Ахметшин, Л.Р. Связь жесткости со скручиванием в образцах из тетрахирального метаматериала / Л.Р. Ахметшин, И.Ю. Смолин. – DOI: 10.15593/ perm.mech/2025.6.04 // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2025. – № 6. – С. 39–46.

Perm Polytech Style: Computer simulation of strain-induced boundaries formation and evolution during plastic deformation of polycrystals. *PNRPU Mechanics Bulletin,* 2025, no. 6, pp. 39–46. DOI: 10.15593/perm.mech/2025.6.04

пермский политех

ВЕСТНИК ПНИПУ. МЕХАНИКА
№ 6, 2025
PNRPU MECHANICS BULLETIN
https://ered.pstu.ru/index.php/mechanics/index



Научная статья

DOI: 10.15593/perm.mech/2025.6.04
УДК 539.3

СВЯЗЬ ЖЕСТКОСТИ СО СКРУЧИВАНИЕМ В ОБРАЗЦАХ ИЗ ТЕТРАХИРАЛЬНОГО МЕТАМАТЕРИАЛА

Л.Р. Ахметшин, И.Ю. Смолин

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск, Российская Федерация

О СТАТЬЕ

Получена: 06 Августа 2025 г.
Одобрена: 15 Октября 2025 г.
Принята к публикации:
10 декабря 2025

Ключевые слова:

механический метаматериал, тетрахиральная структура, эффективные свойства, жесткость, эффект «нагружение–скручивание», МКЭ.

АННОТАЦИЯ

В работе численно исследовано влияние формы поперечного сечения (треугольник, квадрат, круг) призматических образцов из тетрахирального метаматериала на их механические свойства при одноосном сжатии. Компьютерное моделирование является благоприятным инструментом проверки не только метаматериала, но и конечных форм образцов из него. Рассмотрены два способа соединения ячеек в образце, а также две конфигурации образцов, когда центр поперечного сечения вырезанного образца совпадает с: 1) центром тетрахиральной структуры и 2) точкой пересечения четырех тетрахиральных структур. При смене центра фигур площади поперечных сечений (S) образцов остаются неизменными. Обнаружено, что смещение центра влечет изменение объема базового материала (V). За счет хиральной структуры образцы из метаматериала проявляют необычный эффект – при одноосном сжатии реализуется скручивание вдоль оси нагружения. Зафиксировано, что локальное вращение хиральных граней может не совпадать с поворотом образца из метаматериала. При этом, показано, что, несмотря на незначительные различия в пористости (86,2 ± 3,79% и 79,88 ± 1,75% для различных способов соединения), изменение формы поперечного сечения существенно влияет на деформационное поведение образцов, проявляющееся в изменении угла скручивания (различие до 6,74 раза) и силовой реакции опоры (различие до 5,51 раза). Результаты демонстрируют, что геометрия образца оказывает значительное влияние на его свойства и должна учитываться при проектировании. Таким образом, данное исследование предоставит исследователям основу для эффективной оптимизации топологии сложных образцов из метаматериала. Полученные результаты демонстрируют возможность управления свойствами изделий из метаматериалов через их форму, открывая новые горизонты для применения в различных отраслях.

© **Ахметшин Линар Ришатович** – кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, e-mail: akhmetshin.lr@ispms.ru.
Смолин Игорь Юрьевич – доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник, e-mail: smolin@ispms.ru.

Linar R. Akhmetshin – Researcher, e-mail: akhmetshin.lr@ispms.ru.
Igor Yu. Smolin – Chief Researcher, e-mail: smolin@ispms.ru.

Эта статья доступна в соответствии с условиями лицензии Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)
This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

RELATIONSHIP BETWEEN STIFFNESS AND TORSION IN TETRACHIRAL METAMATERIAL SAMPLES

L.R. Akhmetshin, I.Yu. Smolin

Institute of Strength Physics and Materials Science, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Tomsk, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 06 August 2025
Approved: 15 October 2025
Accepted for publication: 10 December 2025

Keywords:

mechanical metamaterial, tetrachiral structure, effective properties, stiffness, compression-torsion coupling, FEM

ABSTRACT

The paper numerically investigates the influence of the cross-sectional shape (triangle, square, and circle) of prismatic samples made of a tetrachiral metamaterial on their mechanical properties under uniaxial compression. Numerical modeling is a favorable tool for testing not only the metamaterial, but also the final shapes of its samples. Two methods of connecting cells in a sample are considered, as well as two sample configurations, when the center of the cross-section of the carved sample coincides with either the center located in the middle of a tetrachiral unit or the center of the cross-section is positioned at the intersection point of four tetrachiral units. When changing the shapes' center, the cross-sectional areas (S) of the samples remain unchanged. It was found that the shift of the center changes the volume of the base material (V). Due to the chiral structure, the metamaterial samples exhibit an unusual effect under uniaxial compression, i.e. twisting along the loading axis. It was recorded that the local rotation of the chiral walls may not coincide with the metamaterial sample's twisting. It was demonstrated that, despite minor variations in porosity (86.2 ± 3.79% and 79.88 ± 1.75% for different connection methods), alteration of the cross-sectional shape significantly affects the deformation behavior of the samples, as evidenced by changes in the twist angle (difference up to 6.74 times) and support force reaction (difference up to 5.51 times). The results indicate that the sample geometry has a substantial impact on the sample properties and should be considered at the design stage. Thus, this study provides researchers with a basis for an efficient topology optimization of complex metamaterial samples. The obtained results make it possible to control the properties of metamaterial products through their shape and offer new applications in various industries.

