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

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

пермский политех

ВЕСТНИК ПНИПУ. МЕХАНИКА
№ 5, 2023
PNRPU MECHANICS BULLETIN
https://ered.pstu.ru/index.php/mechanics/index



Научная статья

DOI: 10.15593/perm.mech/2023.5.02
УДК 539.3

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ОСОБЕННОСТЕЙ СТРУКТУРНОЙ ОРГАНИЗАЦИИ ХИРАЛЬНЫХ МЕТАМАТЕРИАЛОВ НА ИХ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Л.Р. Ахметшин, И.Ю. Смолин

Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук, Томск, Российская Федерация

О СТАТЬЕ

Получена: 07 июля 2023 г.
Одобрена: 16 октября 2023 г.
Принята к публикации: 31 октября 2023 г.

Ключевые слова:

механический метаматериал, хиральность, элементарная ячейка, эффект «нагружение – скручивание», эффективные свойства, пористость, взаимосвязь «микроструктура – свойство», численное моделирование, метод конечных элементов, напряженное состояние.

АННОТАЦИЯ

Метаматериалы – это искусственно созданные материалы, необычные свойства которых обусловлены их геометрической структурой, а не химическим составом базового материала. Управление физико-механическими свойствами через структуру является принципиальным для метаматериалов. Инструменты численного анализа, используемые в данной работе, обладают преимуществом перед натурными испытаниями благодаря автоматизации работ и сниженным материальным и финансовым расходам. В данной работе исследуется тетрахиральный метаматериал в условиях одноосного сжатия. Базовый материал описывается как упругая среда. Выполнен анализ влияния особенностей структурной организации метаматериала на его механический отклик. Для этого рассмотрено два метода соединения элементарных ячеек: «присоединение» и «внахлест». В качестве анализируемых выбраны: 1) эффект «нагружение – скручивание», 2) эффективные упругие свойства (коэффициент Пуассона и модуль Юнга), 3) пористость и 4) напряженно-деформированное состояние. Пористость образцов, полученных методом «присоединения», составила 80 %, а методом «внахлест» – 84 %, а объем базового материала во втором случае оказался в 1,6 раз больше. Обнаружено, что на эффект «нагружение – скручивание» влияет не только объем базового материала, но и внутренняя организация структуры, а именно разносторонняя хиральность соприкасающихся граней элементарных ячеек. Анализ результатов численного эксперимента показал, что трехмерные образцы имеют нулевое значение эффективного коэффициента Пуассона. Модуль Юнга у образца, в котором ячейки соединялись методом «присоединения», оказывается выше почти в 2,7 раза. Оба образца могут описываться как анизотропная среда с кубической системой решетки, что показало изучение свойств образцов из метаматериала при нагружении вдоль трех ортогональных осей. Для построения методом «присоединения» характерна более неоднородная картина распределения напряжений с наличием более сильных концентраторов напряжений.

© ПНИПУ

© **Ахметшин Линар Ришатович** – мл. науч. сотр., e-mail: akhmetshin.lr@ispms.ru.
Смолин Игорь Юрьевич – д. ф.-м. н., доц., гл. науч. сотр., e-mail: smolin@ispms.ru.

Linar R. Akhmetshin – Junior Researcher, e-mail: akhmetshin.lr@ispms.ru.
Igor Yu. Smolin – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, 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)

THE INFLUENCE OF THE STRUCTURAL ORGANIZATION OF CHIRAL METAMATERIALS ON THEIR PHYSICAL AND MECHANICAL CHARACTERISTICS

L.R. Akhmetshin, I.Yu. Smolin

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

ARTICLE INFO

Received: 07 July 2023
Approved: 16 October 2023
Accepted for publication:
31 October 2023

Keywords:

mechanical metamaterial, chirality, unit cell, tension – torsion coupling, effective properties, porosity, microstructure – property relationship, numerical simulation, finite element analysis, stress state.

ABSTRACT

Metamaterials are artificially created materials which unusual properties are due to their geometric structure, not the chemical composition of the base material. The control of physical and mechanical properties through the structure is fundamental for metamaterials. The tools of the numerical analysis used in this work overweigh experimental tests due to the automation of research, reduced material and financial costs. Here, a tetrachiral metamaterial is investigated under uniaxial compression conditions. The base material is described as an elastic medium. An analysis of the influence of the metamaterial's structural organization on its mechanical response is carried out. To do this, two methods of connecting unit cells are considered: "joining" and "overlapping". The following are selected for the analysis: (1) the tension – torsion coupling effect; (2) effective elastic properties (Poisson's ratio and Young's modulus); (3) porosity; and (4) the state of stress and strain. The porosity of the samples obtained by the "joining" method was 80 % and the "overlapping" method resulted in 84 %, the volume of the base material in the second case was 1.6 times larger. It was found that the tension – torsion coupling effect is affected not only by the volume of the base material but also by the internal organization of the structure, namely, the versatile chirality of the touching faces of the unit cells. Analysis of the numerical experiment results showed that the three – dimensional samples have a zero value for the effective Poisson's ratio. The Young's modulus of the sample in which the cells were connected by the "joining" method turns out to be almost 2.7 times higher. Both samples can be described as an anisotropic medium with a lattice in the cubic system medium, which is shown by studying the properties of metamaterial samples when loaded along three orthogonal axes. The construction created by the "joining" method is characterized by a more heterogeneous pattern of stress distribution and presence of stronger stress concentrators.

© PNRPU

Введение

Метаматериалы – это искусственно созданные материалы, уникальные свойства которых обусловлены их геометрической структурой, а не химическим составом базового материала. Другими словами, механическое поведение метаматериалов ближе к поведению конструкций, а не обычных материалов. В кристаллических материалах элементарные ячейки состоят из атомов или ионов, в то время как метаматериал строится из гораздо более крупных ячеек, на порядки больше размера атома. Развитие технологий 3D-печати позволило создавать метаматериалы со сложной геометрической формой из цифровой модели [1; 2]. Технологии производства трехмерных изделий являются перспективными и конкурентоспособными, по сравнению с традиционными, благодаря высокой производительности [3].

