Турция, онлайн, 2021), II Международная конференция «Композитные материалы и конструкции» (Москва, онлайн, 2021), Международная научная конференция «Современные материалы и передовые производственные технологии» (Томск, 2021), XI Всероссийская научная конференция «Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики», посвящённая 60-летию Физико-технического факультета ТГУ (Томск, 2022), XXXI Всероссийская школа-конференция «Математическое моделирование в естественных науках» (Пермь, онлайн, 2022),

По теме диссертации опубликовано 16 работ, в том числе 8 статей в журналах, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (из них 4 статьи в зарубежных научных журналах, входящих в Web of Science; 1 статья в зарубежном научном журнале, входящем в Scopus; 1 статья в российском научном журнале, входящем в Web of Science; 1 статья в российском научном журнале, входящем в Russian Science Citation Index), 8 статей в сборниках материалов конференций, представленных в изданиях, входящих в Web of Science и / или Scopus.

Работа выполнена в рамках следующих проектов:

– Проект Российского научного фонда № 16-19-10264 «Теоретико-экспериментальное исследование взаимодействия и способов защиты элементов наземных объектов и космических аппаратов от высокоскоростных ударников» (2016–2020, исполнитель)

– Проект Государственного задания ИФПМ СО РАН FWRW-2019-0035 «III.23.2.12 Многокомпонентные материалы и структуры, в том числе синтезируемые аддитивными методами: разработка, связанных термо-механо-химических моделей, изучение функциональных свойств и особенностей механического поведения при интенсивных внешних воздействиях» (2019–2021, исполнитель)

– Проект государственного задания ИФПМ СО РАН FWRW-2022-0003 «Многокомпонентные структурно-неоднородные материалы в комбинированных технологиях: термомеханика систем со взаимодействующими компонентами в условиях синтеза, обработки и эксплуатации» (2022–2025, исполнитель)

– Программа развития Томского государственного университета (Приоритет-2030) «Исследование программируемости свойств механического тетрахирального метаматериала» (2022, руководитель)

– Проект Российского научного фонда № 23-29-00402 «Исследование влияния параметров структуры хирального метаматериала на его способность сопротивлению одноосного деформирования для обеспечения программируемых свойств» (2023–2024, руководитель).

Структура и объем работы. Кандидатская диссертация состоит из введения, трех разделов и заключения, списка литературы, изложенных на 121 странице машинописного текста, содержит 38 иллюстраций и 5 таблиц. Список литературы включает 197 наименования.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы научно–квалификационной работы (диссертации), сформулированы цель и задачи исследования, отражены научная новизна и практическая значимость, приведены выносимые на защиту положения, а также обоснованность и достоверность результатов и выводов.

Первая глава посвящена обзору публикаций по теме механических метаматериалов и обоснованию выбора тетрахиральной структуры в качестве изучаемого объекта. Метаматериал – материал, свойства которого зависят в меньшей степени от химического состава базового материала, и в большей степени от структурной организации на макроуровне. Метаматериалы не являются материалами в обычном смысле. Они – продукты человеческой изобретательности, не наблюдаемые в природе.

В отличии от традиционной композитной инженерии, в которой методы изучения ориентируются на взаимодействие между составными частями, составляющими материал, в метаматериалах основную роль играют конструкционные особенности в дизайне их структуры на масштабах, намного выше атомарного. Некоторые типы метаматериалов обеспечивают новые функциональные возможности, такие как настраиваемые жесткость, модуль сдвига, отрицательная сжимаемость, отрицательное тепловое расширение и ауксетическое поведение. Следовательно, метаматериалы можно рассматривать как композиты, но существенное их отличие от обычных композитов состоит в том, что они проявляют, по крайней мере, одно необычное свойство, не наблюдаемое в природе. Из этого можно понять, что всякий метаматериал – композит, но не каждый композит – метаматериал.

Принято разделять метаматериалы на категории в соответствии с тремя упругими модулями: 1) модулем Юнга (E), 2) модулем сдвига (G) и модулем объемного сжатия (K), 3) коэффициентом Пуассона (ν). Такая классификация механических метаматериалов позволяет показать комплексное развитие направлений в науке о метаматериалах и выяснить наиболее перспективные типы структуры метаматериалов.

Тетрахиральная структура, как показывает мировой опыт, вызывает интерес и изучается в соответствии с тремя упругими модулями. Необычным механическим свойством таких структур является их скручивание при одноосном силовом нагружении. В результате этого наблюдаются повороты сечений образца из метаматериала. Понимание и выявление ключевых особенностей механического тетрахирального метаматериала является предварительным условием его реализации в практических приложениях. Необходимо выяснить его возможности для достижения определенных механических свойств. Другими словами, свойства такого типа структур можно программировать и задавать на этапе разработки.

Во второй главе рассмотрены часто встречающиеся математические модели для исследования механических метаматериалов. Также приведена математическая постановка, включающая систему уравнений, описан метод конечных элементов и используемые граничные условия.

Построение физической модели включает в себя идеализацию свойств, формы конструкции и внешних воздействий. В практических расчетах учесть все имеющиеся особенности конструкции и нагрузки невозможно.

Задача одноосного нагружения образца из механического метаматериала решалась в рамках теории упругости в виду малых значений деформации и перемещений. Для интересующих нас полей перемещений, деформаций и напряжений система уравнений теории упругости включает уравнения равновесия (1), соотношения Коши (2) и закон Гука (3):

$$\nabla_j \cdot \sigma_{ij} = 0 \tag{1}$$

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right) \tag{2}$$

$$\sigma_{ij} = \lambda \cdot \delta_{ij}\varepsilon_{kk} + 2 \cdot \mu \cdot \varepsilon_{ij} \tag{3}$$

где σ_{ij} – компоненты тензора напряжений, ε_{ij} – компоненты тензора деформаций, x_i – пространственные координаты, u_i – компоненты вектора перемещений, $\lambda = \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)}$, $\mu = \frac{E}{2(1+\nu)}$ – коэффициенты Ламе, связанные с модулем Юнга (E) и коэффициентом Пуассона (ν), δ_{ij} – символ Кронекера, i,j = 1,2,3.

