

МЕХАНИКА

MECHANICS

Научная статья

УДК 539.3+514.851

doi: 10.17223/19988621/89/4

Исследование механизмов деформации двумерного метаматериала

**Линар Ришатович Ахметшин¹, Кристина Владимировна Иохим²,
Екатерина Александровна Казанцева³, Игорь Юрьевич Смолин⁴**

^{1, 2, 3, 4} Томский государственный университет, Томск, Россия

^{1, 2, 3, 4} Институт физики прочности и материаловедения

Сибирского отделения РАН, Томск, Россия

¹ akhmetshin.lr@gmail.com

² iokhim.k@mail.ru

³ kazantseva.ea@ispms.ru

⁴ smolin@ispms.ru

Аннотация. Численно исследуются двумерный тетрахиральный метаматериал и влияние его структуры на механическое поведение. Изучено влияние изменения параметров хиральной структуры образца на его деформацию, напряжения и эффективные упругие свойства. Показано, что уменьшение объема базового материала в образце влечет уменьшение эффективного модуля Юнга. Выявлены параметры структуры метаматериала, обеспечивающие ауксетические свойства. Наибольшее значение интегральной деформации, оцениваемой по отклонению образца из метаматериала от его исходного положения, замечено при рациональном соотношении длин элементов структуры.

Ключевые слова: численное моделирование, метод конечных элементов, соотношение структура–свойства, хиральная структура, одноосная деформация, механический метаматериал

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-00402, <https://rscf.ru/project/23-29-00402/>

Для цитирования: Ахметшин Л.Р., Иохим К., Казанцева Е.А., Смолин И.Ю. Исследование механизмов деформации двумерного метаматериала // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2024. № 89. С. 51–65. doi: 10.17223/19988621/89/4

A study of deformation mechanisms for a two-dimensional metamaterial

Linar R. Akhmetshin¹, Kristina V. Iokhim²,
Ekaterina A. Kazantseva³, Igor' Yu. Smolin⁴

^{1, 2, 3, 4} Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation

^{1, 2, 3, 4} Institute of Strength Physics and Materials Science of Siberian Branch
of Russian Academy of Sciences, Tomsk, Russian Federation

¹ akhmetshin.lr@gmail.com

² iokhim.k@mail.ru

³ kazantseva.ea@ispms.ru

⁴ smolin@ispms.ru

Abstract. This paper presents a numerical study of a two-dimensional tetrachiral metamaterial and the effect of unit cell parameters on its mechanical behavior. Finite element simulations are performed using independently varied geometric parameters of the chiral unit cell. Chiral structures can induce the compression–torsion effect and the deflection in mechanical metamaterials. The sample deflection is affected by the following factors: ring deformation, ligament deformation, and structure twisting. The highest strain estimated by the deflection of the metamaterial sample from the initial position is observed at an optimal ratio of ligament length to ring size. The effect of structural parameters on the deformation, stress distribution, and effective elastic properties of a two-dimensional metamaterial sample under uniaxial compression is studied and analyzed. For all variable parameters, a qualitatively similar nature of the equivalent stress distribution is revealed. It is found that a decrease in the volume of the main material in the metamaterial sample entails a decrease in effective Young's modulus. The parameters accounting for the auxetic properties of the metamaterial are obtained. Effective Poisson's ratio is determined in the range from –0.1 to 0.95.

Keywords: numerical simulation, finite element method, structure–property relationship, chiral structure, uniaxial deformation, mechanical metamaterial

Acknowledgements: This study was financially supported by the Russian Science Foundation (project No. 23-29-00402), <https://rscf.ru/en/project/23-29-00402/>

For citation: Akhmetshin, L.R., Iokhim, K.V., Kazantseva, E.A., Smolin, I.Yu. (2024) 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*. 89. pp. 51–65. doi: 10.17223/19988621/89/4

Введение

Механические метаматериалы представляют собой упорядоченные мелко-масштабные архитектуры из обычных материалов, подстраивая структуру которых можно добиться достижения ими требуемых механических или физических характеристик [1]. В настоящее время метаматериалы активно разрабатываются, исследуются и уже продемонстрировали потенциал для широкого спектра применений, в частности для теплоизоляции, электродов аккумуляторов, носителей

катализаторов и гашения акустической, вибрационной или ударной энергии [2]. Вызывает интерес их применение для преобразования или демпфирования механических волн. В метаматериалах энергия может быть сконцентрирована в элементах структуры и эффективно поглощена [3]. Усовершенствованные производственные процессы сделали эти уникальные композитные материалы более доступными и жизнеспособными для других отраслей промышленности.