Для механических метаматериалов интерес представляет исследование их упругих характеристик: 1) модуля Юнга, 2) сдвигового и объемного модулей упругости, 3) коэффициента Пуассона [4]. Механическое поведение и характеристики зависят от структуры метаматериала, очень популярным типом структур метаматериалов является хиральная. Хиральность – это свойство объекта не накладываться на свое зеркальное отображение. Хиральность может быть, как левосторонней, так и правосторонней [5]. Простой хиральный элемент имеет центральное кольцо и связки, выходящие из него [6]. Количество связок будет определять название хиральной структуры. Еще в 1997 г. [6] было замечено, что двухмерная хиральная структура обладает скручиванием, и её эффективный коэффициент Пуассона имеет отрицательное значение (т.е. она является ауксетиком). В других работах [7–9], в которых сообщается об отрицательном значении эффективного коэффициента Пуассона, кинематические граничные условия прикладывались к двум противоположно расположенным связкам хиральной структуры. Т. Френцель (T. Frenzel) с соавт. [10] создали и исследовали трехмерный образец из тетрахирального метаматериала, в котором хиральная структура в гранях элементарных ячеек была повернута на 45° по сравнению с данными, приведенными в работах [7–9]. Информация о значении коэффициента Пуассона для такого трехмерного метаматериала в работе [10] не представлена.

Характеристики проектируемых структур, а следовательно, и механических свойств метаматериалов, можно контролировать изменением параметров структуры [11; 12], введением топологических дефектов [13; 14] или соединением ячеек разными способами при создании образцов [15; 16]. Последнее представляет особый интерес, так как связи между элементарными ячейками имеют огромное значение. Передача нагрузки между элементарными ячейками [17] определяет реакцию материала на воздействие внешних сил. Причем реак-

ция материала может зависеть от типа сил, например, локализованные силы, распределенные поверхностные силы, силы гидростатического сжатия, силы, действующие в определенных направлениях [18]. Поэтому соединения ячеек необходимо проектировать с учетом потенциального применения материала. К примеру, в работе [19] сообщается о том, что удалось повысить ударную вязкость за счет асимметричного соединения элементарных ячеек. Эта асимметрия достигается за счет введения смещений между пересекающимися стойками внутри стандартных элементарных ячеек.

Насколько известно авторам, в настоящее время периодические кубические ячейки в метаматериале можно соединять двумя способами: «присоединение» и «внахлест» [20]. При этом до конца не ясно, каким образом реализуется скручивание внутренних структур в образцах и как способ соединения ячеек влияет на эффективные свойства. В данной работе с помощью метода конечных элементов исследовано влияние двух способов соединения элементарных ячеек тетрахирального метаматериала на эффект «нагружение – скручивание» при одноосном сжатии и эффективные упругие свойства метаматериала. Целенаправленное проектирование «архитектурных» микроструктур позволяет получать материалы с оптимальными механическими и новыми функциональными свойствами [21]. Поиск оптимальных соотношений структуры может выступать как рекомендация для инженерной отрасли [2], а также в биомедицинских приложениях [22].

Структура метаматериала и описание метода моделирования

В качестве объекта для исследований выбран образец из метаматериала (рис. 1, *a* и *b*), он состоит из ячеек (рис. 1, *c*), его структура имеет тетрахиральную геометрию (рис. 1, *d*). В нашем случае хиральный элемент состоит из кольца и прилегающих к нему связок. Он может иметь несколько связок и называться в соответствии с их количеством [23–25]. «Тетра» обозначает четыре связки. Как показано на рис. 1, *e*, пять параметров определяют геометрию тетрахиральной структуры, где l – длина ячейки, t – ширина связки, h – толщина структуры, r_2 – внешний радиус кольцевого элемента, r_1 – внутренний радиус кольцевого элемента. Угол θ – угол наклона связки, зависит от других параметров структуры согласно формуле

$$\theta = \arccos\left(\frac{r_1 + r_2}{\sqrt{2}\cdot l}\right) - 45°.$$

Толщина структуры появляется в процессе экструдирования двухмерной структуры вдоль оси Z для получения объемного тела.

В данной работе были приняты следующие значения указанных параметров: l = 50 мм, t = 5 мм, h = 5 мм, r_2 = 17,5 мм, r_1 = 17,5 мм.

Изображения на рис. 1, *a* и *e*, соответствуют метаматериалу, в котором ячейки соединяются методом «присоединения». «Присоединение» – это метод соединения, когда одна ячейка соединяется с другой и увеличивает толщину внутренних стенок в областях соединения ячеек. Метод «внахлест» подразумевает, что каждая последующая ячейка будет иметь общую грань с предыдущей (рис. 1, *b* и *f*). Видно, что при рассмотрении системы из девяти элементарных ячеек разница в количестве граней составляет 12 штук [26]. При этом стоит понимать, что метод «внахлест» нарушает периодичность хиральных структур, и в этом случае элементарная ячейка не является представительным объемом такого образца.

