Ахметшин Л.Р., Смолин И.Ю. Программируемое поведение метаматериала при изменении способа соединения элементарных ячеек // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2023. – № 1. С. 26–32. DOI: 10.15593/perm.mech/2023.1.03

Akhmetshin L.R., Smolin I.Yu. Programmable behavior of the metamaterial by kind unit cells connection. *PNRPU Mechanics Bulletin,* 2023, no. 1, pp. 26-32. DOI: 10.15593/perm.mech/2023.1.03

пермский политех

ВЕСТНИК ПНИПУ. МЕХАНИКА
№ 1, 2023
PNRPU MECHANICS BULLETIN
https://ered.pstu.ru/index.php/mechanics/index



Научная статья

DOI: 10.15593/perm.mech/2023.1.03
УДК 539.3

ПРОГРАММИРУЕМОЕ ПОВЕДЕНИЕ МЕТАМАТЕРИАЛА ПРИ ИЗМЕНЕНИИ СПОСОБА СОЕДИНЕНИЯ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЯЧЕЕК

Л.Р. Ахметшин, И.Ю. Смолин

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия

О СТАТЬЕ

Получена: 14 июля 2022 г.
Одобрена: 09 февраля 2023 г.
Принята к публикации:
05 апреля 2023 г.

Ключевые слова:

механический метаматериал, ячеистая структура, соединение ячеек, хиральность, численное моделирование, метод конечных элементов, упругое деформирование, соотношение структура – свойства, скручивание, эффективные характеристики.

АННОТАЦИЯ

Работа посвящена численному анализу одноосного нагружения образца из механического метаматериала. Структура механического метаматериала построена из кольца и четырех связок, составляющих тетрахиральную структуру. Особенность подобной структуры заключена в скручивании образца под силовой нагрузкой. Рассмотрены два метода соединения ячеек в метаматериале: «присоединение» и «внахлест». Метод соединения ячеек «присоединение» увеличивает толщину некоторых элементов внутренней структуры образца, что позволяет рассматривать это как топологический дефект метаматериала. Соединение методом «внахлест» позволяет экономить базовый материал, из которого построена тетрахиральная структура. Различия в структуре при построении трехмерного образца приводят к существенному изменению его характеристик. Численное решение задачи осуществляется в трехмерной постановке с использованием метода конечных элементов. Определяющее соотношение, описывающее поведение модели, соответствует закону Гука. Численное моделирование одноосного нагружения образцов позволило получить результаты их механического отклика и проанализировать эффективные свойства метаматериалов. Топологический дефект в виде утолщения элементов внутренней структуры приводит к различию линейных размеров образцов. Увеличенная толщина в местах соединения элементарных ячеек также привела к уменьшению эффективной плотности образца из метаматериала. Этот же образец продемонстрировал тройное увеличение значения модуля упругости. Большая способность к сопротивлению деформированию привела к уменьшению эффекта скручивания по сравнению с образцом, ячейки которого соединялись методом «внахлест». Полученные результаты позволят программировать механическое поведение и свойства образцов из метаматериала.

© ПНИПУ

© **Ахметшин Линар Ришатович** – асп., e-mail: akhmetshin.lr@gmail.com, iD: 0000-0002-9926-6567
Смолин Игорь Юрьевич – д.ф.-м.н., доцент, e-mail: smolin@ispms.ru, iD: 0000-0003-3167-9530

Linar A. Rishatovich – PhD-student, e-mail: akhmetshin.lr@gmail.com, iD: 0000-0002-9926-6567
Igor S. Yurievich – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, professor, e-mail: smolin@ispms.ru, iD: 0000-0003-3167-9530.

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)

PROGRAMMABLE BEHAVIOR OF THE METAMATERIAL BY KINDS OF UNIT CELLS CONNECTION

L.R. Akhmetshin, I.Yu. Smolin

National Research Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 14 July 2022
Approved: 09 February 2023
Accepted for publication:
05April February 2023

Keywords:

mechanical metamaterial, cell structure, cell connection, chirality, numerical simulation, finite element method, elastic deformation, structure-properties relationship, twist, effective properties.