В начальный момент времени ($t_0 = 0$) приняты условия отсутствия начальных напряжений и деформаций:

$$\sigma_{ij}(t_0) = \varepsilon_{ij}(t_0) = 0.$$

В работе численно рассмотрена задача одноосного нагружения образца из механического метаматериала, которой соответствуют следующие граничные условия:

$u_i = 0$ для $x_i \in S_1$, $u_2 = -0.03l$ и $\sigma_{12} = \sigma_{23} = 0$ для $x_i \in S_2$, $\sigma_{ij}n_j = 0$ для $x_i \in S_3$,

где S_1 – нижняя грань, S_2 – верхняя грань, S_3 – оставшиеся грани образца, l – начальная длина образца вдоль оси 2(y), n_j – компоненты вектора нормали к поверхности S_3. Это означает, что на нижней грани образца были наложены условия жесткой заделки, а на верхней грани задавалось перемещение вниз (сжатие) на 3 %. Перемещение может быть задано со знаком плюс (растяжение) или минус (сжатие). При растяжении и сжатии механическое поведение и отклонения от исходного положения оказываются одинаковыми по абсолютному значению, но разными по знаку. На остальных гранях образца заданы свободные граничные условия.

В данной работе для упругих постоянных были приняты следующие значения: E = 200 ГПа – модуль Юнга, ν = 0,3 – коэффициент Пуассона. Особенности механического поведения метаматериалов и их необычные свойства в большей степени зависят от геометрии макроструктуры метаматериала, а не от значений упругих модулей.

Численное моделирование проводилось методом конечных элементов в программном инженерном комплексе Ansys WB 2020R2. Элементы тетрахиральной структуры рассматривались как система стержней, которые при расчете методом конечных элементов моделировалась, как совокупность твердотельных элементов.

В третьей главе представлены этапы создания геометрической модели образца из метаматериала, а именно подробно описана структура метаматериала, изучаемого в данной работе и как она создается в средствах компьютерного проектирования. Рассмотрим построение ячеистой структуры образца из метаматериала (рис. 1а). Он состоит из элементарных ячеек (рисунок 1б). Ячейка является кубической и состоит из тетрахиральных структур (рисунок 1в). Как показано на рисунке 1в, пять параметров определяют геометрию тетрахиральной структуры: l = 50 мм – длина тетрахиральной структуры, t = 5 мм – ширина связки, h = 5 мм – толщина структуры, r_2 = 17,5 мм – внешний радиус кольца, r_1 = 12,5 мм – внутренний радиус кольца, θ = 25° – угол наклона связки. Если связка соединяется с кольцом по касательной, то существует геометрическая связь между радиусами кольца, размером ячейки и углом θ.

Математическое моделирование для исследования механического поведения, включая нетривиальный отклик – скручивание образца, и определения эффективной силовой характеристики (через силу реакции опоры проводилось при изменении параметров тетрахиральной структуры. Все параметры подбирались независимо, это значит, к примеру, что, при изменении ширины стержня, толщина и другие параметры оставались исходными. Таким же образом варьировались все оставшиеся параметры.

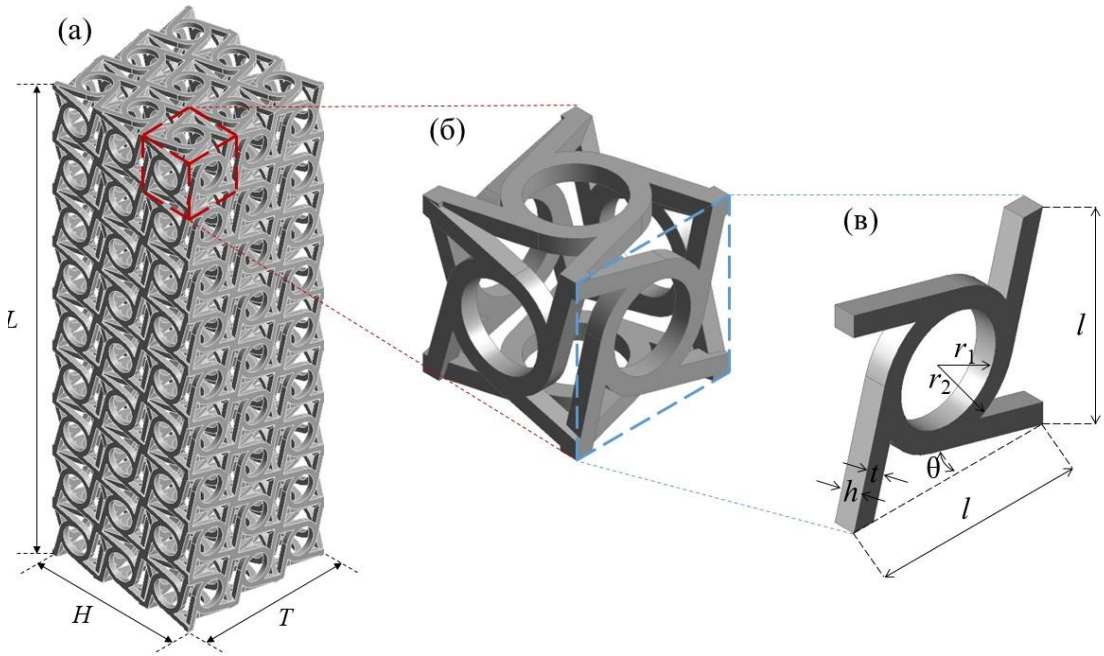


Рисунок 1 – Построение трехмерного образца из механического тетрахирального метаматериала.