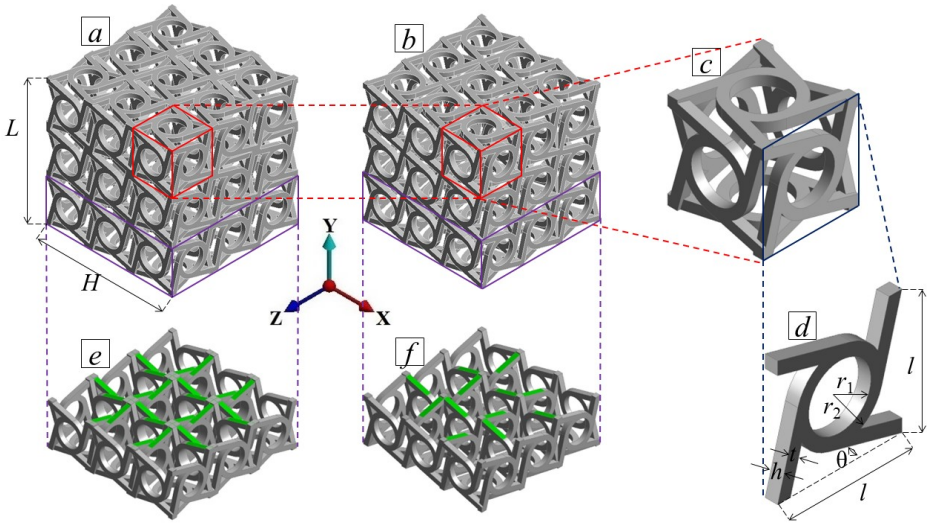


Рис. 1. Метаматериал: *a* – образец, полученный методом «присоединения»; *b* – образец, полученный методом «внахлест»; *c* – ячейка метаматериала; *d* – тетрахиральная структура; *e* – соединение ячеек методом «присоединения»; *f* – соединение ячеек методом «внахлест»

Fig. 1. Metamaterial: *a* – sample obtained by the adjoining method; *b* – sample obtained by the overlapping method; *c* – unit cell of the metamaterial; *d* – tetrachiral structure; *e* – connecting cells using the adjoining method; *f* – connecting cells using the overlapping method

Эта проблема возникает в силу неповторимости периодичности в пространстве. Отсюда важно рассматривать кубические образцы из большого числа ячеек, к примеру из 27 штук.

Следует отметить, что хиральная структура может быть построена с разным направлением наклона связок по отношению к кольцу, и в данном исследовании используется левосторонняя хиральная элементарная ячейка. Это означает, что если смотреть на грани ячейки изнутри, то нижняя и левая связки отходят от кольца влево. Поскольку все грани имеют одинаковый тип хиральности, то можно сказать, что элементарная ячейка имеет регулярное расположение хиральных структур.

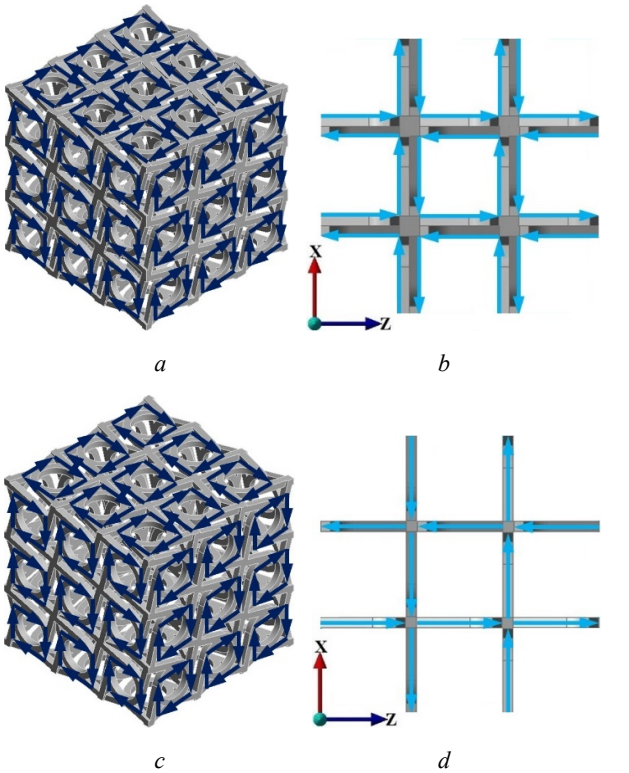
Моделирование квазистатического сжатия построенных моделей образцов проводилось с помощью коммерческого программного обеспечения ANSYS 2020R2. Деформационное поведение образцов исследуется с использованием метода конечных элементов (МКЭ). Детали, касающиеся применения метода конечных элементов для решения задач деформирования подобных метаматериалов изложены в статье [20]. Для анализа была принята математическая модель упругого материала. Модуль Юнга и коэффициента Пуассона составляли 2,6 ГПа и 0,4 соответственно. Моделирование реализуется с использованием теории больших перемещений. На нижней (относительно направления оси *Y*) поверхности образца задается жесткое закрепление. На верхней грани задано перемещение, соответствующее сжатию образца на 3 %. К остальным граням применялись свободные граничные условия в напряжениях. Напряжения и деформации в начальный момент времени равны нулю. В трехмерных моделях конечных элементов использовались тетраэдральные элементы. Чтобы убедиться, что результаты не зависят от сетки, проводился анализ сеточной сходимости, в итоге для моделирования использовалась сетка со средним размером элемента 1 мм.

Результаты и их обсуждение

Механизм деформации. Трехмерный образец из хирального метаматериала строится путем периодического расположения элементарных ячеек вдоль трех ортогональных осей координат. Обозначим количество ячеек вдоль каждой оси символом n с нижним индексом, соответствующим обозначению оси. Тогда общее количество ячеек в образце определяется как $n_x \times n_y \times n_z$. В этой работе для исследования используется образец, состоящий из 3 × 3 × 3 ячеек. Будет рассмотрено два метода создания тетрахирального метаматериала (соединения ячеек в образце): 1) присоединение, 2) внахлест.

Отличительным свойством тетрахирального метаматериала является эффект «нагружение – скручивание» при его деформировании. Традиционный анализ механизмов деформирования основан на кинематическом анализе конструкции [27]. Для этого анализа необходимо вычислить перемещения каждой части конструкции при деформировании. В данном исследовании такими частями являются тетрахиральные структуры граней ячеек. Смещение на нижней грани образца отсутствует в соответствии с наложенными граничными условиями, а на остальных гранях механизмы деформирования могут быть связаны с деформированием структурных элементов ячеек. Особую роль в структуре играет кольцо, благодаря повороту которого возникает эффект скручивания.