ABSTRACT

The paper is devoted to the numerical analysis of uniaxial loading of a sample of the mechanical metamaterial. The structure of the mechanical metamaterial is constructed of a ring and four ligaments, which make up a tetrachiral structure. The peculiarity of such a structure consists in torsion of the sample under the force load. Two methods of connecting cells in the metamaterial are considered: "adjoining" and "overlapping". The "adjoining" method of joining cells increases the thickness of the internal structure of the sample, which allows us to consider it as a topological defect of the metamaterial. The "overlapping" method saves the base material from which the tetrachiral structure is constructed. Differences in the structure when constructing a three-dimensional sample result in a significant change in the characteristics of the sample. Numerical solution of the problem is performed in a three-dimensional formulation using the finite element method. The constitutive relation describing the behavior of the model corresponds to Hooke's law. Numerical simulation of uniaxial loading made it possible to obtain the results of mechanical response and to analyze the effective properties of metamaterials. A topological defect in the form of a thickening of the internal structure elements led to a difference in the linear dimensions of the two samples. The increased thickness of the unit cell connection elements resulted in a decrease in the effective density of the metamaterial sample. The same sample showed a triple increase in the value of the elastic modulus. The greater ability to resist deformation resulted in a reduced twist effect compared to the sample whose cells were joined by the "overlapping" method. The results obtained will make it possible to program the mechanical behavior and properties of the metamaterial sample.

© PNRPU

Введение

Существующие технологии 3D-печати дали прекрасную возможность изготавливать структуры сложной геометрической формы, используя непосредственно их цифровые модели [1; 2]. В последнее время создание структур ассоциируется с метаматериалами, физико-механические свойства которых зависят от искусственно выбранной архитектуры и в меньше степени от химического состава базового материала. Это нашло большой отклик в инженерной отрасли [2], а также в биомедицинских приложениях [3]. Проектировать поведение структур возможно, изменяя параметры структуры [4], внедряя топологические дефекты [5; 6] или изменяя способ соединения ячеек, при создании образцов [7].

Использование тетрахиральной структуры в кубической ячейке известно с работ Френцель (Frenzel) и др. [8]. Тетрахиральность определяется наличием кольца и четырех связок. Хиральность – это свойство предмета не накладываться на свое зеркальное отображение, она бывает лево- и правосторонней. Тетрахиральная структура очень интересна с конструкционной точки зрения благодаря ауксетическому свойству [9–12]. В сравнении с двухмерными хиральными метаматериалами, трехмерные хиральные метаматериалы гораздо сложнее по конфигурации и труднее в изготовлении, поэтому исследований трехмерных хиральных структур мало. Тетрахиральная структура обладает скручиванием при одноосном силовом нагружении, что соответствует нетривиальному механическому отклику. Поэтому часто трудно или даже невозможно определить и понять свойства таких метаматериалов. Математическое моделирование является благоприятным инструментом исследования до 3D-печати образцов, позволяя экономить время и средства. Численные результаты помогают также определить оптимальную структуру. Хиральные 3D-кубические решетки были разработаны и численно проанализированы в [13]. На основе двумерных тетрахиральных сот Фу и др. предложили трехмерную ортотропную хиральную структуру путем ортогональной сборки [14]. Используя хиральный механизм наклонных стержней в [15; 16], были разработаны трехмерные хиральные и антихиральные ауксетические метаматериалы. В работах Duan et al. [17] были также предложены трехмерные хиральные ауксетические метаматериалы. В настоящее время количество структур с эффектом «силовое нагружение – скручивание» велико и количество работ по разработке новых структур с этим эффектом постоянно возрастает [18–33].

В нашей предыдущей работе было показано влияние параметров тетрахиральной структуры на механическое поведение метаматериалов [4]. Развитие этой идеи позволило обратить внимание на такую проблему, как топологические дефекты в метаматериалах. Исследованию топологических дефектов посвящены работы Меуссен (Meeussen) и др., где рассматриваются струк-

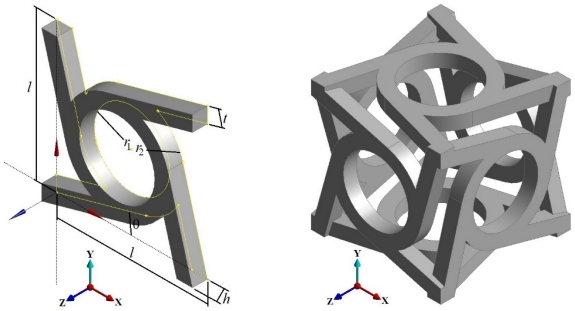
туры в двухмерном случае [5; 6]. В отличие от них, настоящая работа посвящена исследованию топологических дефектов в трехмерном образце из метаматериала. Если удается выявить преимущества топологических дефектов, они могут активно использоваться при создании метаматериалов на основе интеллектуальной тетрахиральной структуры. Под интеллектуальной структурой понимается такая структура, свойствами которой можно управлять, достигая необходимые механические свойства.