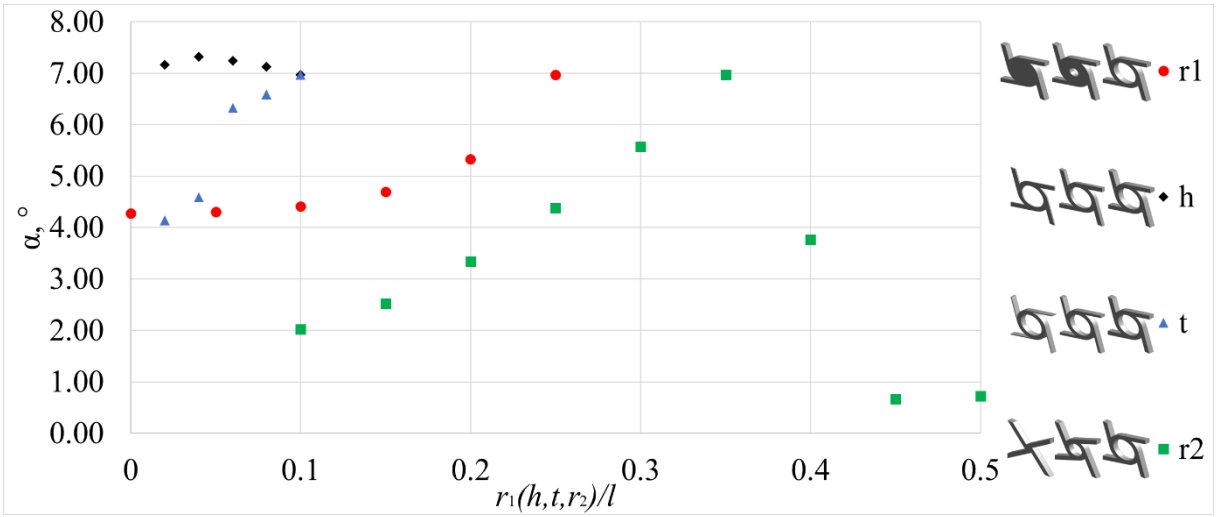
Результат влияния переменных параметров на значения угла поворота верхнего сечения образца из метаматериала и безразмерного значения эффективного модуля Юнга представлен на рисунке 2. При уменьшении внутреннего радиуса кольцевого элемента тетрахиральной структуры (r_1, от 12,5 мм до 0 мм) метаматериала угол поворота уменьшается. Это связано с объемом базового материала, он увеличивается и заполняет больше пространства. Поэтому, необходимо затратить больше усилий для деформирования объемного метаматериала (рис. 2б).

Изменение параметра толщины структуры метаматериала (h, от 5 мм до 1 мм) практически не влияет на угол поворота верхней грани образца (рис. 2а), но благодаря уменьшению объема базового материала в образце способность сопротивляться одноосному сжатию (рис. 2б).

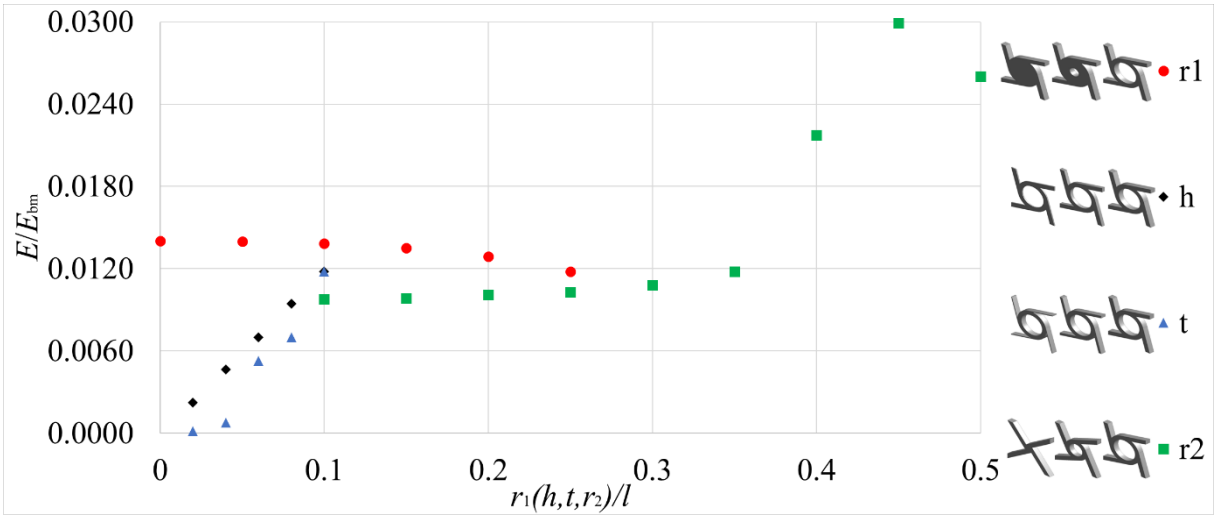
Уменьшение параметра t (от 5 мм до 1 мм) приводит к снижению значения угла поворота грани образца (рис. 2а), значения соответствуют углу поворота при изменении r_1. Уменьшение t позволяет меньше затрачивать механических усилий для сжатия образца из метаматериала на аналогичное значение деформирования (рис. 2б).