Среди прочих видов метаматериалов более эффективными являются ячеистые структуры благодаря хорошей комбинации удельных характеристик [4]. Персонализированная трехмерная печать образцов позволяет создавать подобные структуры, которые практически не производятся традиционными методами [5]. Готовые образцы могли бы использоваться в качестве защитных конструкций, как того требует модернизация традиционных материалов [6]. Ячеистые твердые тела широко используются в различных инженерных приложениях [7]. Среди них преобладают структуры в форме пчелиных сот [8], так как они обладают рядом преимуществ, среди которых можно выделить синкластическую кривизну и отрицательное значение эффективного коэффициента Пуассона. По сообщениям авторов [9–11], подобными нетривиальными свойствами обладают хиральные структуры. Хотя до сих пор можно найти учебники, в которых категорически утверждается, что коэффициент Пуассона не может принимать отрицательные значения, на самом деле существует ряд примеров твердых тел, особенно анизотропных, с отрицательным коэффициентом Пуассона [12, 13].

Заметим, что хиральность в геометрии может не только наделять механические метаструктуры отрицательным коэффициентом Пуассона, но также приводить к эффекту «нагружение–скручивание» [14–17]. Это свойство может также быть использовано в практических приложениях изделий из метаматериалов.

Механическое поведение трехмерных метаматериалов зависит от их структуры [18], которая часто состоит из элементов, построенных на плоскости. Однако исследований, посвященных детальному изучению двумерных метаматериалов, мало. В данной работе пристальное внимание обращено на плоский тетрахира́льный метаматериал и проведено его комплексное исследование. Детальное исследование особенности структурной организации механических метаматериалов на мезоуровне (масштабном уровне элементарной ячейки структуры) позволяет нам определить эффективные упругие свойства метаматериала на макроуровне в результате процедуры численного усреднения.

Количество связей в хиральной структуре будет определять ее название: к примеру, четыре связи – это тетрахира́льная структура. В работе выбрана именно такая структура, потому что она реализует наперед заданное механическое поведение. Степень проявления отклика зависит от параметров тетрахира́льной структуры. Именно этот вопрос рассматривается в представленной работе.

Статья имеет следующую структуру. Вначале мы приводим описание геометрических особенностей плоских образцов с различными характерными размерами элементов тетрахира́льной структуры. Потом рассматриваем механизмы формоизменения тетрахира́льной структуры при одноосном нагружении образцов с помощью моделирования методом конечных элементов и рассчитываем эффективные характеристики двумерных метаматериалов, такие как модуль Юнга и коэффициент Пуассона. Завершает статью анализ полученных результатов.

Особенности математического моделирования

Геометрическая модель тетрахиральной структуры

Рассмотрим двумерный (планарный) тетрахиральный механический метаматериал, представленный на рис. 1. Элементарная (единичная) ячейка хиральной структуры состоит из кольца и прилегающих к нему по касательной связей. Она может иметь несколько связей и называться в соответствии с их количеством. Структура с четырьмя связками, которая исследуется в данной работе, называется тетрахиральной (см. рис. 1). Исходные геометрические параметры принимали значения: $L_1 = 50$ мм – размер элементарной ячейки, $r_1 = 12.5$ мм – внутренний радиус кольца, $r_2 = 17.5$ мм – внешний радиус кольца, $t = 5$ мм – толщина связки, $h = 5$ мм – ширина связки. Последний параметр характеризует не двумерную тетрахиральную структуру, а толщину пластины из двумерного тетрахирального метаматериала. Его введение обусловлено тем, что моделирование механического поведения двумерных структур предполагается в полноразмерной трехмерной постановке.