Вращение каждой тетрахиральной структуры определено направлением хиральности. На рис. 2 стрелками показано направление движения структурных элементов, вызванное этим вращением. Каждая внешняя грань образцов имеет девять тетрахиральных структур (рис. 2, *a* и *b*). Количество тетрахиральных структур во внутренних гранях (стенках) в образцах для методов «присоединение» и «внахлест» различается (рис. 2, *b* и *d*). Анализируя направления стрелок во внутренних гранях, видим, что при соединении ячеек методом «присоединения» стрелки направлены в противоположных направлениях, что говорит о разносторонней хиральности. Совокупное скручивание структур во внешних и внутренних гранях образцов реализует поворот сечений образцов против часовой стрелки.



a *b*

c *d*

Рис. 2. Схема движения тетрахиральных структур в образцах, полученных двумя методами соединения ячеек в метаматериале: *a* – «присоединение», внешние грани; *b* – «присоединение», внутренние грани; *c* – «внахлест», внешние грани; *d* – «внахлест», внутренние грани

Fig. 2. Scheme of the movement of tetrachiral structures in samples obtained by two methods of connecting cells in the metamaterial: *a* – adjoining, outer edges; *b* – adjoining, inner edges; *c* – overlapping, outer edges; *d* – overlapping, inner edges

Рассмотрим различие в эффекте «нагружение – скручивание» при изменении метода соединения ячеек в образце из метаматериала. Вектор скручивания образца (поворота сечений) $\alpha\left(\alpha_x,\alpha_y,\alpha_z\right)$ можно вычислить по полю перемещений $f\left(\Delta x,\Delta y,\Delta z\right)$ [28]. Методика определения угла поворота представлена в работах [29; 30]. К примеру, при одноосном сжатии вдоль оси *Y* угол поворота сечения в градусах определяется по формуле

$$\alpha_y=\left(\frac{180}{\pi}\right)\arcsin\left(\frac{2\Delta x}{H}\right),$$

где Δx – перемещение вершин сечения вдоль оси *X*, *H* – ширина образца (см. рис. 1, *a*). Исходя из этой формулы, вместо угла поворота можно анализировать смещения.

Как показано на рис. 3, *a*, метод соединения ячеек влияет на отклонение образца от исходного положения. Результаты для исследуемых образцов показывают, что преобразование внутренней структуры приводит к изменению эффекта «нагружение – скручивание» в 1,25 раза. Подобная разница объясняется различием толщин внутренних стенок структуры образца. Утонение этих стенок позволяет увеличить эффект «нагружение – скручивание», вызванный хиральной структурой. Объем базового материала в образцах с разной внутренней организацией отличается в 1,6 раза, при этом пористость у образцов из метаматериала изменяется незначительно:

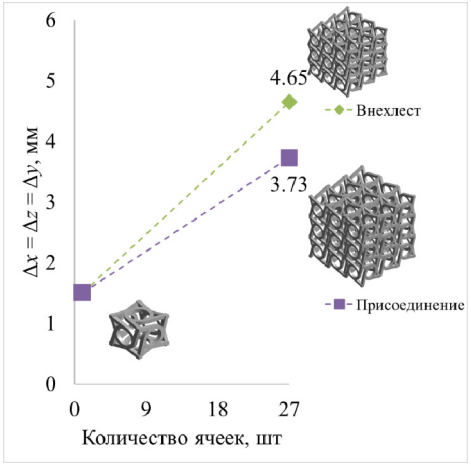
$$\frac{P_{ov}}{P_{ad}}=\frac{1-\frac{V_{mm_{ov}}}{V_{con_{ov}}}}{1-\frac{V_{mm_{ad}}}{V_{con_{ad}}}}=\frac{1-\frac{433140}{2744000}}{1-\frac{678970}{3375000}}=\left[\frac{\frac{\text{мм}^3}{\text{мм}^3}}{\frac{\text{мм}^3}{\text{мм}^3}}\right]=1,05,$$

где *P* – пористость образца, V_{mm} – объем базового материала в образце из метаматериала, V_{con} – объем образца, индексы «*ad*» и «*ov*» соответствуют способу соединения ячеек в образце. V_{conov} и V_{conad} не равны, так как при изменении способа соединения ячеек изменяются линейные размеры образца.

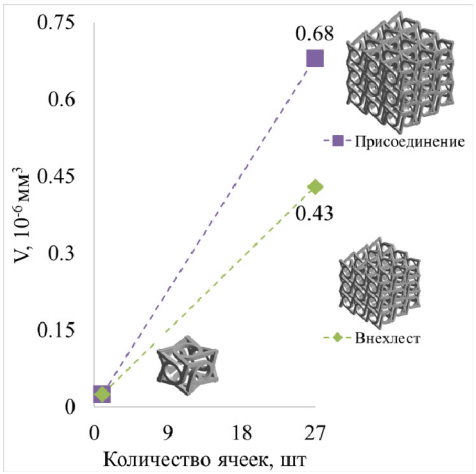
Помимо способа соединения ячеек, в образце на эффект «нагружение – скручивание» влияет разносторонняя хиральность граней соседних ячеек. Она возникает в методе «присоединения», в области контакта двух ячеек и не встречается в методе «внахлест».

Для прогнозирования свойств метаматериала важно определить размер представительного объема. Для метода «присоединения» в качестве такого объема может выступать элементарная ячейка. На рис. 3, *a* и *b*, также приведены значения для элементарной ячейки (т.е. образца из 1 × 1 × 1 ячеек), результаты показывают, что увеличение числа ячеек соразмерно увеличивает поворот верхней грани и объем образца. Более подробно с результатами для случая элементарной ячейки можно познакомиться в [31].