Внешний радиус (r_2) изменялся от 5 мм до 25 мм (геометрическая связь размера кольца и тетрахиральной структуры) и зависимость показывает наибольшее значение угла поворота, после которого идет резкое снижение эффекта «нагружение скручивание» (рис. 2а). Подобный эффект связан с увеличение площади контакта элементов тетрахиральной структуры (кольцо и

связки). Это влияет на способность сопротивляться нагружению: пропадает механизм скручивания и возрастает значение эффективного модуля Юнга (рис. 2б).



а



б

Рисунок 2 – Зависимости скручивания метаматериала (а) и реакции опоры (б) от переменных параметров тетрахиральной структуры.

Анализируя внутреннюю структуру и соединения ячеек был предложен новый способ соединения элементарных ячеек – «внахлест», который отличается от обычного метода «присоединение» тем, что не удваивает толщину внутренних перегородок в образце из метаматериала, образованных гранями элементарных ячеек. Новый способ соединения ячеек положительно сказывается на скручивании тетрахиральных структур и эффекте «нагружение – скручивание». Это проверено на системе из двух и девяти элементарных ячеек. Изменяя способ соединения ячеек в образце из метаматериала или вводя топологические дефекты и изменяя

параметры структуры, можно программировать свойства и контролировать удельные характеристики метаматериала, к примеру, изменение пористости.

Также в данной главе приводятся результаты исследования деформационного поведения модифицированного метаматериала. Метод «внахлест» существенно влияет на пористость и объем базового материала в образцах из метаматериала. Для расчета объема базового материала получены аналитические формулы, которые проверялись для одномерного стержня, двумерной пластины и трехмерного образца. Сравним экономию базового материала в двумерном и трехмерном образцах при равном количестве ячеек в них. Для метода соединения ячеек «присоединение» нетрудно показать, что вне зависимости от расположения ячеек при равном количестве ячеек в плоскости и пространстве количество граней сохранит свое значение (рисунок 3). Более интересный эффект получается в методе «внахлест», в этом случае расположение ячеек в пространстве экономит базовый материал больше, чем в плоскости. Это связано с большим количеством контактирующих граней ячеек. В двумерном случае ячейка контактирует, по меньшей мере, по двум граням ячейки, а в трехмерном – по трем.

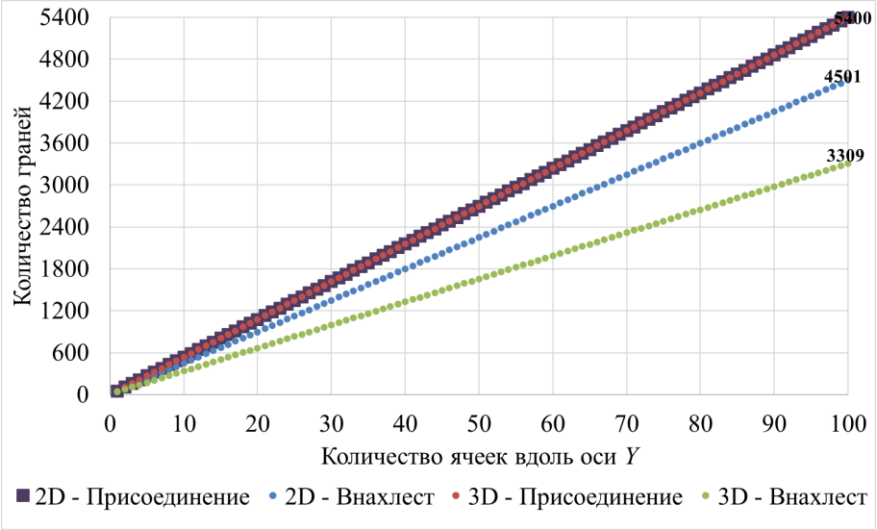


Рисунок 3 – Количество граней при создании двумерного и трехмерного образцов из метаматериала двумя методами соединения ячеек.

Для модифицированного метаматериала, полученного соединением ячеек методом «внахлест», изучено как влияют параметры его тетрахиральной структуры на его механическое поведение. Изменение параметров структуры метаматериала можно также производить двумя способами. Случай, когда они зависят друг от друга, является частным случаем задачи с изменением параметров. В данной главе приведены результаты механического поведения при изменении всех параметров структуры единовременно (зависимо). Будем считать, что все элементы хиральной структуры имеют одинаковое поперечное сечение квадратной формы, а

связки присоединяются к кольцу только по касательной. Тогда структура метаматериала характеризуется только двумя параметрами r_2 или θ и площадью поперечного сечения элементов структуры S. Значением r_2 можно управлять через параметр θ и наоборот. Зависимость угла скручивания и безразмерного значения эффективного модуля Юнга от r_2 и S представлена на рисунке 4.