Целью настоящей работы является исследование механического поведения образцов из метаматериала с интеллектуальной тетрахиральной структурой. Будет численно исследоваться механический отклик при квазистатическом одноосном нагружении образцов из метаматериала с тетрахиральной структурой, построенных разными способами соединения элементарных ячеек, приводящим к присутствию или отсутствию топологических дефектов.

1. Геометрическая модель

1.1. Тетрахиральная структура

Рассмотрим эскиз тетрахиральной структуры, представленный на рис. 1. Простой хиральный элемент состоит из кольца и прилегающих к нему по касательной связок (ребер). Он может иметь несколько связок и называться в соответствии с их количеством. К примеру, тетрахиральный элемент имеет четыре связки (рис. 1, *a*). Геометрия структуры вписана в квадрат со стороной *l*.



a *b*

Рис. 1. Построение структуры элементарной ячейки метаматериала: *a* – хиральная структура; *b* – элементарная ячейка

Fig. 1. Schematic of the metamaterial unit cell structure: *a* – the chiral structure; *b* – the unit cell

Как показано на рис. 1, *a*, шесть параметров определяют геометрию тетрахиральной структуры, где l – длина ячейки, t – ширина ребра, h – толщина ребра, $r = \frac{1}{2}(r_2 + r_1)$, r_2 – внешний радиус кольцевого элемента, r_1 – внутренний радиус кольцевого элемента, θ – угол наклона ребра. Толщина ребра элементарной ячейки появляется при экструдировании геометрии эскиза вдоль оси *Z*. Угол θ строится от воображаемой линии, проведенной из вершины ребра к кольцу по касательной. Значения параметров тетрахиральной структуры метаматериала, рассмотренного в данной работе, представлены в табл. 1.

Элементарная ячейка метаматериала обладает кубической формой, гранями которой являются тетрахиральные структуры. Следующий шаг к созданию образца из метаматериала – это соединение элементарных ячеек.

Таблица 1

Параметры тетрахиральной структуры метаматериала

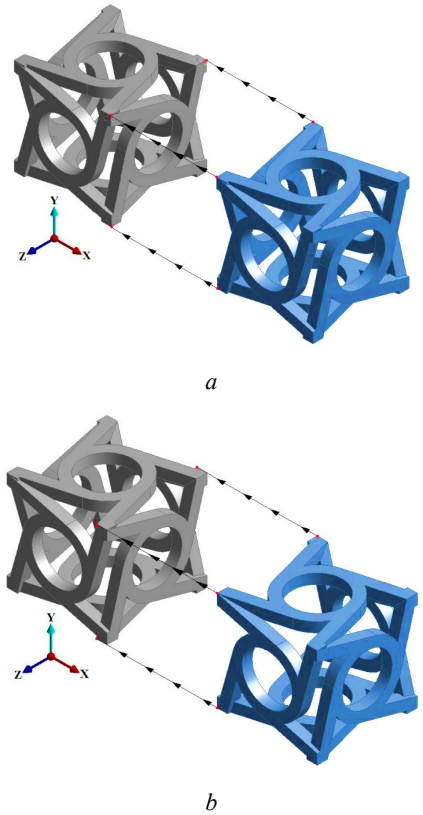
Table 1

Structural parameters of the tetrachiral metamaterial

l, мм	t, мм	h, мм	r_1, мм	r_2, мм
5	5	5	12,5	17,5

1.2. Способы соединения элементарных ячеек в образце

Один из способов соединения элементарных ячеек в образце из метаматериала – adjoining, представляет собой присоединение одной ячейки к другой (рис. 2, *a*).



a

b

Рис. 2. Методы соединения ячеек в трехмерном образце из метаматериала: *a* – «присоединение»; *b* – «внахлест»

Fig. 2. Methods of connecting cells in the sample of the metamaterial: *a* – «adjoining»; *b* – «overlapping»

Видно, что толщина области соединения двух ячеек равна удвоенной толщине ребра. Описанные особенности позволяют полагать, что в конечном образце из ме-

таматериала будут наблюдаться топологические дефекты в виде утолщений внутренних структур. В трехмерном пространственном случае соединяются восемь ячеек.