Введение

Разработка новых материалов представляет огромный потенциал для создания инновационных устройств и систем, а также совершенствования уже существующих. В то время как обычные материалы обладают присущими им свойствами ограниченными их природой, метаматериалы открывают беспрецедентные возможности, позволяя искусственно манипулировать их внутренней микроструктурой для проявления новых свойств, не встречающихся в природе [1; 2]. Это также относится к механическим метаматериалам, которые были разработаны для демонстрации контринтуитивного поведения. Контринтуитивным поведением обладают материалы, к примеру, ауксетичные (с отрицательным коэффициентом Пуассона), с отрицательным тепловым расширением, с отрицательной сжимаемостью, с отрицательной жесткостью и т.п. [3; 4]. Подобные свойства замечены в тетрахиральных структурах. Другой важной характеристикой метаматериалов является малый вес и высокая способность поглощения энергии, которыми обладают решетчатые (ячеистые) метаматериалы. Недавние достижения в области высокоточных технологий производства, таких как 3D-печать, значительно ускорили создание метаматериалов [5; 6]. Более того, появление компьютерно-ориентированного проектирования позволило создавать сложные конструкции метаматериалов.

Тетрахиральные структуры обладают уникальным механическим откликом – обеспечивают вращение при осевом силовом нагружении. В процессе сжатия/растяжения двухмерный образец из тетрахирального метаматериала будет испытывать сдвиг [7–9]. В трехмерном случае это провоцирует скручивание вдоль оси нагрузки [10; 11]. Конечные образцы представляют собой строго периодическое расположение ячеек и структур. Ячеистая структура позволяет изменять не только способ соединения ячеек [12], но и вводить в структуру метаматериала неоднородность (топологический дефект) [13–16]. Последнее исходит из геометрических вдохновений.

Ключевым фактором в создании образца из метаматериала является его область применения. Во-первых, следует соответствующим образом выбирать базовый материал для каркаса метаматериала. Базовый материал метаматериала может быть любым, к примеру, пластик, металл, дерево и др. Подавляющее большинство исследуемых метаматериалов изготовлены из полимеров, поскольку они, как правило, способны выдерживать большие деформации [17]. Для прикладных применений несущая способность полимеров часто слишком мала. Поэтому для создания метаматериала в некоторых случаях необходимо использовать металлы или керамику [18]. Во-вторых, если область применения связана с человеческим организмом, следует также подбирать соответствующую конечную форму образца. Такое применение связано с созданием штифтов [19], скаффолдов [20], стентов [21], заплаток на органы [22], замены сустава [23], остеоимплантов [24, 25]. Это позволяет говорить о необходимости совершенствования решетчатых конструкций. В большинстве случаев точный контроль над свойствами обеспечивается тщательно продуманной клеточной архитектурой на структурном уровне.

Вычислительная оптимизация, использующая конечно-элементный анализ, позволяет проектировать не только геометрию метаматериала, но и конечную форму образца. Последнее может в значительной степени влиять на механические свойства и деформационное поведение образцов.

В этом исследовании мы проводим численный анализ для изучения изменения свойств образцов из тетрахирального метаматериала с разными формами поперечного сечения. Образцы имели форму призм с равносторонним треугольником, квадратом и кругом в сечении. Выбор таких форм обусловлен вариантами многоугольников от минимального числа углов до максимального. До сих пор исследователи делали акцент на образцах, построенных из кубических элементарных ячеек, которые имели форму квадратной призмы. Исходя из формы образцов, мы фокусируемся на их свойствах , а не свойствах метаматериала. Ключевым результатом является демонстрация достижения возможных различий в свойствах при изменении формы образцов. В качестве ключевых параметров, отражающих интересующие нас свойства, мы рассматривали угол скручивания, как уникальное свойство хиральной структуры, и силовую реакцию опоры, характеризующую жесткость. Указанные свойства являются важными характеристиками образцов из метаматериала с точки зрения их функционального практического применения, и мы изучаем их чувствительность к форме конечных образцов.

Материалы и методы

Структура метаматериала

Тетрахиральная структура имеет кольцо и четыре связки, соединенные с кольцом по касательной. Параметры, описывающие эту структуру, обозначены на рис. 1 следующим образом: h – толщина структуры, t – ширина связки, r_1 и r_2 – внутренний и внешний радиусы кольца, соответственно. Так как связки с кольцом соединяются по касательной, то существует геометрическая связь для определения угла θ через l, r_1 и r_2. Таким образом, пять параметров характеризуют тетрахиральную структуру. Наиболее значимым, является размер кольца, с точки зрения получения наибольшего угла поворота [9]. Параметры, описывающие эту структуру, принимали следующие значения: $h = t$= 5 мм, r_1 = 12.5 мм, r_2 = 17.5 мм. Макроскопические свойства полученных образцов из метаматериала определяются как базовым материалом, так и ячеистой архитектурой.

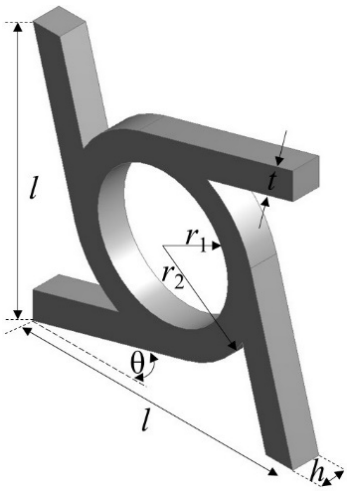


Рис.1. Тетрахиральная структура

Fig.1 Tetrachiral structure

Из тетрахиральных структур строится кубическая ячейка с длиной ребра l. Для создания образца из ячеек необходимо выбрать способ соединения ячеек: «присоединение» – одна ячейка соединяется с другой, удваивая толщину соприкасающихся стенок; «внахлест» – каждая последующая ячейка строится от предшествующей, что не приводит к удвоению внутренних стенок. В данной работе рассматривались оба способа. Обычный образец из метаматериала характеризуется строго периодическим расположением ячеек.