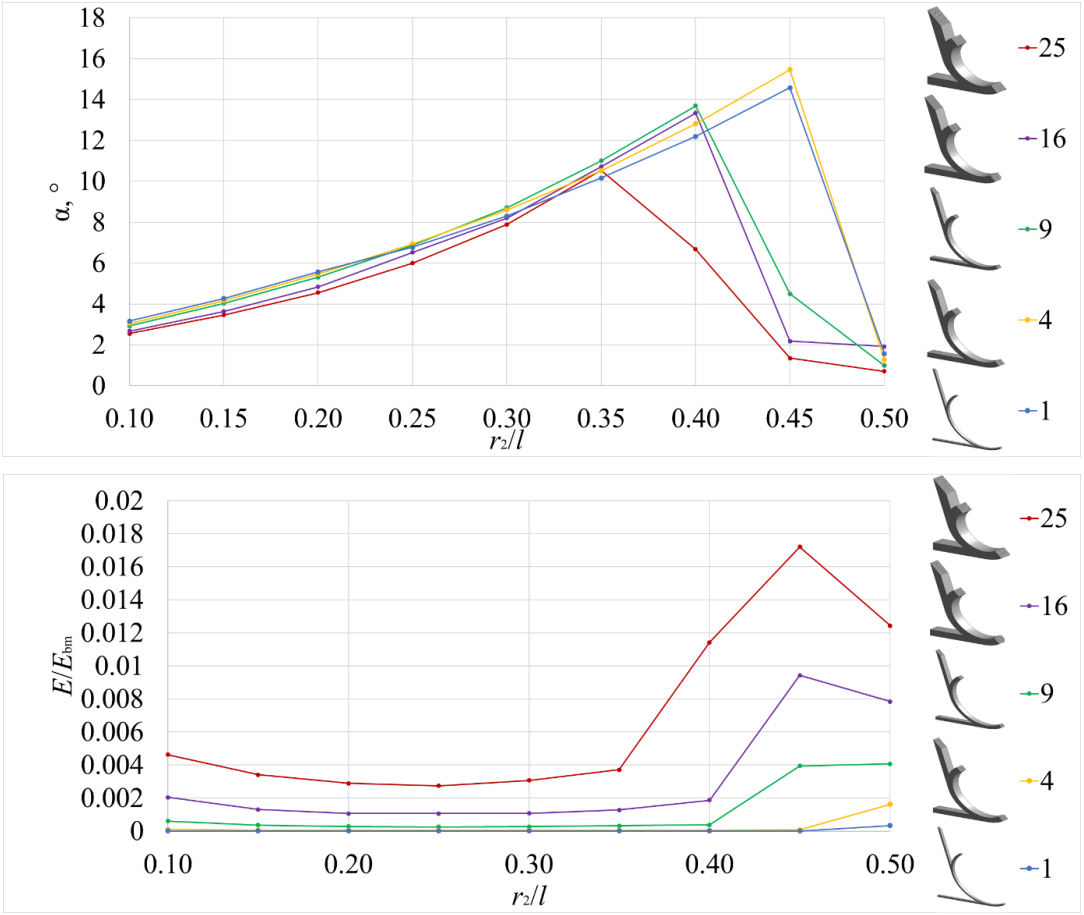
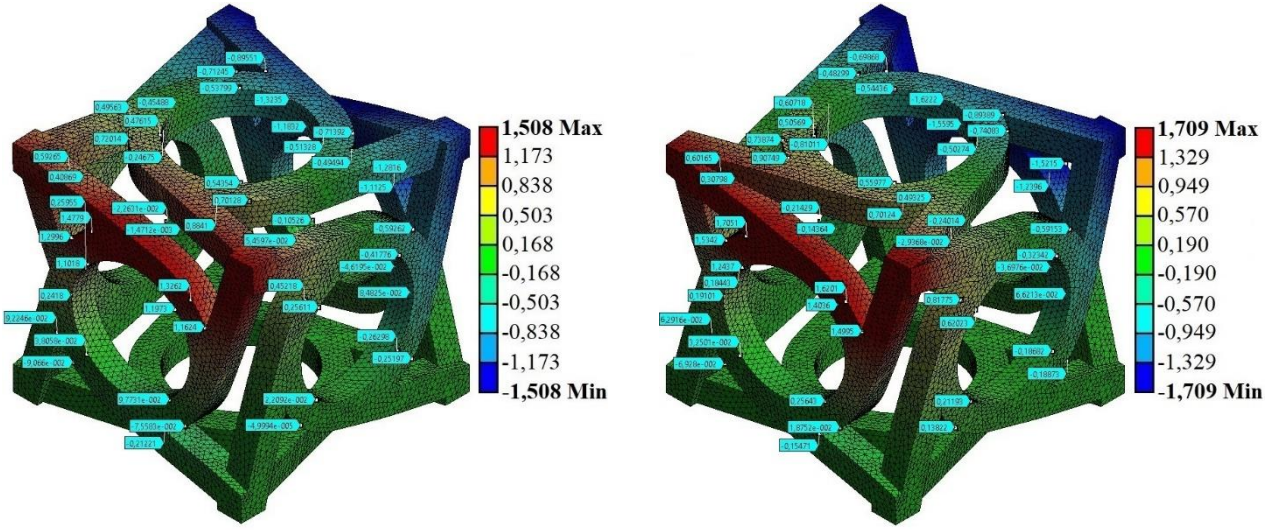


Рисунок 4 – Зависимости угла поворота верхнего сечения образца от внешнего радиуса кольца для различных значений площади поперечного сечения элементов структуры метаматериала.

Результаты получены для различных площадей поперечного сечения элементов структуры метаматериала (связки и кольца), которые варьировались от 1 мм^2 до 25 мм^2. Это связано с попарным изменением t и h от 1 мм до 5 мм. Заметим, что это приводит также к увеличению разницы между r_2 и r_1. Видно, что характер зависимостей, характеризующийся резким максимумом, повторяется для различных площадей поперечного сечения. Этот эффект обусловлен одинаковой структурой метаматериала. На представленных графиках выделяются два участка, характеризующие разные тенденции в поведении образца из метаматериала. Первый участок показывает увеличение угла поворота до максимального значения. Это говорит о том, что увеличение радиуса кольца может улучшить механический отклик образца на

скручивание. Далее наблюдается резкое уменьшение значения угла поворота α, что обусловлено увеличением площади контакта кольца со связками в структуре метаматериала.