Второй способ – overlapping, представлен на рис. 2, *б*. Данный способ не приводит к утолщению областей соединения ячеек. Видно, что край первой ячейки также является краем соседней ячейки. Этот метод характеризуется слиянием краев от соседних ячеек в точке соединения. Область соединения ребер из восьми клеток не имеет утолщения, что отмечается в области. Разумно ожидать, что этот метод будет более экономичным, благодаря отсутствию удвоенных краев ячеек. При построении необходимо соблюдать расположение тетрахиральных структур. Это необходимое условие для контролируемого механического поведения и связано с различием лево- и правосторонней хиральности.

2. Математическая модель

Постановка краевой задачи выражается системой уравнений теории упругости для интересующих нас полей перемещений u_i и напряжений σ_{ij} в трехмерной постановке. Система включает уравнения равновесия, соотношения Коши для определения деформаций через перемещения и определяющие соотношения (закон Гука) [34].

Базовый материал считается изотропным и однородным и, следовательно, характеризуется двумя материальными константами. В данной работе для упругих постоянных были приняты следующие значения: $E = 2{,}6$ ГПа – модуль Юнга, $\nu = 0{,}4$ – коэффициент Пуассона. Приятые значения констант соответствуют ABS-пластику. Свойства метаматериалов в большей степени зависят не от значений упругих модулей, а от геометрии макроструктуры метаматериала.

В работе рассмотрена задача одноосного нагружения образца из механического метаматериала вдоль оси *Y*. Для этого на нижней грани образца из метаматериала были наложены условия жесткой заделки, а на верхней грани задавалось перемещение, соответствующее продольному сжатию на 3 %.

Численное моделирование проводилось методом конечных элементов. Элементарную ячейку рассматриваем как систему стержней (балок), которые при расчете методом конечных элементов моделируем как совокупность трехмерных твердотельных элементов. Деформирование образца происходит без контактных взаимодействий составляющих его элементов.

3. Результаты

3.1. Механическое поведение образца из метаматериала

Тетрахиральная структура обладает уникальной конструкционной особенностью – при одноосном нагружении реализуется её скручивание вокруг кольца. В трехмерном случае при одноосном нагружении образец из механического метаматериала за счет своей тетрахиральной структуры и дополнительной вращательной степени свободы скручивается вдоль оси приложения силы, то есть в плоскости, перпендикулярной оси нагружения, наблюдается поворот сечений. В силу этого происходит отклонение узловых точек на величину $\Delta x = \Delta z$. Из имеющихся значений Δx (или Δz) и d – длины основания образца метаматериала, можно определить угол поворота сечения α (рис. 3). Исходя из геометрических соображений, имеют место следующие формулы:

$$\sin\alpha = \frac{2\Delta x}{d};\quad \arcsin(\sin\alpha) = \alpha\,(\text{радиан});$$

$$\alpha\,(\text{радиан})\cdot\frac{180}{\pi} = \alpha\ (^\circ).$$

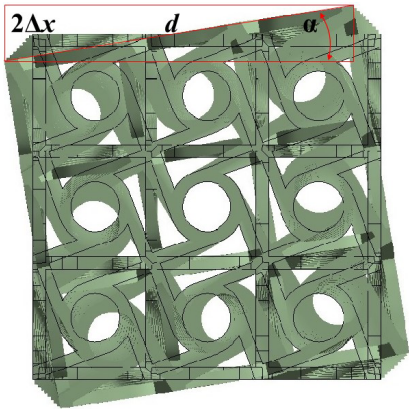


Рис. 3. Определение угла вращения

Fig. 3. Determining the rotation angle

3.2. Угол поворота образца из метаматериала

Рассмотрим образцы из метаматериала, которые образованы соединением 81 кубической элементарной ячейки (9 ячеек вдоль оси *Y* и по 3 ячейки вдоль осей *X* и *Z*) разными способами, о которых шла речь выше.

В случае adjoining было получено значение угла скручивания образца 7.86 °, в то время как образец из метаматериала, полученного методом overlapping, обладал большим углом скручивания, равным 12,84 °. Полученные результаты различаются на 37 %, что является существенной величиной. Результаты численного моделирования также представлены в табл. 2.