Образцы из метаматериала

В работе рассмотрены призматические образцы, вырезанные из пластины, построенной из метаматериала и состоящей из 9×3×9 элементарных ячеек вдоль осей X, Y и Z соответственно. Ее размер обусловлен стремлением вырезать сразу несколько образцов из одной пластины при минимально необходимом количестве ячеек. Фактически, механические метаматериалы представляют собой конструкции, построенные из элементов, составляющих структуру. Когда таких элементов достаточно много, образец можно рассматривать как некую эффективную сплошную среду. Вырезанные образцы в сечении имели форму правильного треугольника, квадрата и круга. Одна сторона треугольника и квадрата была параллельна оси X.

Вырезание образцов осуществляли вдоль толщины пластины (оси Y). Предполагая, что расположение выреза образцов влияет на результаты, были рассмотрены два случая, когда центр поперечного сечения вырезанного образца совпадает с: 1) центром тетрахиральной структуры и 2) точкой пересечения четырех тетрахиральных структур (рис. 2). При смене центра фигур площади поперечных сечений (S) образцов остаются неизменными, а объемы базового материала (V) изменяются:
1.) $S_{1,m}$ = const, $V_{1,m}$ = const;
2.) $S_{2,m} = S_{1,m}$, $V_{2,m} \neq V_{1,m}$.

Здесь индексы 1 – исходный образец (центр поперечного сечения находится в центре тетрахиральной структуры), 2 – образец со смещенным центром фигуры в сечении образца, m – количество углов у фигуры в сечении цилиндра.

Математическая модель

В математической модели полагается, что метаматериал состоит из изотропного базового материала. Приняты следующие значения механических характеристик базового материала: E = 2,6 ГПа – модуль Юнга и ν = 0,4 – коэффициент Пуассона. Уточним, что для описания поведения метаматериала ключевой фактор – это геометрия структуры, но не свойства базового материала

Определение напряженно-деформированного состояния образцов в процессе нагружения проводили методами численного моделирования. Математическая модель для решения поставленной задачи представлена системой дифференциальных уравнений механики сплошной среды. Система включает уравнения равновесия, соотношения Коши для определения деформаций через перемещения и определяющие соотношения упругого тела.

В математической модели учитывалось нелинейное поведение метаматериала. Это заключалось в учете геометрической нелинейности с учетом больших перемещений. Включение функции больших перемещений многократно увеличивает количество итераций методом Ньютона – Рафсона вместо единичного решения линейной задачи.

Для решения системы уравнений применяли метод конечных элементов. Конечно-элементная сетка состояла из тетраэдрических элементов. Поскольку наш основной интерес состоит в описании кручения образца метаматериала, сеточная сходимость результатов анализировалась

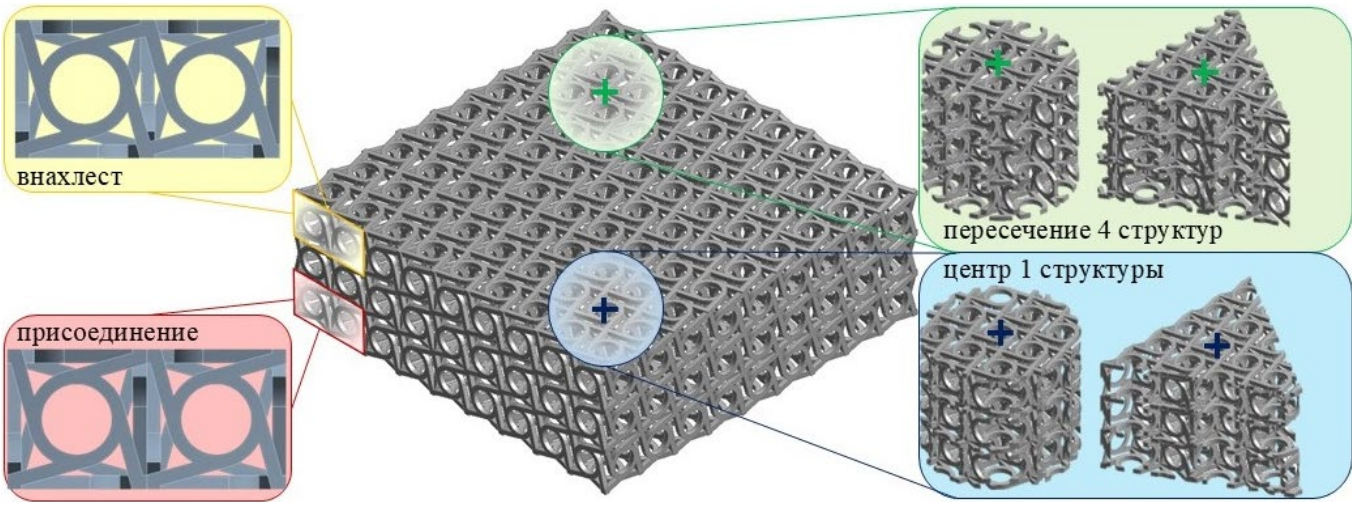


Рис. 2. Пластина из метаматериала

Fig. 2 Sample of metamaterial

по значению отклонения вершин верхней грани образца. Плотность сетки и размер конечных элементов выбирались из условия сходимости численных результатов [14]. По результатам расчетов на сеточную сходимость был определен оптимальный средний размер конечного элемента в форме тетраэдра – 1 мм.