Контролируя структурную организацию метаматериала из 3 × 3 × 3 ячеек, можно получать частные случаи метаматериалов со своими определенными механическими свойствами. В следующем разделе будут представлены результаты для эффективных модуля Юнга и коэффициента Пуассона.



a



b

Рис. 3. Разница между двумя методами соединения ячеек в метаматериале: *a* – наибольшие отклонения вершин верхней грани от исходного положения в образцах, полученных двумя методами соединения ячеек; *b* – объем базового материала в образцах, полученных двумя методами соединения ячеек

Fig. 3. The difference between the two methods of connecting cells in the metamaterial: *a* – the largest deviations of the points of the upper edge from the initial position in samples obtained by two methods of connecting cells; *b* – volume of base material in samples obtained by two methods of connecting cells

Упругие физико-механические свойства метаматериала. По форме образца при сжатии на 0,03*L* и перемещениям, перпендикулярным оси нагружения, определялось значение эффективного коэффициента Пуассона. Для анализа использовались реперные точки, расположенные на ребрах кубического образца, на каждом слое ячеек, перпендикулярном оси нагружения, то есть с шагом 50 мм. Трехмерные образцы демонстрируют нулевое значение эффективного коэффициента

Пуассона. Очевидно, это связано с внутренней структурной организацией метаматериала.

С целью оценки значений эффективного модуля Юнга для рассматриваемых частных случаев метаматериала были проанализированы силовые реакции опоры фиксированной грани образца. Эффективный модуль Юнга в образцах, полученных методом «присоединения» и методом «внахлест», определялся по формуле:

$$E_{adj} = \frac{\frac{F}{S}}{\frac{\Delta l}{l}} = \frac{47364}{\frac{150\cdot10^{-3}\cdot150\cdot10^{-3}}{4,5}} = \left[\frac{\frac{\text{Н}}{\text{м}\cdot\text{м}}}{\frac{\text{мм}}{\text{мм}}}\right] = 70,17 \text{ МПа},$$

$$E_{ov} = \frac{\frac{F}{S}}{\frac{\Delta l}{l}} = \frac{14451}{\frac{140\cdot10^{-3}\cdot140\cdot10^{-3}}{4,2}} = \left[\frac{\frac{\text{Н}}{\text{м}\cdot\text{м}}}{\frac{\text{мм}}{\text{мм}}}\right] = 24,58 \text{ МПа}.$$

Как и в случае характеристики поворота, модуль Юнга также зависит от объема базового материала и разнонаправленной хиральности в смежных ячейках, соединяющихся методом «присоединения».

Все вышеописанные исследования проводились при смене оси нагружения для определения всех характеристик по трем ортогональным осям координат. Результаты показали, что образец можно описывать как анизотропную среду с кубической системой решетки (таблица). Модуль Юнга у образца, в котором ячейки соединялись методом «присоединение», оказывается выше почти в три раза (2,7). При этом оба значения гораздо меньше, чем модуль Юнга базового материала. Это объясняется тем, что такие метаматериалы являются высокопористыми средами. В образце, полученном методом «присоединения» пористость достигла 80 %, что на 4 % меньше, чем пористость для образца, полученного другим методом.

Упругие свойства механического метаматериала вдоль трех ортогональных осей

Elastic properties of mechanical metamaterial along three orthogonal axes

		Нагружение по X	Нагружение по Y	Нагружение по Z
Параметр	$E_x = E_y = E_z$	$\Delta y = \Delta z$	$\Delta x = \Delta z$	$\Delta x = \Delta y$
Размерность	МПа	мм	мм	мм
Присоединение	70,17	3,73	3,73	3,73
Внахлест	24,58	4,65	4,65	4,65

Напряженно-деформированное состояние метаматериала. Представляет интерес рассмотреть напряженно-деформированное состояние в образцах. На рисунке 4 показано распределение напряжений в двух образцах, различающихся методом соединения ячеек, при осевом сжатии. Для построения методом «присоединения» характерна более неоднородная картина распределения напряжений, с наличием более сильных концентраторов напряжений (см. рис. 4). Следует обратить внимание на области взаимодействия двух граней тетрахиральных структур, данный способ соединения ячеек может выступать как неоптимальное построение метаматериала. Максимальные значения как эквивалентных напряжений, так и эквивалентных деформаций наблюдаются во внутренней структуре метаматериала: в местах соединения ячеек и в областях соединения элементов тетрахиральной структуры. Представленные места следует рассматривать как потенциальные участки разрушения.

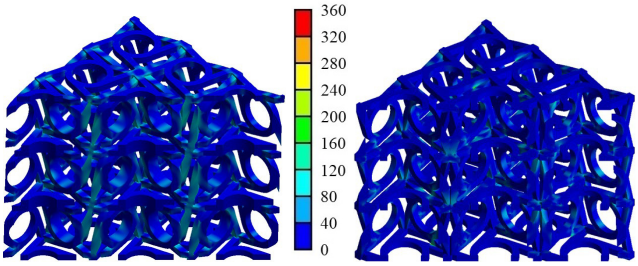


Рис. 4. Распределение интенсивности напряжений (МПа) в образцах, полученных методами: *a* – «присоединение»; *b* – «внахлест»

Fig. 4. Equivalent stress distribution (in MPa) in samples obtained using the following methods: *a* – adjoining, *b* – overlapping

Заключение

В работе получены результаты по влиянию структурной организации на деформационное поведение и физико-механические свойства тетрахирального метаматериала. Рассмотрены два метода соединения ячеек в образце из метаматериала: 1) присоединение и 2) внахлест. Показано, что существенное различие объема базового материала в образцах (37 %) не приводит к большой разнице между значением пористости (5 %).

Рассчитанное значение эффективного коэффициента Пуассона вдоль трех осей нагружения, совпадающих с направлениями граней элементарной ячейки, равно нулю. Эти данные расходятся со значениями в литературных источниках [7–9; 32], где были рассмотрены двумерные структуры и другие оси нагружения. Показано, что помимо относительной плотности метаматериала [33], на жесткость конструкции влияет метод соединения ячеек в образце. Модуль Юнга у образца из метаматериала, в котором ячейки соединялись методом «присоединения», оказался выше почти в три раза, чем при соединении методом «внахлест». При этом оба эффективных значения гораздо меньше, чем модуль Юнга базового материала, что объясняется высокой пористостью метаматериала. Вне зависимости от оси нагружения по главным ортогональным направлениям были получены одинаковые значения эффективного модуля Юнга, что свидетельствует о симметрии упругих свойств механического метаматериала вдоль трех ортогональных осей.