3.3. Эффективная плотность метаматериала

По построенным геометрическим моделям образцов и зная плотность базового материала (1080 кг/м^3), можно определить эффективную усредненную плотность образцов, полученных разными методами соединения элементарных ячеек. Для метода adjoining эффективная плотность метаматериала трехмерного образца равна 130 кг/м^3, а для overlapping – 164 кг/м^3, т.е. примерно на 27 % больше для заданных геометри-

ческих параметров образца из метаматериала. Результаты аналитического расчета эффективной плотности также представлены в табл. 2.

3.4. Модуль упругости образца из метаматериала

Ранее в начале раздела было показано, что метод adjoining проявляет скручивание хуже, несмотря на то что эффективная плотность у него меньше. Кроме этих данных интерес представляют также упругие характеристики, поэтому был рассчитан эффективный модуль Юнга для обоих случаев. В случае adjoining было получено значение 6,49 ГПа. В то время как у образца из метаматериала, полученного методом overlapping, наблюдается снижение эффективного упругого модуля до 2,18 ГПа, что почти в 3 раза меньше. Результаты расчетов также представлены в табл. 2.

4. Обсуждение

Все результаты, полученные в данной работе, помещены в табл. 2 для комплексного рассмотрения и ясного различия двух методов получения образца из метаматериала. Сопоставляя характеристики, можно обнаружить интересную особенность – соединение ячеек методом overlapping привело к увеличению эффективной плотности, несмотря на то, что количество базового материала уменьшилось.

По предположениям авторов образец, обладающий большей эффективной плотностью, должен был скручиваться на меньший угол поворота, но результат оказался обратным. Утолщение внутренних структур в образце, полученном методом adjoining, приводит к уменьшению угла скручивания. В образце, полученным методом overlapping, угол скручивания при одноосном нагружении больше, а значение эффективного модуля Юнга меньше, что свидетельствует о более податливом поведении. Данный вывод сформулирован, исходя из определения податливости как свойства материала подвергаться большей деформации (смещению) при приложении нагрузки.

Таблица 2

Различия в характеристиках метаматериала для двух методов соединения ячеек

Table 2

Differences in the metamaterial characteristics for two methods of cell connection

Тип соединения	$\rho_{эфф}$, кг/м^3	α, °	*E*, ГПа
Присоединение	130	7,86	6,49
Внахлест	164	12,84	2,18

Заключение

В данной работе численно рассмотрены два типа соединения элементарных ячеек в метаматериале. Полученные два образца проявили отличное друг от друга механическое поведение. Авторы связывают это с тем, что при соединении ячеек методом adjoining в стержне образуются топологические дефекты в виде удвоенной толщины внутренних структур. Данная специфика приводит к тому, что образцы проявляют различную эффективную плотность. В образце, в котором эффективная плотность больше, наблюдалось более податливое поведение – увеличение эффекта «нажатие – скручивание» и меньший эффективный модуль Юнга.

Из полученных результатов можно заключить, что при изменении внутренней структуры стержня из метаматериала можно достичь запланированное механическое поведение. Это важно в качестве рекомендаций по созданию образцов из метаматериала для натурных испытаний.

Библиографический список

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

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

3. Bhullar S.K., Lala N.L., Ramkrishna S. Smart biomaterials – a review. Review on advanced // Materials Science. – 2015. – Vol. 40. – P. 303–314.

4. 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

5. Topological defects produce exotic mechanics in complex metamaterials / A.S. Meeussen, E.C. Oğuz, Y. Shokef, M. Hecke // Nature Physics. – 2019. – Vol. 16. – P. 307. DOI: 10.1038/s41567-019-0763-6

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

7. 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

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

9. Bryukhanov I.A., Gorodtsov V.A., Lisovenko D.S. Atomistic Modeling of the Mechanical Properties of Chiral Metallic Nanotubes // Physical Mesomechanics. – 2020. – Vol. 23, no. 6. – P. 477–486. DOI: 10.1134/S102995992006003X

10. Mechanical metamaterials and their engineering applications / J.U. Surjadi, L. Gao, H. Du, X. Li, X. Xiong, N.X. Fang,

Y. Lu // Advanced Engineering Materials. – 2019. – Vol. 21, no. 1800864. DOI: 10.1002/adem.201800864

11. Cho H., Seo D., Kim D.N. Mechanics of Auxetic Materials. In: Hsueh CH. et al. (eds) Handbook of Mechanics of Materials. – Springer, Singapore, 2018. DOI: 10.1007/978-981-10-6855-3_25-1