Граничные условия

Проведено одноосное нагружение (вдоль оси *Y*) полученных образцов. На верхней грани образца прикладывалось смещение в направлении, противоположном направлению оси *Y*, что соответствует сжатию образца: $u_y|_{\text{top}} = -u_0$. Для образцов, полученных способом внахлест $u_0 = 4{,}2$ мм и способом присоединение $u_0 = 4.5$ мм. Эта величина соответствовала 3 % деформации и не приводила к контактному взаимодействию элементов структуры метаматериала. На нижней грани образца задано отсутствие перемещений по трем осям: $u_{x,y,z}|_{\text{bot}} = 0$. На остальных гранях образца (и гранях элементов структуры метаматериала) заданы свободные граничные условия: $\sigma_{ij} n_j = 0$. Здесь $u_{x,y,z}$ – компоненты вектора перемещений на соответствующих поверхностях модели, n_j – компоненты вектора нормали к поверхности.

Численное моделирование деформации (сжатие) образцов из механического тетрахирального метаматериала проводили в статической постановке. Анализировалось скручивание образцов и их жесткость при сжатии через силовую реакцию опоры.

Результаты и их обсуждение

При вырезании образцов их пористость, а значит и объем базового материала в них, может меняться. В образце из тетрахирального метаматериала пористость может достигать 80 % [26]. Место выреза образцов оказывает незначительное влияние на значение их пористости. Анализ изменения пористости (P) образов, соединенных способом внахлест и присоединение, показал различия, 86,2 ± 3,79 % и 79,88 ± 1,75 %, соответственно. Для разных образцов и рассматриваемых случаев архитектура «пор» внутри образцов не изменялась. При этом внешняя часть призм может значительно отличается. Небольшие отклонения от средних значений обычно не влияют на механическое поведение пористых образцов. Однако для метаматериалов это выполняется не всегда.

Заданное перемещение верхней грани передавало усилие на вертикальные стенки элементарных ячеек внутри и снаружи образца. Передача усилия на другие тетрахиральные структуры провоцировала скручивание всего образца. Поворот сечений изменяется вдоль образца. Наибольшие значения отклонений, а, следовательно, и угла поворота сечений замечены на верхней грани. Угол поворота обозначен как α и определяется через отклонение вдоль осей, перпендикулярных оси нагружения, и радиус описанной окружности вокруг фигуры поперечного сечения образца [27]. Скручивание метаматериала оказало влияние на жесткость образцов.

На рисунке 3 представлены зависимости реакции опоры от угла поворота. Для простоты отображения результатов число углов (m) для круга примем за 12 на числовой оси. Дальнейшее изложение будет соответствовать следующему порядку рассмотренных случаев:

– I – способ соединения внахлест, центр фигур в центре 1 тетрахиральной структуры,
– II – способ соединения внахлест, центр фигур в пересечении 4 тетрахиральных структур,
– III – способ соединения присоединение, центр фигур в центре 1 тетрахиральной структуры,
– IV – способ соединения присоединение, центр фигур в пересечении 4 тетрахиральных структур.

Направление хиральности верхней грани имеет направление против часовой стрелки, но скручивание образца направлено по часовой стрелке, если смотреть сверху. Это связано с совокупным вращением других тетрахиральных структур, расположенных в стенках образца, которые обеспечивают его скручивание. В большинстве случаев видно, что значение угла поворота треугольной призмы находится между значениями для квадратной и круглой призм.