В четвертой главе исследуются эффективные физико-механические свойства ячеистого тетрахирального метаматериала. Рассматриваемая структура метаматериала по своей природе не может являться изотропной, но имеет предпосылки для ортотропии свойств. Далее станет понятно, что такие метаматериалы можно создавать трансверсально-изотропными. Для того чтобы достичь ортотропии свойств на уровне элементарной ячейки, необходимо симметрично располагать тетрахиральные структуры. В противном случае, внедренные топологические дефекты на уровне элементарной ячейки – изменение направления хиральности одной или нескольких граней – приводят к непредсказуемому результату. При вращении каждой грани в одну сторону, к примеру, по часовой стрелке, в элементарной ячейке предполагается ортотропия механического поведения (рис. 5а). В то время как, для достижения максимального эффекта «нагружение–скручивание» необходимо расположить верхнюю грань с другим направлением вращения (рис. 5б).



а б

Рисунок 5 – Смещения в элементарных ячейках метаматериала и реперных точках вдоль оси *X* при нагружении вдоль оси *Y* в конфигурациях без топологического дефекта (а) и с топологическим дефектом (б). Величины перемещений указаны в мм

Вне зависимости от конфигурации элементарной ячейки (без топологического дефекта и с его внедрением) ячейка скручивается, изменяя свою форму. При этом деформация одной грани ячейки происходит не в одной плоскости. Это является главной проблемой определения эффективного коэффициента Пуассона с таким типом деформирования. При рассмотрении ячейки без дефекта было обнаружено, что отклонения по осям *X* и *Z* соизмеримы. Это значит,

что поперечная деформация отсутствует, а верхняя грань совершает чисто вращательное движение. При этом деформация сжатия вдоль оси нагружения Y постоянна и не равна нулю. Используя формулы конечно-разностного численного метода, были рассчитаны деформации через перемещения нескольких точек на элементарных ячейках, и по ним определены значения эффективного коэффициента Пуассона. Например, формула для ν_{xy} имеет вид:

$$\nu_{xy} = -\frac{(u_{x2} - u_{x4})(z_3 - z_1) - (u_{x3} - u_{x1})(z_2 - z_4)}{(z_2 - z_4)(x_3 - x_1) - (z_3 - z_1)(x_2 - x_4)} \frac{l}{u_y}$$

В симметрично составленной кубической ячейке эффективное значение коэффициента Пуассона равнялось 0,078 вне зависимости от оси нагружения. Внедренный топологический дефект позволил достичь ауксетических свойств метаматериала – отрицательного эффективного значения коэффициента Пуассона. При изменении оси нагружения были получены следующие результаты: $\nu_{xy} = -0{,}046$; $\nu_{zy} = -0{,}046$; $\nu_{yx} = -0{,}142$; $\nu_{zx} = 0{,}380$; $\nu_{yz} = -0{,}142$; $\nu_{xz} = 0{,}380$. То есть вычисленные значения соответствуют модели трансверсально-изотропного тела с плоскостью изотропии XZ.

Эффективный модуль Юнга является одной из важных механических характеристик для оценки эффективности конструкций. Зная реакцию опоры, можно определить и эффективное значение модуля Юнга. Для всех сценариев нагружения ячейки без топологического дефекта получено единое значение: 0,231 ГПа для ортотропной элементарной ячейки. Для трансверсально-изотропной ячейки эффективные значения модуля Юнга имели значения $E_x = 0{,}310$ ГПа, $E_y = 0{,}356$ ГПа, $E_z = 0{,}310$ ГПа.

Для конфигурации с топологическим дефектом картина распределения напряжений характеризуется наличием более сильных концентраторов напряжений в области присоединения верхней грани. Максимальное значение эквивалентных напряжений в три раза выше, чем в ячейке без топологического дефекта. Это свидетельствует о неоптимальном построении метаматериала с точки зрения распределения напряжений.

В **заключении** приведены основные результаты и выводы диссертационной работы. В работе выполнен комплекс численных исследований с целью изучения процессов деформирования и изменения эффективных свойств механических метаматериалов в зависимости от особенностей их структуры.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполненных работ получены следующие результаты и сформулированы выводы:

1. В результате численного моделирования одноосного нагружения механического тетрахирального метаматериала исследован эффект «нагружение–скручивание» при независимом и совместном изменении базовых параметров, характеризующих тетрахиральную

структуру. Изменение параметров и рассмотрение частных случаев структуры тетрахирального метаматериала позволило определить степень влияния выбранных параметров и обнаружить диапазон изменения угла поворота верхней грани образца от 0,99° до 15,47°. Выявлены диапазоны значений параметров, обеспечивающих наибольший рост скручивания образца, также выяснено, что две из четырех зависимостей являются нелинейными с участками сильного и слабого изменения. Это позволяет выбрать рациональное соотношение параметров тетрахиральной структуры данного класса метаматериалов для обеспечения требуемых механических свойств.

2. На основе численных результатов установлены закономерности влияния геометрических параметров тетрахиральной структуры на эффективные упругие характеристики метаматериала. Значения эффективного модуля Юнга метаматериала меньше модуля Юнга базового материала в 200 раз в некоторых конфигурациях параметров структуры метаматериала, что связано с большой долей объема порового пространства (84–99%.). Значение эффективного коэффициента Пуассона в образце из метаматериала оказалось равным нулю из-за отсутствия поперечной деформации горизонтальных структур в выбранном диапазоне варьирования параметров тетрахиральной структуры.

3. Предложен и продемонстрирован новый метод соединения элементарных ячеек в образце из метаматериала – «внахлест», обладающий двумя преимуществами перед методом соединения «присоединение»: 1) не возникает утолщения внутренних стенок при соединении ячеек, 2) не возникает разносторонней хиральности. Обнаружено, что в случае «присоединения» двух ячеек центр вращения системы расположен в месте соединения ячеек, что приводит к симметричной картине скручивания, но уменьшает значение угла поворота.