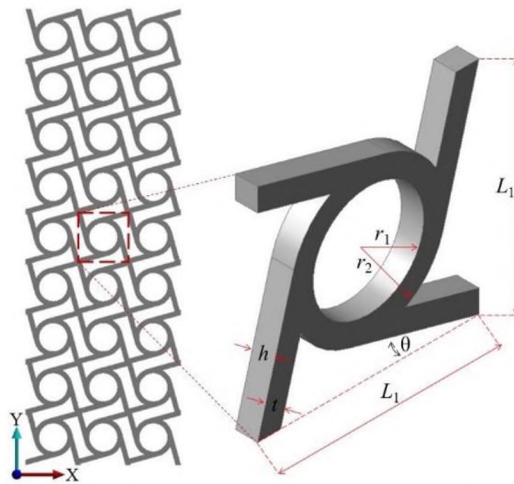


Рис. 1. Геометрическая модель: структура образца из тетрахирального метаматериала и элементарная ячейка

Fig. 1. Geometric model: a structure of the tetrachiral metamaterial sample and a unit cell

Варьируя исходные геометрические параметры тетрахиральной структуры, мы получаем разные варианты метаматериала. Заметим, что эти параметры можно выбирать либо независимо друг от друга, либо с учетом влияния на остальные характеристики элементарной ячейки. В данном исследовании рассматривается первый способ варьирования параметров: например, при изменении ширины связки толщина и другие параметры оставались исходными. Таким же образом варьировали и другие параметры, за исключением параметра r_2 , для которого принималось условие $r_2 - r_1 = 5$ мм. Это было сделано для того, чтобы исследовать влияние не толщины кольца (что обеспечило изменение r_1), а среднего радиуса кольца. Также если принять в качестве необходимого условия соединение

ребра с кольцом по касательной, то появится геометрическая связь между средним радиусом кольцевого элемента, длиной ребра и углом наклона ребра θ .

Математическая постановка численного эксперимента

Чтобы не ограничиваться идеальными структурами, геометрическая модель образца двумерного метаматериала строится как трехмерный объект. И задача описания его механического поведения рассматривается как трехмерная.

Для интересующих нас полей перемещений u_i и напряжений σ_{ij} ставится краевая задача, определяемая системой уравнений теории упругости. Система включает уравнения равновесия, соотношения Коши и закон Гука в качестве определяющих соотношений:

$$\nabla_j \cdot \sigma_{ij} = 0, \quad (1)$$

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

$$\sigma_{ij} = \lambda \cdot \delta_{ij} \varepsilon_{kk} + 2 \cdot \mu \cdot \varepsilon_{ij}, \quad (3)$$

где σ_{ij} – компоненты тензора напряжений, ε_{ij} – компоненты тензора деформаций, x_i – пространственные координаты, u_i – компоненты вектора перемещений,

$\lambda = \frac{\nu \cdot E}{(1 + \nu) \cdot (1 - 2 \cdot \nu)}$, $\mu = \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)}$, μ – коэффициенты Ламе, связанные с модулем Юнга (E) и коэффициентом Пуассона (ν), δ_{ij} – символ Кронекера, $i, j = 1, 2, 3$.

В работе рассмотрена задача одноосного сжатия образца из механического метаматериала. Граничные условия для такой задачи имеют следующий вид:

$u_i = 0$ для $x_i \in S_1$, $u_2 = -0.03L$ и $\sigma_{12} = \sigma_{23} = 0$ для $x_i \in S_2$, $\sigma_{ij}n_j = 0$ для $x_i \in S_3$, $i, j = 1, 2, 3$, где S_1 – нижняя грань (жесткая заделка), S_2 – верхняя грань (перемещение по оси Y , соответствующее деформации в 3%), S_3 – оставшиеся грани образца (свободные граничные условия), $L = 410$ мм – начальная длина образца вдоль оси Y , n_j – компоненты вектора нормали к поверхности S_3 .

Численное моделирование проводилось методом конечных элементов. Образец из метаматериала при расчете методом конечных элементов моделируется, как совокупность трехмерных твердотельных элементов. Деформирование образца происходит без контактных взаимодействий составляющих его элементов.

В данной работе для упругих постоянных были приняты следующие значения: $E = 2.6$ ГПа, $\nu = 0.4$. Эти значения упругих констант соответствуют ABS-пластику. Заметим, что деформационное поведение метаматериалов в большей степени зависит не от значений упругих модулей, а от геометрии макроструктуры метаматериала.