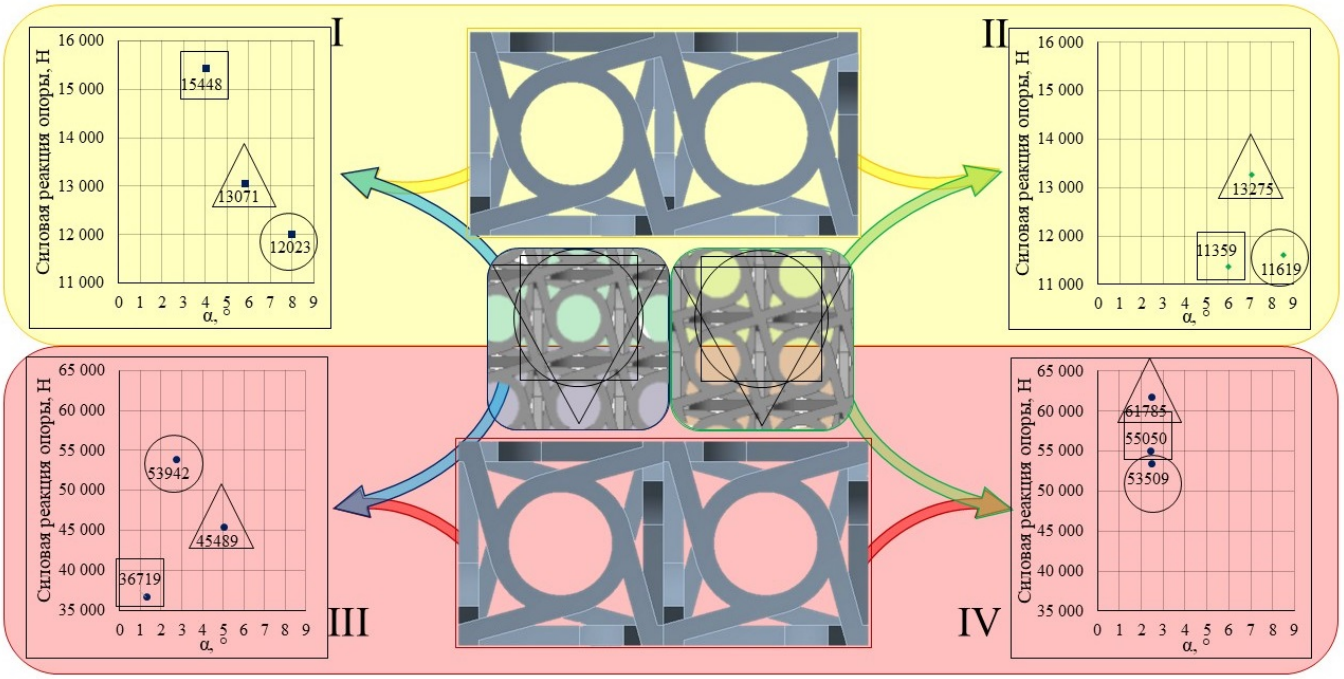


Рис. 3. Изменение силовой реакции опоры в зависимости от угла поворота
Fig. 3. Change in force reaction depending on the rotation angle

В случае I замечена явная тенденция: увеличение угла поворота приводит к уменьшению силовой реакции опоры. В случае II квадратная призма не подчиняется данной тенденции, у нее наименьший угол поворота и реакция опоры. Сравнивая случаи I и II можно отметить, что значения реакции опоры для треугольной и круглой призм близки друг к другу. Для квадратной призмы понятно, почему значение настолько снизилось, это связано с внешними гранями. В случае I контур фигуры поперечного сечения проходит по граням, а в случае II — проходит через ячейки. Таким образом количество целых тетрахиральных структур значительно снижается. Под целой понималась тетрахиральная структура, имеющая контакт со смежными структурами той же плоскости. В призматических образцах наблюдалось значительное различие в целых тетрахиральных структурах. В треугольной, квадратной и круглой призмах, полученных способом внахлест было 94, 108 и 68 целых структур, соответственно. А в образцах, полученных способом присоединение было 62, 76 и 116 целых структур для аналогичных призм. Таким образом прослеживается связь между количеством целых тетрахиральных структур в образце и значением скручивания.

Для образцов, в которых ячейки соединялись способом присоединение, характерны меньшие значения угла поворота и более высокие значения силовой реакции опоры. Определяющим механизмом этого отличия выступает разное направление вращение тетрахиральных структур соприкасающихся ячеек.

Случай III схож по описанию со случаем I, но отличается противоположными тенденциями:

– квадратная призма скручивается на меньший угол по сравнению с остальными призмами, а также имеет наименьшее значение силовой реакции опоры;

– круглая призма скручивается на меньший угол и имеет большее значение реакции опоры. Значения для треугольной призмы имеют обратную зависимость.

В случае IV замечено одинаковое значение угла поворота для разных форм поперечного сечения. При этом силовая реакция опоры различается, что свидетельствует о вкладе структуры образцов в механическое поведение. Таким образом, видно, что способ соединения ячеек влияет на механическое поведение.

Было замечено, что случаи II и IV проявили одинаковый характер распределения жесткостей:

– треугольная призма имеет наибольшее значение реакции опоры;

– значения для квадратной и круглой призм близки по значению.

Заключение

В работе изучались призматические образцы из тетрахирального метаматериала. Образцы были вырезаны из пластин и имели в сечении треугольник, квадрат и круг. Две пластины различались способом соединения ячеек метаматериала. В ходе исследования рассмотрены две области выреза образцов.

Исследовалось механическое поведением образцов при осевом сжатии. За счет хиральной структуры образцы из метаматериала проявляют необычный эффект – при одноосном сжатии реализуется скручивание вдоль оси нагружения. Отличие между наибольшим и наименьшим значениями угла поворота составила 6,74 раза. Аналогичное соотношение силовой реакции опоры составило 5,51. При том, что пористость образцов отличалась незначительно.

Проведен анализ попарных случаев и по результатам можно сформулировать следующие качественные выводы:

– существует явная связь между количеством целых тетрахиральных структур в образце и значением скручивания;

– способ соединения ячеек в образце оказывает доминирующее влияние на механическое поведение;

– оптимизировав форму и внутреннюю структуру образца возможно достичь желаемых механических характеристик.

Перспективы

Механические метаматериалы могут обладать высокой жёсткостью и прочностью при низкой плотности, но часто за счёт низкой пластичности и растяжимости – постоянного компромисса для материалов [28]. Полученные результаты также показывают существующую связь между жесткостью и гибкостью и возможностью это контролировать. Вероятно, результаты, полученные для тетрахирального метаматериала не ограничиваются только такой структурой. При этом стоит понимать, что у данного типа структур присутствует уникальный механический отклик, который также вносит вклад в механическое поведение ячеистого метаматериала.

В общем результаты данной работы подчеркивают значимость выбора формы сечения для проектирования изделий из материалов с определенными механическими свойствами. Наш анализ может облегчить интеграцию метаматериалов в инженерные приложения, такие как строительные конструкции или имплантаты, с учетом формы конечных образцов. Изученные механические свойства образцов из метаматериала различных призматических форм позволяют не только углубить понимание их механического поведения, но и вносит вклад в разработку новых финальных инженерных изделий с заданными свойствами [29]. Таким образом, мы предполагаем, что наше исследование предоставит исследователям основу для эффективной оптимизации топологии сложных образцов из метаматериала. Наше исследование механических свойств образцов из метаматериала с тетрахиральной структурой может дать информацию для будущих исследований в области проектирования функциональных метаматериалов. Полученные данные демонстрируют возможность управления свойствами изделий из метаматериалов через их форму, открывая новые горизонты для применения в различных отраслях. За рамкой данной работы оказался вопрос о влиянии количества ячеек в исходной пластине, из которой были вырезаны образцы. Изменяя количество ячеек, образец должен рассматриваться как новая эффективная среда. Это составляющая косвенно продемонстрирована в работе [30].