4. Установлено, что количественные значения интенсивности напряжений в образцах, полученных методом «внахлест», меньше, чем в образцах, полученных методом «присоединение». Минимальные значения напряжений обнаруживаются в связках тетрахиральной структуры, что связано с закручиванием кольца, обеспечивающим равномерное распределение деформации по всем связкам. Максимальная интенсивность напряжений отмечается в местах крепления связок к кольцу и соединения соседних тетрахиральных структур. В системе двух ячеек, полученной методом «присоединение», в месте контакта ячеек также возникают напряжения.

5. Предложен метод внедрения и исключения топологических дефектов на уровне одной ячейки. В отсутствие дефекта отмечается регулярная структура с односторонней хиральностью во всех гранях элементарной ячейки метаматериала, что обеспечивает ортотропию его свойств. При введении топологического дефекта, представляющего собой изменение стороны

хиральности верхней грани кубической ячейки, удалось увеличить эффект «нагружение–скручивание» на 13 %.

6. Численные расчеты для определения эффективных упругих модулей тетрахирального метаматериала подтвердили, что элементарные ячейки с регулярной структурой проявляют ортотропность, а с внедренным топологическим дефектом – трансверсальную изотропность свойств метаматериала. Значения эффективного модуля Юнга для случая регулярной структуры равнялось 0,231 ГПа, а значения коэффициента Пуассона составили 0,078 в трех ортогональных направлениях. В ячейках с топологическим дефектом модуль Юнга увеличился до 0,310 ГПа, 0,356 ГПа и 0,310 ГПа при нагружении в трех ортогональных направлениях, причем максимальное значение соответствовало направлению нагружения перпендикулярно грани с дефектом. Значения эффективного коэффициента Пуассона при изменении оси нагружения соответствовали модели трансверсально-изотропного тела: ν_{xy}=−0,046; ν_{zy}=−0,046; ν_{yx}=−0,141; ν_{zx}=0,380; ν_{yz}=−0,141; ν_{xz}=0,380. Отрицательные значения коэффициента Пуассона позволяют говорить об ауксетических свойствах этого метаматериала.

СПИСОК РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук:

1. **Ахметшин Л. Р.** Влияние параметров элементарной ячейки тетрахирального механического метаматериала на его эффективные свойства / Л. Р. Ахметшин, И. Ю. Смолин // Вестник Санкт-Петербургского университета. Математика. Механика. Астрономия. – 2021. – Т. 8, № 66. – С. 150–157. – DOI: 10.21638/spbu01.2021.113. – 0,59 / 0,30 а.л. (*Russian Science Citation Index*).

2. **Ахметшин Л. Р.** Анализ некоторых методов соединения ячеек в механическом тетрахиральном метаматериале / Л. Р. Ахметшин, И. Ю. Смолин // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. – 2022. – № 77. – С. 27–37. – DOI: 10.17223/19988621/77/3. – 0,65 / 0,33 а.л.

Web of Science: Akhmetshin L. R. Analysis of some methods of integration of cells in a mechanical metamaterial / L. R. Akhmetshin, I. Yu. Smolin // Vestnik Tomskogo Gosudarstvennogo Universiteta, Matematika i Mekhanika. – 2022. – № 77. – P. 27–37.

3. **Ахметшин Л. Р.** Программируемое поведение метаматериала при изменении способа соединения элементарных ячеек / Л. Р. Ахметшин, И. Ю. Смолин // Вестник ПНИПУ. Механика. – 2023. – № 1. – С. 26–32. – DOI: 10.15593/perm.mech/2023.1.03. – 0,82 / 0,41 а.л.

Web of Science: Akhmetshin L. R. Programmable behavior of the metamaterial by kinds of unit cells connection / L. R. Akhmetshin, I. Yu. Smolin // PNRPU Mechanics Bulletin. – 2023. – № 1. – P. 26–32.

4. **Akhmetshin L. R.** Influence of unit cell parameters of tetrachiral mechanical metamaterial on its effective properties / L. R. Akhmetshin, I. Yu. Smolin // Nanoscience and Technology: An International Journal. – 2020. – Vol. 11, is. 3. – P. 265–273. – DOI: 10.1615/NanoSciTechnolIntJ.2020033737. – 0,44 / 0,22 а.л. (*Web of Science*).

5. **Akhmetshin L. R.** A novel mechanical two-dimensional tetrachiral metamaterial / L. R. Akhmetshin // Nanoscience and Technology: An International Journal. – 2022. – Vol. 13, is. 2. – P. 15–22. – DOI: 10.1615/NanoSciTechnolIntJ.2021038840. – 0,39 а.л. (*Web of Science*).

6. **Akhmetshin L. R.** Characterization of a chiral metamaterial depending on the type of connection between unit cells / L. R. Akhmetshin, I. Yu. Smolin // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science. – 2022. – Vol. 236, is. 19. – P. 10214–10220. – DOI: 10.1177/09544062221101832. – 0,58 / 0,29 а.л. (*Web of Science*).

7. **Akhmetshin L. R.** Effect of the type of unit cell connection in a metamaterial on its programmable behavior / L. R. Akhmetshin, I. Yu. Smolin // Nanoscience and Technology: An International Journal. – 2023. – Vol. 14, is. 3 – P. 63–71. – DOI: 10.1615/ NanoSciTechnolIntJ.2022044662. – 0,56 / 0,28 а.л. (*Web of Science*).

8. **Akhmetshin L. R.** Response Evolution of a Tetrachiral Metamaterial Unit Cell under Architectural Transformations / L. Akhmetshin, K. Iokhim, E. Kazantseva, I. Smolin // Symmetry. – 2023. – Vol. 15, is. 1. – Article number 14. – 13 p. – URL: https://www.mdpi.com/2073-8994/15/1/14. – DOI: 10.3390/sym15010014. – 0,87 / 0,22 а.л. (*Scopus*).