Результаты и обсуждение

Нетривиальный отклик – скручивание структуры

Тетрахиральная структура обладает уникальной конструкционной особенностью – наличием кольца со связками, что позволяет ей скручиваться при одноосном нагружении. Коллективное скручивание колец приводит к тому, что образец

начинает отклоняться от исходного положения (рис. 2, *a*). Отклонения происходят как по оси X , так и по оси Y .

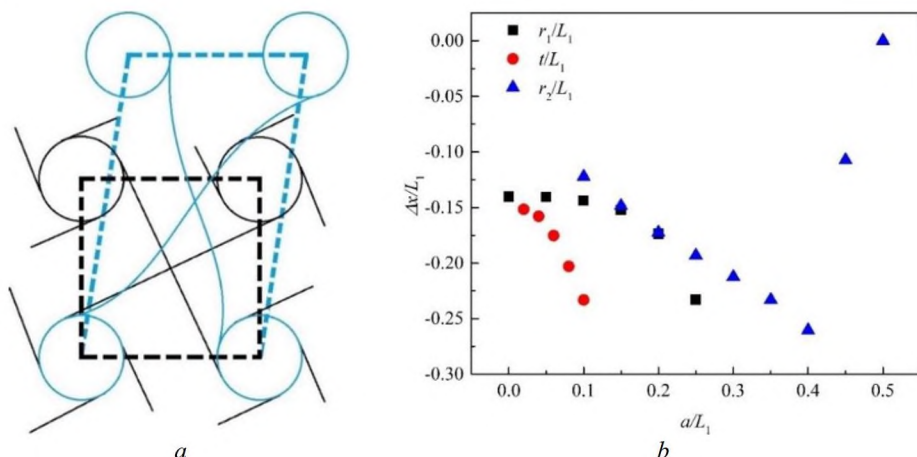


Рис. 2. Схема деформирования структуры (*a*) и зависимости отклонения образца из двумерного метаматериала от переменных параметров хиральной структуры (*b*)

Fig. 2. (a) Scheme of the structure deformation and (b) dependences of the deflection on the variable parameters of the chiral structure for a two-dimensional metamaterial sample

Моделирование деформирования образцов проводилось при изменении параметров структуры. Результат влияния переменных параметров на значение отклонения двумерного метаматериала представлен на рис. 2, *b*. Рассмотрим влияние каждого из параметров на механический отклик метаматериала подробнее. Эти параметры и само значение отклонения приводятся в безразмерном виде, как отношение переменного параметра к размеру одной элементарной ячейки.

Значения внутреннего радиуса кольца r_1 уменьшались от исходного значения 12.5 до 0 мм с равным шагом 2.5 мм (см. рис. 2, *b*, квадратные маркеры). Заметим, что при уменьшении внутреннего радиуса кольца хиральной структуры увеличивается объем базового материала. Из рис. 2, *b* видно, что при уменьшении внутреннего радиуса в этом диапазоне отклонение образца уменьшается практически в два раза. Когда $r_1 = 0$ мм, в тетрахиальной структуре вместо кольца появляется диск, который увеличивает жесткость структуры, что приводит к уменьшению отклонения образца.

При изменении толщины связки t тетрахиальной структуры от 5 до 1 мм с шагом 1 мм поведение аналогично предыдущему (см. рис. 2, *b*, круглые маркеры). Уменьшение толщины связки приводит к уменьшению отклонения образца. Это связано с уменьшением объема базового материала в образце.

Внешний радиус кольца r_2 изменялся от максимального до минимального значения, т.е. от 25 до 5 мм (см. рис. 2, *b*, треугольные маркеры). График разделен на две части по промежуткам 25–20 мм и 20–5 мм. В первом случае (промежутке) нарушается тетрахиальная структура, это вызвано срастанием смежных ячеек и кольца с прилегающими связками. Очевидно, что когда кольцо соразмерно элементарной ячейке ($r_2 = 25$ мм), отклонение не будет реализовываться. Во втором случае (промежутке) нарушения тетрахиальной структуры нет и коль-

цо с радиусом 20 мм позволяет образцу отклониться на максимальное значение. Дальнейшее уменьшение внешнего радиуса уменьшает отклонение образца. Из этого становится ясно, что отклонение образца достигает максимального значения, когда связки имеют длину, соразмерную радиусу кольца.