Библиографический список

1. Mechanical metamaterials and beyond / P. Jiao [et al.] // Nature Communications. – 2023. – Vol. 14, No. 1. – P. 6004. doi: 10.1038/s41467-023-41679-8
2. Review of foundational concepts and emerging directions in metamaterial research: design, phenomena, and applications / Holliman J.E. [et al.] // Materials Advances. – 2022. – Vol. 3, No. 23. – PP. 8390-8406. doi: 10.1039/D2MA00497F
3. Lim T.-C. A partially auxetic metamaterial inspired by the Maltese cross. – Cambridge University Press, 2022.
4. Lakes R. Composites and metamaterials. – World Scientific, 2020.
5. A review of additive manufacturing of metamaterials and developing trends / J. Fan [et al.] // Materials Today. – 2021. – Vol. 50. – P. 303-328. doi: 10.1016/j.mattod.2021.04.019
6. Additive manufacturing of metamaterials: A review / M. Askari [et al.] // Additive Manufacturing. – 2020. – Vol. 36. – P. 101562. doi: 10.1016/j.addma.2020.101562
7. Mechanics of beams made from chiral metamaterials: Tuning deflections through normal-shear strain couplings / N. Karathanasopoulos [et al.] // Materials & Design. – 2020. – Vol. 189. – Mechanics of beams made from chiral metamaterials. – P. 108520. doi: 10.1016/j.matdes.2020.108520
8. Chiral-based mechanical metamaterial with tunable normal-strain shear coupling effect / M. Fleisch [et al.] // Engineering Structures. – 2023. – Vol. 284. – P. 115952. doi: 10.1016/j.engstruct.2023.115952
9. Исследование механизмов деформации двумерного метаматериала / Л.Р. Ахметшин [и др.] // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. – 2024. – № 89. – С. 51–65. doi: 10.17223/19988621/89/4
10. Frenzel T., Kadic M., Wegener M. Three-dimensional mechanical metamaterials with a twist // Science. – 2017. – Vol. 358, No. 6366. – P. 1072-1074. doi: 10.1126/science.aao4640
11. Ахметшин Л.Р., Смолин И.Ю. Анализ влияния особенностей структурной организации хиральных метаматериалов на их физико-механические характеристики // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2023. – № 5. – С. 17–25. doi: 10.15593/perm.mech/2023.5.02
12. Akhmetshin L., Smolin I. Characterization of a chiral metamaterial depending on the type of connection between unit cells // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science. – 2022. – Vol. 236, No. 19. – P. 10214-10220. doi: 10.1177/09544062221101832
13. Topological defects produce exotic mechanics in complex metamaterials / A.S. Meeussen [et al.] // Nature Physics. – 2020. – Vol. 16, No. 3. – P. 307-311. doi: 10.1038/s41567-019-0763-6
14. Influence of topological defects on the mechanical response of unit cells of the tetrachiral mechanical metamaterial / L. Akhmetshin [et al.] // Designs. – 2023. – Vol. 7, No. 6. – P. 129. doi: 10.3390/designs7060129
15. Response evolution of mechanical metamaterials under architectural transformations / A.S. Meeussen [et al.] // New Journal of Physics. – 2020. – Vol. 22, No. 2. – P. 023030. doi: 10.1088/1367-2630/ab69b5
16. Digital strategies for structured and architected materials design / S. Bonfanti [et al.] // APL Materials. – 2021. – Vol. 9, No. 2. – P. 020904. doi: 10.1063/5.0026817
17. El-Helou C., Harne R.L. Exploiting functionally graded elastomeric materials to program collapse and mechanical properties // Advanced Engineering Materials. – 2019. – Vol. 21, No. 12. – P. 1900807. doi: 10.1002/ adem.201900807

18. Fischer S.C.L., Hillen L., Eberl C. Mechanical metamaterials on the way from laboratory scale to industrial applications: Challenges for Characterization and Scalability // Materials. – 2020. – Vol. 13, No. 16. – P. 3605. doi: 10.3390/ma13163605

19. Additive manufactured osseointegrated screws with hierarchical design / W. Yang [et al.] // Bio-Design and Manufacturing. – 2024. – Vol. 7, No. 2. – P. 206-235. doi: 10.1007/s42242-024-00269-3

20. Effect of degradation in polymer scaffolds on mechanical properties: Surface vs. bulk erosion / N. Elenskaya [et al.] // Computers in Biology and Medicine. – 2024. – Vol. 174. – P. 108402. doi: 10.1016/j.compbiomed.2024.108402

21. A flexible porous chiral auxetic tracheal stent with ciliated epithelium / Liu J. [et al.] // Acta Biomaterialia. – 2021. – Vol. 124. – P. 153-165. doi: 10.1016/j.actbio.2021.01.044

22. Composite patch with negative Poisson's ratio mimicking cardiac mechanical properties: Design, experiment and simulation / Z. Dong [et al.] // Materials Today Bio. – 2024. – Vol. 26. – P. 101098. doi: 10.1016/j.mtbio.2024.101098

23. Auxetic biomedical metamaterials for orthopedic surgery applications: A comprehensive review / M. Sun [et al.] // Orthopaedic Surgery. – 2024. – Vol. 16, No. 8. – P. 1801-1815. doi: 10.1111/os.14142

24. Modeling stress–strain state of cancellous bone tissue fragments in compression / T.V. Chaykovskaya [et al.] // Mechanics of Advanced Materials and Structures. – 2025. – P. 1-23. doi: 10.1080/15376494.2024.2448609