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

13. Ha C.S., Plesha M.E., Lakes R.S. Chiral three-dimensional lattices with tunable Poisson's ratio // Smart Materials and Structures. – 2016. – Vol. 25, no. 5. – P. 054005. DOI: 10.1088/0964-1726/25/5/054005

14. Fu M., Zheng B., Li W. A novel chiral three-dimensional material with negative Poisson's ratio and the equivalent elastic parameters // Composite Structures. – 2017. – Vol. 176. – P. 442-448. DOI: 10.1016/J.COMPSTRUCT.2017.05.027

15. Fu M., Liu F., Hu L. A novel category of 3D chiral material with negative Poisson's ratio // Composites Science and Technology. – 2018. – Vol. 160. – P. 111–118. DOI: 10.1016/J.COMPSCITECH.2018.03.017

16. 3D cellular metamaterials with planar anti-chiral topology / H. Ebrahimi, D. Mousanezhad, H. Nayeb-Hashemi, J. Norato, A. Vaziri // Materials and Design. – 2018. – Vol. 145. – P. 226–231. DOI: 10.1016/J.MATDES.2018.02.052

17. A novel design method for 3D positive and negative Poisson's ratio material based on tension-twist coupling effects / S. Duan, L. Xi, W. Wen, D. Fang // Composite Structures. – 2020. – Vol. 236, no. 111899. DOI: 10.1016/j.compstruct.2020.111899

18. Sabouni-Zawadzka A.A., Gilewski W. Smart Metamaterial Based on the Simplex Tensegrity Pattern // Materials. – 2018. – Vol. 11, no. 5. – P. 673. DOI: 10.3390/ma11050673

19. Jiang Y., Li Y. Novel 3D-Printed Hybrid Auxetic Mechanical Metamaterial with Chirality-Induced Sequential Cell Opening Mechanisms // Advanced Engineering Materials. – 2017. – No. 1700744. DOI: 10.1002/adem.201700744

20. Zhong R., Zheng B., Fu M. A Novel Strategy for Constructing 3D Dislocated Chiral Metamaterial with Negative Poisson's Ratio // Advanced Engineering Materials. – 2021. – Vol. 23, no. 3. – P. 2000991. DOI: 10.1002/adem.202000991

21. Sang S., Wang Z. A design of elastic metamaterials with multi-negative pass bands // Acta Mechanica. – 2018. – Vol. 229. – P. 2647–2655. DOI: 10.1007/s00707-018-2128-0

22. Mizzi L., Spaggiari A. Novel chiral honeycombs based on octahedral and dodecahedral Euclidean polygonal tessellations // International Journal of Solids and Structures. – 2022. – Vol. 238. – P. 111428. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2022.111428

23. A novel metamaterial with tension-torsion coupling effect / B.-B. Zheng, R.-Ch. Zhong, X. Chen, M.-H. Fu, L.-L. Hu // Materials and Design. – 2019. – Vol. 171. – P. 107700. DOI: 10.1016/j.matdes.2019.107700

24. A novel three-dimensional mechanical metamaterial with compression torsion properties / R. Zhong, M. Fu, X. Chen, B. Zheng, L. Hu // Composite Structures. – 2019. – Vol. 226. – P. 111232. DOI: 10.1016/j.compstruct.2019.111232

25. Tailoring the characteristic length scale of 3D chiral mechanical metamaterials / P. Ziemke, T. Frenzel, M. Wegener, P. Gumbsch // Extreme Mechanics Letters. – 2019. – Vol. 32. – P. 100553. DOI: 10.1016/j.eml.2019.100553

26. Analysis of wave band gaps in mechanical metamaterial based on Nelder–Mead method Engineering / J. Dong, W. Chen, Z. Zeng, Q.-H. Qin, Y. Xiao // Analysis with Boundary Elements. – 2019. – Vol. 103. – P. 109–115. DOI: 10.1016/j.enganabound.2019.03.011

27. Chen W., Huang X. Topological design of 3D chiral metamaterials based on couple-stress homogenization // Journal of the Mechanics and Physics of Solids. – 2019. – Vol. 131. – P. 372–386. DOI: 10.1016/j.jmps.2019.07.014

28. Fu M.-H., Zheng B.-B., Li W.-H. A novel chiral three-dimensional material with negative Poisson’s ratio and the equivalent elastic parameters // Composite Structures. – 2017. – Vol. 176. – P. 442–448. DOI: 10.1016/j.compstruct.2017.05.027