Исследование напряженно-деформированного состояния показало недостаток метода соединения «присоединение» – для него характерна более неоднородная картина распределения напряжений, с наличием более сильных концентраторов напряжений.

Библиографический список

1. A system for designing and 3D printing of porous structures / A.M.M.S. Ullah, H. Kiuno, A. Kubo, D.M.D'Addona // CIRP Annals. – 2020. – Vol. 69, № 1. – P. 113–116.
2. Renewable energy harvesting and absorbing via multi-scale metamaterial systems for Internet of things / T. Tan, Z. Yan, H. Zou [et al.] // Applied Energy. – 2019. – Vol. 254. – P. 113717.
3. Transmodal Fabry – Pérot resonance: theory and realization with elastic metamaterials / J.M. Kweun, H.J. Lee, J.H. Oh [et al.] // Physical Review Letters. – 2017. – Vol. 118. – Transmodal Fabry – Pérot Resonance. – № 20. – P. 205901.
4. Mechanical metamaterials associated with stiffness, rigidity and compressibility: A brief review / X. Yu, J. Zhou, H. Liang [et al.] // Progress in Materials Science. – 2018. – Vol. 94. – Mechanical metamaterials associated with stiffness, rigidity and compressibility. – P. 114–173.
5. Grima J.N., Gatt R., Farrugia P.-S. On the properties of auxetic meta-tetrachiral structures // Physica Status Solidi (B). – 2008. – Vol. 245, № 3. – P. 511–520.
6. Prall D., Lakes R.S. Properties of a chiral honeycomb with a poisson's ratio of – 1 // International Journal of Mechanical Sciences. – 1997. – Vol. 39, № 3. – P. 305–314.
7. Elastic constants of 3-, 4- and 6-connected chiral and anti-chiral honeycombs subject to uniaxial in-plane loading / A. Alderson, K. L. Alderson, D. Attard [et al.] // Composites Science and Technology. – 2010. – Vol. 70, № 7. – P. 1042–1048.
8. Elastic properties of chiral, anti-chiral, and hierarchical honeycombs: A simple energy-based approach / D. Mousanezhad, B. Haghpanah, R. Ghosh [et al.] // Theoretical and Applied Mechanics Letters. – 2016. – Vol. 6. – Elastic properties of chiral, anti-chiral, and hierarchical honeycombs. – № 2. – P. 81–96.
9. An analytical and finite element study on the mechanical properties of irregular hexachiral honeycombs / L. Mizzi, D. Attard, R. Gatt [et al.] // Smart Materials and Structures. – 2018. – T. 27, № 10. – P. 105016.
10. Frenzel T., Kadic M., Wegener M. Three-dimensional mechanical metamaterials with a twist // Science. – 2017. – Vol. 358, № 6366. – P. 1072–1074.
11. Akhmetshin L.R., Smolin I.Yu. Influence of unit cell parameters of tetrachiral mechanical metamaterial on its effective properties // Nanoscience and Technology: An International Journal. – 2020. – Vol. 11, № 3. – P. 265–273.
12. Enhanced energy harvesting by devices with the metamaterial substrate / A. Sangsefidi, J. Kadkhodapour, A.P. Anaraki [et al.] // Fizicheskaya Mezomekhanika. – 2022. – T. 25, № 4. – P. 106–121.
13. Topological defects produce exotic mechanics in complex metamaterials / A.S. Meeussen, E.C. Oğuz, Y. Shokef, M.V. Hecke // Nature Physics. – 2020. – Vol. 16, № 3. – P. 307–311.
14. Response evolution of mechanical metamaterials under architectural transformations / A.S. Meeussen, E.C. Oğuz, M.V. Hecke, Y. Shokef // New Journal of Physics. – 2020. – T. 22, № 2. – P. 023030.
15. Akhmetshin L.R., Smolin I.Yu. Analysis of stress and strain in the tetrachiral metamaterial with different kinds of unit cell connections // Procedia Structural Integrity. – 2022. – Vol. 35. – P. 247-253.
16. Static and dynamic response of sandwich beams with lattice and pantographic cores / Yu. Solyaev, A. Babaytsev, A. Ustenko, A. Ripetskiy, A. Volkov // Journal of Sandwich Structures & Materials. – 2022. – Vol. 24, № 2. – P. 1076–1098.
17. Fischer S., Hillen L., Eberl C. Mechanical metamaterials on the way from laboratory scale to industrial applications: challenges for characterization and scalability // Materials. – 2020. – Vol. 13, is. 16. – Art. 3605.
18. Coulais C., Kettenis C., van Hecke M. A characteristic length scale causes anomalous size effects and boundary programmability in mechanical metamaterials // Nature Physics. – 2018. – Vol. 14. – P. 40–44.
19. Improved mechanical performance of quasi-cubic lattice metamaterials with asymmetric joints / Y.O. Solyaev, A.D. Ustenko, A.V. Babaytsev, V.N. Dobryanskiy // Scientific Reports. – 2023. – Vol. 13. – Art. 14846.
20. Ахметшин Л.Р., Смолин И.Ю. Анализ некоторых методов соединения ячеек в механическом тетрахиральном метаматериале // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. – 2022. – № 77. – С. 27–37.
21. Digital strategies for structured and architected materials design / S. Bonfanti, R. Guerra, M. Zaiser, S. Zapperi // APL Materials. – 2021. – Vol. 9, № 2. – P. 020904.
22. Bhullar S.K., Lala N.L., Ramkrishna S. Smart biomaterials – a review // Reviews on Advanced Materials Science. – T. 40, № 3. – P. 303–314.
23. Yuan Z., Cui Z., Ju J. Micropolar homogenization of wavy tetra-chiral and tetra-achiral lattices to identify axial–shear coupling and directional negative Poisson's ratio // Materials & Design. – 2021. – Vol. 201. – P. 109483.
24. Mechanics of curved-ligament hexachiral metastructures under planar deformations / F. Runkel, G. Ramstein, G. Molinari [et al.] // Journal of the Mechanics and Physics of Solids. – 2019. – Vol. 125. – P. 145–163.
25. Drastic tailorable thermal expansion chiral planar and cylindrical shell structures explored with finite element simulation / H. Yu, W. Wu, J. Zhang [et al.] // Composite Structures. – 2019. – Vol. 210. – P. 327–338.
26. 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, № 19. – P. 10214–10220.
27. Li X., Yang Z., Lu Z. Design 3D metamaterials with compression-induced-twisting characteristics using shear–compression coupling effects // Extreme Mechanics Letters. – 2019. – Vol. 29. – P. 100471.
28. 3D chiral metamaterial modular design with highly-tunable tension-twisting properties / W. Xu, Z. Liu, L. Wang, P. Zhu // Materials Today Communications. – 2022. – Vol. 30. – P. 103006.
29. Tunable compression-torsion coupling effect in novel cylindrical tubular metamaterial architected with boomerang-shaped tetrachiral elements / H. Wang, C. Zhang, Q.-H. Qin, Y. Bai // Materials Today Communications. – 2022. – Vol. 31. – P. 103483.
30. Akhmetshin L.R., Smolin I.Yu. Effect of the type of unit cell connection in a metamaterial on its programmable behavior // Nanoscience and Technology: An International Journal. – 2023. – Vol. 14, № 3. – P. 63–71.
31. Response evolution of a tetrachiral metamaterial unit cell under architectural transformations / L. Akhmetshin, K. Iokhim, E. Kazantseva, I. Smolin // Symmetry. – 2022. – Vol. 15, № 1. – P. 14.
32. Auxetic metamaterials and structures: a review / X. Ren, R. Das, P. Tran [et al.] // Smart Materials and Structures. – 2018. – T. 27. – Auxetic metamaterials and structures. – № 2. – P. 023001.
33. Kumar Sahu S.K., Dhar Badgayan N.D., Rama Sreekanth P.S.R. Numerical investigation on the effect of wall thickness on quasistatic crushing properties of nylon honeycomb structure // Materials Today: Proceedings. – 2020. – Vol. 27. – P. 798–804.