25. Rahmat N., Kadkhodapour J., Arbabtafti M. Mechanical Characterization of additively manufactured orthopedic cellular implants: Case study on different cell types and effect of defects // Physical Mesomechanics. – 2023. – Vol. 26. – Mechanical Characterization of additively manufactured orthopedic cellular implants. – No. 4. – P. 443-458. doi: 10.1134/S1029959923040069

26. Mechanical performance of additively manufactured cobalt-chromium-molybdenum auxetic meta-biomaterial bone scaffolds / C.T. Wanniarachchi [et al.] // Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials. – 2022. – Vol. 134. – P. 105409. doi: 10.1016/j.jmbbm.2022.105409

27. Akhmetshin L., Iokhim K., Eremin A. Compression behavior of a cell of a tetrachiral metamaterial with regular and irregular structure // Acta Mechanica Sinica. – 2026. – Vol. 42. – P. 424909. doi: 10.1007/s10409-025-24909-x

28. Double-network-inspired mechanical metamaterials / J.U. Surjadi [et al.] // Nature Materials. – 2025. – Vol. 24, No. 6. – P. 945-954. doi: 10.1038/s41563-025-02219-5

29. Ерофеев В.И., Павлов И.С. Механика и акустика метаматериалов: математическое моделирование, экспериментальные исследования, перспективы применения в машиностроении // Проблемы прочности и пластичности. – 2021. – Т. 83, № 4. – С. 391-414. doi: 10.32326/1814-9146-2021-83-4-391-414.

30. Неклассические свойства метаматериалов / С.В. Шешенин [и др.] // Механика композиционных материалов и конструкций, сложных и гетерогенных сред : материалы 9-й всеросс. науч. конф. с междунар. участием им. И.Ф. Образцова и Ю.Г. Яновского, посвященной 30-летию ИПРИМ РАН (Москва, 19–21 ноября 2019) / ИПМ РАН и ОЭММПУ РАН. – 2019. С. 259-263.

References

1. Jiao P., Mueller J., Raney J.R., Zheng X., Alavi A.H. Mechanical metamaterials and beyond. *Nature Communications*, 2023, vol. 14, no. 1, p. 6004. doi: 10.1038/s41467-023-41679-8

2. Holliman J.E., Schaef H.T., McGrail B.P., Miller Q.R.S. Review of foundational concepts and emerging directions in metamaterial research: design, phenomena, and applications. *Materials Advances*, 2022, vol. 3, no. 23, pp. 8390-8406. doi: 10.1039/D2MA00497F

3. Lim T.-C. A Partially auxetic metamaterial inspired by the Maltese cross. Cambridge University Press, 2022.

4. Lakes R. Composites and metamaterials. World Scientific, 2020.

5. Fan J., Zhang L., Wei S., Zhang Z., Choi S.-K., Song B., Shi Y. A review of additive manufacturing of metamaterials and developing trends. *Materials Today*, 2021, vol. 50, pp. 303-328. doi: 10.1016/j.mattod.2021.04.019

6. Askari M., Hutchins D.A., Thomas P.J., Astolfi L., Watson R.L., Abdi M., Ricci M., Laureti S., Nie L., Freear S., Wildman R., Tuck C., Clarke M., Woods E., Clare A.T. Additive manufacturing of metamaterials: A review. *Additive Manufacturing*, 2020, vol. 36, p. 101562. doi: 10.1016/j.addma.2020.101562

7. Karathanasopoulos N., Dos Reis F., Diamantopoulou M., Ganghoffer J.-F. Mechanics of beams made from chiral metamaterials: Tuning deflections through normal-shear strain couplings. *Materials & Design*, 2020, vol. 189, p. 108520. doi: 10.1016/j.matdes.2020.108520

8. Fleisch M., Thalhamer A., Meier G., Huber P.A.F., Fuchs P.F., Pinter G., Schlögl S., Berer M. Chiral-based mechanical metamaterial with tunable normal-strain shear coupling effect. *Engineering Structures*, 2023, vol. 284, p. 115952. doi: 10.1016/j.engstruct.2023.115952

9. Akhmetshin, L.R., Iokhim, K.V., Kazantseva, E.A., Smolin, I.Yu. A study of deformation mechanisms for a two-dimensional metamaterial. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika – Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*, 2024, no. 89. pp. 51–65. doi: 10.17223/19988621/89/4

10. Frenzel T., Kadic M., Wegener M. Three-dimensional mechanical metamaterials with a twist. *Science*, 2017, vol. 358, no. 6366, pp. 1072-1074. doi: 10.1126/science.aao4640

11. Akhmetshin L.R., Smolin I.Yu. The influence of the structural organization of chiral metamaterials on their physical and mechanical characteristics. *PNRPU Mechanics Bulletin*, 2023, No. 5, pp. 17-25. doi: 10.15593/perm.mech/2023.5.02

12. Akhmetshin L., Smolin I. Characterization of a chiral metamaterial depending on the type of connection between unit cells. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 2022, vol. 236, no. 19, pp. 10214-10220. doi: 10.1177/09544062221101832

13. Meeussen A.S., Oğuz E.C., Shokef Y., Hecke M.V. Topological defects produce exotic mechanics in complex metamaterials. *Nature Physics*, 2020, vol. 16, no. 3, pp. 307-311. doi: 10.1038/s41567-019-0763-6

14. Akhmetshin L., Iokhim K., Kazantseva E., Smolin I. Influence of topological defects on the mechanical response of unit cells of the tetrachiral mechanical metamaterial. *Designs*, 2023, vol. 7, no. 6, p. 129. doi: 10.3390/designs7060129