29. Novel mechanical behaviors of DNA-inspired helical structures with chirality / B. Zheng, Y. Liu, J. Liu, S. Yin, J. Xu // International Journal of Mechanical Sciences. – 2019. – Vol. 161–162. – P. 105025. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2019.105025

30. 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

31. Wang L., Liu H.-T. 3D-compression–torsion cubic mechanical metamaterial with double inclined rods // Extreme Mechanics Letters. – 2020. – Vol. 37. – P. 100706. DOI: 10.1016/j.eml.2020.100706

32. Wang L., An M.-R., Liu H.-T. Compression spin bio-inspired arm: A conceptual model based on compression–torsion cubic mechanical metamaterials with variable cross-section // Extreme Mechanics Letters. – 2020. – Vol. 41. – P. 101069. DOI: 10.1016/j.eml.2020.101069

33. 3D cellular metamaterials with planar anti-chiral topology / H. Ebrahimi, D. Mousanezhad, H. Nayeb-Hashemi, J. Norato, A. Vaziri // Materials and Design. – 2018. – Vol. 145. – P. 226–231. DOI: 10.1016/j.matdes.2018.02.052

34. Тимошенко С.П., Гудьер Дж. Теория упругости: пер. с англ. / под ред. Г.С. Шапиро. – М.: Наука, 1979. – 560 с.

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. – PP. 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. Bhullar S.K., Lala N.L., Ramkrishna S. Smart biomaterials - a review. Review on advanced // Materials Science. – 2015. – Vol. 40. – PP. 303–314.

4. 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. – PP. 265-273. doi: 10.1615/NanoSciTechnolIntJ.2020033737

5. Meeussen A.S., Oğuz E.C., Shokef Y., Hecke M., Topological defects produce exotic mechanics in complex metamaterials // Nature Physics. – 2019. – Vol. 16. – P. 307. doi: 10.1038/s41567-019-0763-6

6. 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

7. 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 – PP. 247-253. doi: 10.1016/j.prostr.2021.12.071

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

9. Bryukhanov I.A., Gorodtsov V.A., Lisovenko D.S. Atomistic Modeling of the Mechanical Properties of Chiral Metallic Nanotubes // Physical Mesomechanics. – 2020. – Vol. 23. – No. 6. – PP. 477–486. doi: 10.1134/S102995992006003X

10. Surjadi J.U., Gao L., Du H., Li X., Xiong X., Fang N.X., Lu Y. Mechanical metamaterials and their engineering applications // Advanced Engineering Materials. – 2019. – Vol. 21. – No. 1800864. doi: 10.1002/adem.201800864

11. Cho H., Seo D., Kim D.N. Mechanics of Auxetic Materials. In: Hsueh CH. et al. (eds) Handbook of Mechanics of Materials. Springer, Singapore. – 2018. doi: 10.1007/978-981-10-6855-3_25-1

12. 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

13. Ha C.S., Plesha M.E., Lakes R.S. Chiral three-dimensional lattices with tunable Poisson's ratio // Smart Materials and Structures. – 2016. – Vol. 25. – No. 5. – P. 054005. doi: 10.1088/0964-1726/25/5/054005

14. Fu M., Zheng B., Li W. A novel chiral three-dimensional material with negative Poisson's ratio and the equivalent elastic parameters // Composite Structures. – 2017. – Vol. 176. – PP. 442-448. doi: 10.1016/J.COMPSTRUCT.2017.05.027

15. Fu M., Liu F., Hu L. A novel category of 3D chiral material with negative Poisson's ratio // Composites Science and Technology. – 2018. – Vol. 160. – PP. 111-118. doi: 10.1016/J.COMPSCITECH.2018.03.017

16. Ebrahimi H., Mousanezhad D., Nayeb-Hashemi H., Norato J., Vaziri A. 3D cellular metamaterials with planar anti-chiral topology // Materials and Design. – 2018. – Vol. 145. – PP. 226-231. doi: 10.1016/J.MATDES.2018.02.052

17. Duan S., Xi L., Wen W., Fang D. A novel design method for 3D positive and negative Poisson's ratio material based on tension-twist coupling effects // Composite Structures. – 2020. – Vol. 236. – No. 111899. doi: 10.1016/j.compstruct.2020.111899

18. Sabouni-Zawadzka A.A., Gilewski W. Smart Metamaterial Based on the Simplex Tensegrity Pattern // Materials. – 2018. – Vol. 11. – No. 5. – P. 673. doi: 10.3390/ma11050673