References

1. Ullah A., Kiuno H., Kubo A., D'Addona D.M. A system for designing and 3D printing of porous structures // CIRP Annals. – 2020. – Vol. 69. – No. 1. – P. 113-116. doi: 10.1016/j.cirp.2020.04.088

2. Tan T., Yan Zh., Zou H., Ma K., Liu F., Zhao L., Peng Zh., Zhang W. Renewable energy harvesting and absorbing via multi-scale metamaterial systems for Internet of things // Applied Energy. – 2019. – Vol. 254. – No. 113717. doi: 10.1016/j.apenergy.2019.113717

3. Kweun J. M., Lee H. J., Oh J. H., Seung H. M., Kim Y.Y. Transmodal Fabry-Pérot Resonance: Theory and Realization with Elastic Metamaterials // Physical Review Letters. – 2017. – Vol. 118. – Is. 20. – Art. 205901. doi: 10.1103/PhysRevLett.118.205901

4. Yu X., Zhou J., Liang H. Jiang Zh., Wu L. Mechanical metamaterials associated with stiffness, rigidity and compressibility: A brief review // Progress in Materials Science. – 2018. – Vol. 94. – P. 114-173. doi: 10.1016/j.pmatsci.2017.12.003

5. Grima J.N., Gatt R., Farrugia P.-S. On the properties of auxetic meta-tetrachiral structures // Physica Status Solidi (B). – 2008. – Vol. 245. – No. 3. – P. 511-520. doi: 10.1002/pssb.200777704

6. Prall D., Lakes S. Properties of a chiral honeycomb with a Poisson's ratio of — 1 // International Journal of Mechanical Sciences. – 1997. – Vol. 39. – № 3. – P. 305-314. doi: 10.1016/S0020-7403(96)00025-2

7. Alderson A., Alderson K.L., Attard D., Evans K.E., Gatt R., Grima J.N., Miller W., Ravirala N., Smith C.W., Zied K. Elastic constants of 3-, 4- and 6-connected chiral and anti-chiral honeycombs subject to uniaxial in-plane loading // Composites Science and Technology. – 2010. – Vol. 70. – No. 7. – P. 1042-1048. doi: 10.1016/j.compscitech.2009.07.009

8. Mousanezhad D., Haghpanah B., Ghosh R., Hamouda A.M., Nayeb-Hashemi H., Vaziri A. Elastic properties of chiral, anti-chiral, and hierarchical honeycombs: A simple energy-based approach // Theoretical and Applied Mechanics Letters. – 2016. – Vol. 6. – No. 2. – P. 81-96. doi: 10.1016/j.taml.2016.02.004

9. Mizzi L., Attard D., Gatt R., Farrugia P.-S., Grima J.N. An analytical and finite element study on the mechanical properties of irregular hexachiral honeycombs // Smart Materials and Structures. – 2018. – T. 27. – No. 10. – P. 105016. doi: 10.1088/1361-665X/aad3f6

10. Frenzel T., Kadic M., Wegener M., Three-dimensional mechanical metamaterials with a twist // Science. – 2017. – Vol. 358. – No. 6366. – P. 1072. doi: 10.1126/science.aao4640

11. Akhmetshin L.R., Smolin I.Yu. Influence of unit cell parameters of tetrachiral mechanical metamaterial on its effective properties // Nanoscience and Technology: An International Journal. – 2020. – Vol. 11. – No. 3. – P. 265-273. doi: 10.1615/NanoSciTechnolIntJ.2020033737