Из полученных результатов следует, что в отклонении образца участвуют следующие факторы:

- 1) деформирование кольца – $r_1 = 16.5$ мм; $r_2 = 17.5$ мм; $t = h = 5$ мм (рис. 3, а);
- 2) деформирование связки – $r_2 = 17.5$ мм; $r_1 = 12.5$ мм; $t = 1$ мм, $h = 5$ мм (рис. 3, б);
- 3) скручивание структуры – конструкционный фактор и, вероятно, зависит от параметра r_2 .

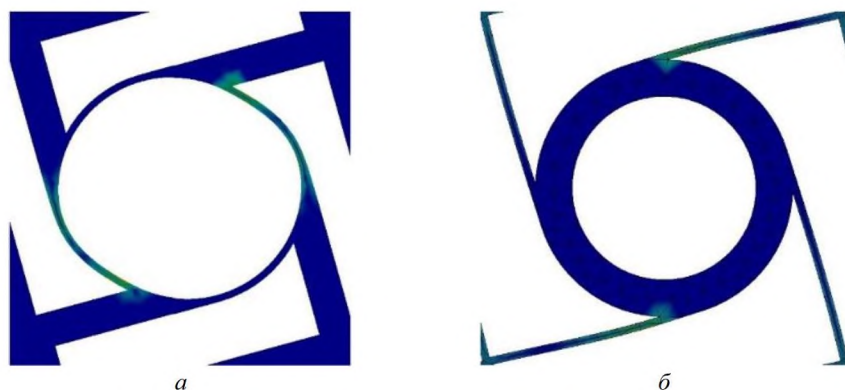


Рис. 3. Деформирование одной из элементарных ячеек при сжатии образцов из метаматериала с переменными параметрами структуры: $r_1 = 16.5$ мм; $r_2 = 17.5$ мм; $t = h = 5$ мм (а); $r_2 = 17.5$ мм; $r_1 = 12.5$ мм; $t = 1$ мм; $h = 5$ мм (б)

Fig. 3. Deformation of a unit cell during compression of metamaterial samples with variable parameters of the structure: (a) $r_1 = 16.5$ мм; $r_2 = 17.5$ мм; $t = h = 5$ мм and (b) $r_2 = 17.5$ мм; $r_1 = 12.5$ мм; $t = 1$ мм; $h = 5$ мм

Распределение эквивалентных напряжений

Рассмотрим, как влияет изменение изучаемых параметров на распределения напряжений на примере внутреннего радиуса кольца (рис. 4). Очевидно, что метаматериал деформируется неравномерно, что отражается в распределении напряжений. Наибольшие значения эквивалентных напряжений наблюдаются в связках, а также в областях соединения кольца со связками. Если рассматривать структуру с исходными значениями параметров, то максимальные эквивалентные напряжения в 50 МПа можно обнаружить на внешней стороне связок ближе к кольцу. Это связано с тем, что при сжатии и скручивании элементов хиральной структуры связки испытывают неравномерный изгиб. На внутренней стороне связок ближе к кольцу значение максимальных напряжений в полтора раза меньше. На оставшихся двух связках эквивалентные напряжения на аналогичных участках меньше на 40% с внешней стороны и на 10% с внутренней стороны. Эти максимальные напряжения, в свою очередь, наблюдаются недалеко от зоны соединения элементарных ячеек. То есть симметрия хиральной структуры и вы-

бранное вертикальное направление приложения сжимающей нагрузки на образец приводят к таким противоположным тенденциям в распределениях эквивалентных напряжений в разных связках.