15. Meeussen A.S., Oğuz E.C., Hecke M.V., Shokef Y. Response evolution of mechanical metamaterials under architectural transformations. *New Journal of Physics*, 2020, vol. 22, no. 2, p. 023030. doi: 10.1088/1367-2630/ab69b5

16. Bonfanti S., Guerra R., Zaiser M., Zapperi S. Digital strategies for structured and architected materials design. *APL Materials*, 2021, vol. 9, no. 2, p. 020904. doi: 10.1063/5.0026817

17. El-Helou C., Harne R.L. Exploiting functionally graded elastomeric materials to program collapse and mechanical properties. *Advanced Engineering Materials*, 2019, vol. 21, no. 12, p. 1900807. doi: 10.1002/adem.201900807

18. Fischer S.C.L., Hillen L., Eberl C. Mechanical metamaterials on the way from laboratory scale to industrial applications: Challenges for characterization and scalability. *Materials*, 2020, vol. 13, no. 16, p. 3605. doi: 10.3390/ ma13163605

19. Yang W., Chen H., Bai H., Sun Y., Zhang A., Liu Y., Song Y., Han Q., Wang J. Additive manufactured osseointegrated screws with hierarchical design. *Bio-Design and Manufacturing*, 2024, vol. 7, no. 2, pp. 206-235. doi: 10.1007/s42242-024-00269-3

20. Elenskaya N., Koryagina P., Tashkinov M., Silberschmidt V.V. Effect of degradation in polymer scaffolds on mechanical properties: Surface vs. bulk erosion. *Computers in Biology and Medicine*, 2024, vol. 174, p. 108402. doi: 10.1016/j.compbiomed.2024.108402

21. Liu J., Yao X., Wang Z., Ye J., Luan C., He Y., Lin H., Fu J. A flexible porous chiral auxetic tracheal stent with ciliated epithelium. *Acta Biomaterialia*, 2021, vol. 124, pp. 153-165. doi: 10.1016/j.actbio.2021.01.044

22. Dong Z., Ren X., Jia B., Zhang X., Wan X., Wu Y., Huang H. Composite patch with negative Poisson's ratio mimicking cardiac mechanical properties: Design, experiment and simulation. *Materials Today Bio*, 2024, vol. 26, p. 101098. doi: 10.1016/j.mtbio.2024.101098

23. Sun M., Hu X., Tian L., Yang X., Min L. Auxetic biomedical metamaterials for orthopedic surgery applications: A comprehensive review. *Orthopaedic Surgery*, 2024, vol. 16, no. 8, pp. 1801-1815. doi: 10.1111/os.14142

24. Chaykovskaya T.V., Marchenko E.S., Yasenchuk Y.F., Baigonakova G.A., Volinsky A.A. Modeling stress–strain state of cancellous bone tissue fragments in compression, *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 2025, pp. 1-23. doi: 10.1080/15376494.2024.2448609

25. Rahmat N., Kadkhodapour J., Arbabtafti M. Mechanical characterization of additively manufactured orthopedic cellular implants: Case study on different cell types and effect of defects. *Physical Mesomechanics*, 2023, vol. 26, no. 4, pp. 443-458. doi: 10.1134/S1029959923040069

26. Wanniarachchi C.T., Arjunan A., Baroutaji A., Singh M. Mechanical performance of additively manufactured cobalt-chromium-molybdenum auxetic meta-biomaterial bone scaffolds. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 2022, vol. 134, p. 105409. doi: 10.1016/j.jmbbm.2022.105409

27. Akhmetshin L., Iokhim K., Eremin A. Compression behavior of a cell of a tetrachiral metamaterial with regular and irregular structure. *Acta Mechanica Sinica*, 2026, vol. 42, p. 424909. doi: 10.1007/s10409-025-24909-x

28. Surjadi J.U., Aymon B.F.G., Carton M., Portela C.M. Double-network-inspired mechanical metamaterials. *Nature Materials*, 2025, vol. 24, no. 6, pp. 945-954. doi: 10.1038/s41563-025-02219-5

29. Erofeev V.I., Pavlov I.S. Mekhanika i akustika metamaterialov: matematicheskoye modelirovaniye, eksperimental'nyye issledovaniya, perspektivy primeneniya v mashinostroyenii [Mechanics and acoustics of metamaterials:mathematical modeling, experimental research, prospects for application in mechanical engineering]. *Проблемы прочности и пластичности* [*Problems of strength and ductility*]. 2021. Vol. 83, no. 4. pp. 391-414. DOI 10.32326/1814-9146-2021-83-4-391-414.

30. Sheshenin S.V., Artamonova N.B., Kiselev F.B., Semenov D.M., Klement'yev P.D. Neklassicheskiye svoystva metamaterialov [Non-classical properties of metamaterials]. *Mekhanika kompozitsionnykh materialov i konstruktsiy, slozhnykh i geterogennykh sred* [*Mechanics of composite materials and structures, complex and heterogeneous environment*] : materialy 9-y vseross. nauch. konf. s mezhdunar. uchastiyem im. I.F. Obraztsova i Yu.G. Yanovskogo, posvyashchennoy 30-letiyu IPRIM RAN (Moskva, 19–21 noyabrya 2019) / IPM RAN i OEMMPU RAN. 2019. pp. 259-263.

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания ИФПМ СО РАН, тема номер FWRW-2022-0003.
Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
Вклад авторов равноценен.

Funding. The work was performed within the framework of the state assignment of the IFPM SB RAS, subject number FWRW-2022-0003.
Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.
The authors' contributions are equal.