12. Sangsefidi A.R., Kadkhodapour J., Anaraki A.P., Dibajian S.H., Schmauder S. Enhanced energy harvesting by devices with the metamaterial substrate // Physical Mesomechanics. – 2022. – Vol. 25. – P. 568-582. doi: 10.1134/S1029959922060091

13. Meeussen A.S., Oğuz E.C., Shokef Y., Hecke M., Topological defects produce exotic mechanics in complex metamaterials // Nature Physics. – 2020. – Vol. 16. – P. 307. doi: 10.1038/s41567-019-0763-6

14. Meeussen A.S., Oğuz E.C., Hecke M., Shokef Y. Response evolution of mechanical metamaterials under architectural transformations // New Journal of Physics. – 2020. – Vol. 22. – No. 023030. doi: 10.1088/1367-2630/ab69b5

15. Akhmetshin L.R., Smolin I.Yu. Analysis of stress and strain in the tetrachiral metamaterial with different kinds of unit cell connections // Procedia Structural Integrity. – 2022. – Vol. 35 – P. 247-253. doi:10.1016/j.prostr.2021.12.071

16. Solyaev Yu., Babaytsev A., Ustenko A., Ripetskiy A., Volkov A. Static and dynamic response of sandwich beams with lattice and pantographic cores, Journal of Sandwich Structures & Materials. – 2022. – Vol. 24. – No. 2. – P. 1076-1098. doi: 10.1177/10996362211033896

17. Fischer S., Hillen L. Eberl C. Mechanical Metamaterials on the Way from Laboratory Scale to Industrial Applications: Challenges for Characterization and Scalability // Materials. – 2020. – Vol. 13. – Is. 16. – Art. 3605. doi: doi: 10.3390/ma13163605

18. Coulais C., Kettenis C. van Hecke M. A characteristic length scale causes anomalous size effects and boundary programmability in mechanical metamaterials // Nature Physics. – 2018. – Vol. 14. – P. 40-44. doi: 10.1038/nphys4269

19. Solyaev Y.O., Ustenko A.D., Babaytsev A.V. Dobryanskiy V.N. Improved mechanical performance of quasi-cubic lattice metamaterials with asymmetric joints // Scientific Reports. – 2023. – Vol. 13. – Art. 14846. doi: 10.1038/s41598-023-41614-3

20. Akhmetshin L.R., Smolin I.Yu. Analysis of some methods of integration of cells in a mechanical metamaterial. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika – Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics. – 2022. – No. 77. – P. 27–37. doi: 10.17223/19988621/77/3

21. 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

22. Bhullar S.K., Lala N.L., Ramkrishna S. Smart biomaterials - a review // Reviews on Advanced Materials Science. – V. 40. – № 3. – P. 303-314.

23. Yuan Z., Cui Z., Ju J. Micropolar homogenization of wavy tetra-chiral and tetra-achiral lattices to identify axial–shear coupling and directional negative Poisson's ratio // Materials & Design. – 2021. – Vol. 201. – P. 109483. doi: 10.1016/j.matdes.2021.109483

24. Runkel F., Ramstein G., Molinari G., Arrieta A.F., Ermanni P. Mechanics of curved-ligament hexachiral metastructures under planar deformations // Journal of the Mechanics and Physics of Solids. – 2019. – Vol. 125. – P. 145-163. doi: 10.1016/j.jmps.2018.12.001

25. Yu H., Wu W., Zhang J., Chen J., Liao H., Fang D. Drastic tailorable thermal expansion chiral planar and cylindrical shell structures explored with finite element simulation // Composite Structures. – 2019. – Vol. 210. – P. 327-338. doi: 10.1016/j.compstruct.2018.11.043

26. 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

27. Li X., Yang Zh., Lu Z. Design 3D metamaterials with compression-induced-twisting characteristics using shear–compression coupling effects // Extreme Mechanics Letters. – 2019. – Vol. 29. – P. 100471. doi: 10.1016/j.eml.2019.100471

28. Xu W., Liu Z., Wang L., Zhu P. 3D chiral metamaterial modular design with highly-tunable tension-twisting properties // Materials Today Communications. – 2022. – Vol. 30. – P. 103006. doi: 10.1016/j.mtcomm.2021.103006

29. Wang H., Zhang C., Qin Q.-H., Bai Y. Tunable compression-torsion coupling effect in novel cylindrical tubular metamaterial architected with boomerang-shaped tetrachiral elements // Materials Today Communications. – 2022. – Vol. 31. – P. 103483. doi: 10.1016/j.mtcomm.2022.103483

30. Akhmetshin L.R., Smolin I.Yu. Effect of the type of unit cell connection in a metamaterial on its programmable behavior // Nanoscience and Technology: An International Journal. – 2023. – Vol. 14. – No. 3. – P. 63-71. doi: 10.1615/NanoSciTechnolIntJ.2022044662

31. Akhmetshin L., Iokhim K., Kazantseva E., Smolin I. Response evolution of a tetrachiral metamaterial unit cell under architectural transformations // Symmetry. – 2022. – Vol. 15. – № 1. – P. 14. doi: 10.3390/sym15010014

32. Ren X., Das R., Tran Ph., Ngo T.D., Xie Y.M. Auxetic metamaterials and structures: a review // Smart Materials and Structures. – 2018. – Vol. 27. – No. 023001. doi: 10.1088/1361-665X/aaa61c

33. Sahu S. K., Badgayan N.D., Sreekanth P.S.R. Numerical investigation on the effect of wall thickness on quasistatic crushing properties of nylon honeycomb structure // Materials Today: Proceedings. – 2020. – Vol. 27. – P. 798-804. doi: 10.1016/j.matpr.2019.12.351

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 carried out within the framework of the state assignment of the Institute of Physical Problems and Problems of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, topic number FWRW-2022-0003.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

The contribution of the authors is equivalent.