19. Jiang Y., Li Y. Novel 3D-Printed Hybrid Auxetic Mechanical Metamaterial with Chirality-Induced Sequential Cell Opening Mechanisms // Advanced Engineering Materials. – 2017. – No. 1700744. doi: 10.1002/adem.201700744

20. Zhong R., Zheng B., Fu M. A Novel Strategy for Constructing 3D Dislocated Chiral Metamaterial with Negative Poisson's Ratio // Advanced Engineering Materials. – 2021. – Vol. 23. – No. 3. – P. 2000991. doi: 10.1002/adem.202000991

21. Sang S., Wang Z. A design of elastic metamaterials with multi-negative pass bands // Acta Mechanica. – 2018. – Vol. 229. – PP. 2647–2655. doi: 10.1007/s00707-018-2128-0

22. Mizzi L., Spaggiari A. Novel chiral honeycombs based on octahedral and dodecahedral Euclidean polygonal tessellations // International Journal of Solids and Structures. – 2022. – 238. P. 111428. doi: 10.1016/j.ijsolstr.2022.111428

23. Zheng B.-B., Zhong R.-Ch., Chen X., Fu M.-H., Hu L.-L. A novel metamaterial with tension-torsion coupling effect // Materials and Design. – 2019. – Vol. 171. – P. 107700. doi: 10.1016/j.matdes.2019.107700

24. Zhong R., Fu M., Chen X., Zheng B., Hu L. A novel three-dimensional mechanical metamaterial with compression torsion properties // Composite Structures. – 2019. – Vol. 226. – P. 111232. doi: 10.1016/j.compstruct.2019.111232.

25. Ziemke P., Frenzel T., Wegener M., Gumbsch P. Tailoring the characteristic length scale of 3D chiral mechanical metamaterials. Extreme Mechanics Letters. – 2019. – Vol. 32. – P. 100553. doi: 10.1016/j.eml.2019.100553

26. Dong J., Chen W., Zeng Z., Qin Q.-H., Xiao Y. Analysis of wave band gaps in mechanical metamaterial based on Nelder–Mead method Engineering // Analysis with Boundary Elements. – 2019. – Vol. 103. – PP. 109-115. doi: 10.1016/j.enganabound.2019.03.011

27. Chen W., Huang X. Topological design of 3D chiral metamaterials based on couple-stress homogenization // Journal of the Mechanics and Physics of Solids. – 2019. – Vol. 131. – PP. 372–386. doi: 10.1016/j.jmps.2019.07.014

28. Fu M.-H., Zheng B.-B., Li W.-H. A novel chiral three-dimensional material with negative Poisson's ratio and the equivalent elastic parameters // Composite Structures. – 2017. – Vol. 176. – PP. 442–448. doi: 10.1016/j.compstruct.2017.05.027

29. Zheng B., Liu Y., Liu J., Yin S., Xu J. Novel mechanical behaviors of DNA-inspired helical structures with chirality // International Journal of Mechanical Sciences. – 2019. – Vol. 161–162. – P. 105025. doi: 10.1016/j.ijmecsci.2019.105025

30. 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

31. Wang L., Liu H.-T. 3D compression–torsion cubic mechanical metamaterial with double inclined rods // Extreme Mechanics Letters. – 2020. – Vol. 37. – P. 100706. doi: 10.1016/j.eml.2020.100706

32. Wang L., An M.-R., Liu H.-T. Compression spin bio-inspired arm: A conceptual model based on compression–torsion cubic mechanical metamaterials with variable cross-section // Extreme Mechanics Letters. – 2020. – Vol. 41. – P. 101069. doi: 10.1016/j.eml.2020.101069

33. Ebrahimi H., Mousanezhad D., Nayeb-Hashemi H., Norato J., Vaziri A. 3D cellular metamaterials with planar anti-chiral topology // Materials and Design. – 2018. – Vol. 145. – PP. 226–231. doi: 10.1016/j.matdes.2018.02.052

34. Timoshenko S., Goodier N. Theory of Elasticity. Engineering Society Monograph. McGraw-Hill Book Company, Inc. 1951.

Финансирование. Исследование выполнено при поддержке Программы развития Томского государственного университета («Приоритет-2030»).
Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
Вклад авторов равноценен.

Financing. This study was supported by the Tomsk State University Development Programme (Priority-2030).
Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.
The contribution of the authors is equivalent.