Статьи в сборниках материалов конференций, представленных в зарубежных научных изданиях, входящих в Web of Science и / или Scopus:

9. **Akhmetshin L. R.** Numerical study of the effective modulus of elasticity of three-dimensional mechanical metamaterial / L. R. Akhmetshin // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – Vol. 1611 : Proceedings of the 17th International Conference of Students and Young Scientists on Prospects of Fundamental Sciences Development, PFSD 2020. Tomsk, Russian Federation, April 21–24, 2020. – Article number 12002. – 5 p. – URL: https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1611/1/012002 (access date: 15.06.2023). – DOI: 10.1088/1742-6596/1611/1/012002. – 0,30 а.л. (*Scopus*).

10. **Akhmetshin L. R.** Analytical and Numerical Analysis of the Deformation Behavior of Tetrachiral Metamaterial / L. R. Akhmetshin, K. V. Iokhim // AIP Conference Proceedings. – 2020. – Vol. 2310, is. 1 : Proceedings of the International Conference on Physical Mesomechanics. Materials with Multilevel Hierarchical Structure and Intelligent Manufacturing Technology 2020. Tomsk,

Russian Federation, October 05–09, 2020. – Article number 20006. – 4 p. – URL: https://pubs.aip.org/aip/acp/article/2310/1/020006/781693/Analytical-and-numerical-analysis-of-the (access date: 15.06.2023). – DOI: 10.1063/5.0034072. – 0,25 / 0,13 а.л. (*Web of Science*).

11. **Akhmetshin L. R.** Deformation Features of the Two-dimensional Mechanical Tetrachiral Metamaterial / L. R. Akhmetshin, I. Yu. Smolin // AIP Conference Proceedings. – 2020. – Vol. 2310, is. 1 : Proceedings of the International Conference on Physical Mesomechanics. Materials with Multilevel Hierarchical Structure and Intelligent Manufacturing Technology 2020. Tomsk, Russian Federation, October 05–09, 2020. – Article number 20007. – 4 p. – URL: https://pubs.aip.org/aip/acp/article/2310/1/020007/781642/Deformation-features-of-the-two-dimensional (access date: 15.06.2023). – DOI: 10.1063/5.0034078. – 0,25 / 0,13 а.л. (*Web of Science*).

12. **Akhmetshin L. R.** The Localization of Deformations in Mechanical Metamaterial with a Twist. Numerical Investigation / L. R. Akhmetshin, I. Yu. Smolin // AIP Conference Proceedings. – 2020. – Vol. 2310, is. 1 : Proceedings of the International Conference on Physical Mesomechanics. Materials with Multilevel Hierarchical Structure and Intelligent Manufacturing Technology 2020. Tomsk, Russian Federation, October 05–09, 2020. – Article number 20008. – 4 p. – URL: https://pubs.aip.org/aip/acp/article/2310/1/020008/781719/The-localization-of-deformations-in-mechanical (access date: 15.06.2023). – DOI: 10.1063/5.0034083. – 0,25 / 0,13 а.л. (*Web of Science*).

13. **Akhmetshin L. R.** Numerical study of the influence of relative parameters of the metamaterial on its mechanical behavior / L. R. Akhmetshin // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2021. – Vol. 1093 : Proceedings of the International Science and Technology Conference for Youth «Advanced Materials for Engineering and Functional Purposes» (AMEFP 2020). Tomsk, Russia, September 21–25, 2020 (access date: 15.06.2023). – Article number 12001. – 4 p. – URL: https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/1093/1/012001 (access date: 15.06.2023). – DOI: 10.1088/1757-899X/1093/1/012001. – 0,25 а.л. (*Scopus*).

14. **Akhmetshin L. R.** Analysis of Stress and Strain in the Tetrachiral Metamaterial with Different Kinds of Unit Cell Connections / L. R. Akhmetshin, I. Yu. Smolin // Procedia Structural Integrity. – 2022. – Vol. 35 : 2nd International Workshop on Plasticity, Damage and Fracture of Engineering Materials (IWPDF 2021). Ankara, Turkey, August 18–20, 2021. – P. 247–253. – DOI: 10.1016/j.prostr.2021.12.071. – 0,51 / 0,26 а.л. (*Scopus*).

15. **Akhmetshin L. R.** Investigation of mechanical response of a two-dimensional tetrachiral structure / L. R. Akhmetshin, I. Yu. Smolin // AIP Conference Proceedings. – 2022. – Vol. 2509 : proceedings of the International conference «Physical mesomechanics. Materials with multilevel hierarchical structure and intelligent manufacturing technology». Tomsk, Russia, September, 06–10, 2021. – Article number 020008. – 4 p. – URL: https://pubs.aip.org/aip/acp/article/2509/1/020008/

2827930/Investigation-of-mechanical-response-of-a-two (access date: 15.06.2023). – DOI: 10.1063/5.0084280. – 0,25 / 0,13а.л. (*Scopus*).

16. **Akhmetshin L. R.** Effective Poisson's Ratio of Tetrachiral Mechanical Metamaterial / L. R. Akhmetshin // Procedia Structural Integrity. – 2022. – Vol. 40 : 15th International Conference on Mechanics, Resource and Diagnostics of Materials and Structures (MRDMS 2021). Ekaterinburg, Russia, December 20–24, 2021. – P. 7–11. – DOI: 10.1016/j.prostr.2022.03.157. – 0,35 а.л. (*Scopus*).

Издание подготовлено в авторской редакции.
Отпечатано на участке цифровой печати
Издательства Томского государственного университета
Заказ № 7579 от «24» октября 2023 г. Тираж 100 экз.
г. Томск, Московский тр. 8, тел. (3822) 53-15-28
publish.tsu.ru