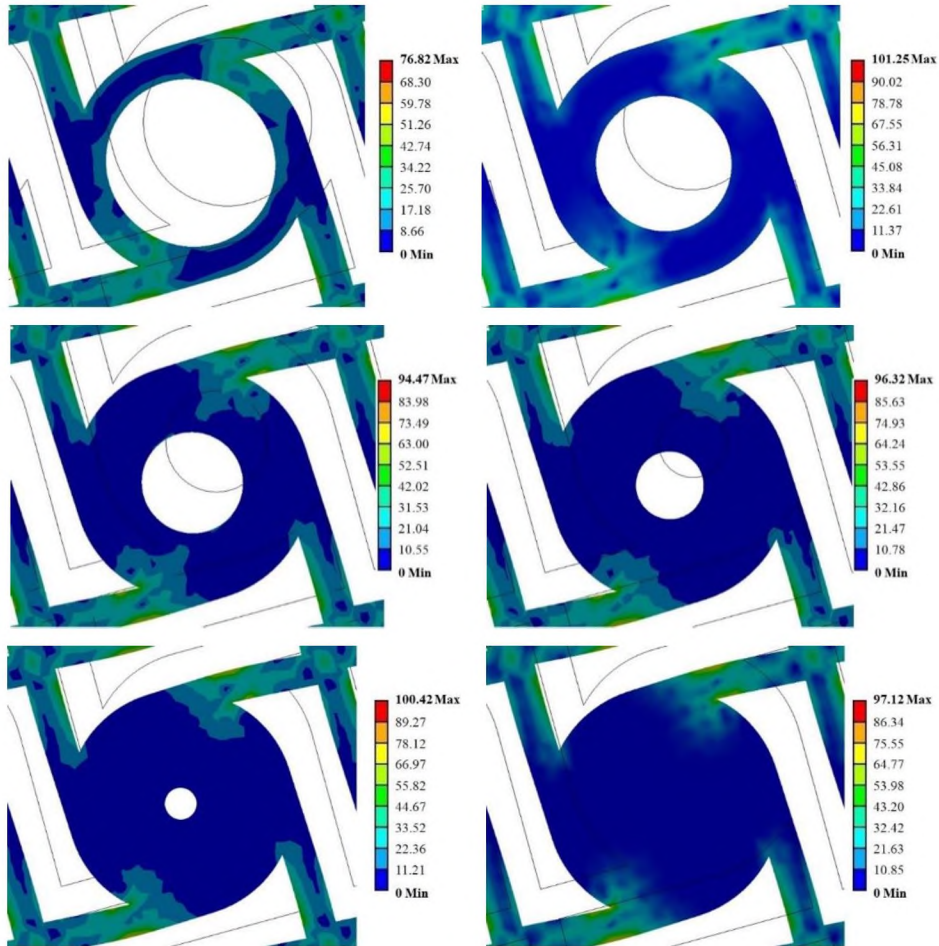


Рис. 4. Распределения эквивалентных напряжений при общей деформации одноосного сжатия образца 3% для разных значений параметра внутреннего радиуса кольца (r_1) хиральной структуры

Fig. 4. Distributions of equivalent stresses at 3% total deformation of the uniaxial sample compression for different inner radii of the ring (r_1) in a chiral structure

Когда разница между внешним и внутренним радиусами кольца невелика, на внутренней части кольца также отмечаются достаточно высокие значения эквивалентных напряжений. Они возникают из-за механического воздействия связок, максимальные значения – 43 МПа. Две другие связки (вертикальные) воздействуют с меньшим усилием, и напряжения на внутренней стороне достигают 18.7 МПа в своем максимуме. При уменьшении r_1 уменьшаются и значения эквивалентных напряжений в аналогичных областях. Стоит также отметить, что при

значениях $r_1 = 12.5, 10, 7.5$ мм наибольшие значения напряжений на внешней стороне кольца обнаруживаются вблизи соединения связок и кольца – области концентрации напряжений.

Для остальных переменных параметров можно отметить качественно похожий характер распределения эквивалентных напряжений, а количественно максимальные значения эквивалентных напряжений имеют меньшие значения.

Эффективный модуль Юнга

При изменении параметров структуры метаматериала изменялась пористость образца, что влечет за собой изменение силовых характеристик образца. Наиболее интересна способность образца сопротивляться одноосной нагрузке, поэтому в качестве такой характеристики рассмотрим модуль Юнга. Поскольку метаматериал можно рассматривать как эффективную среду, то усредненной характеристикой такого псевдоматериала будет эффективный модуль Юнга

$$E_{eff} = \frac{\frac{F}{S}}{\frac{u_2}{L}}$$

где F – силовая реакция закрепленной части образца, S – площадь основания образца, u_2 – смещение верхней части образца, L – длина образца.

Аналогично анализу отклонения образца влияние каждого параметра тетрахиальной структуры на значение эффективного модуля Юнга рассмотрим в отдельности (рис. 5).

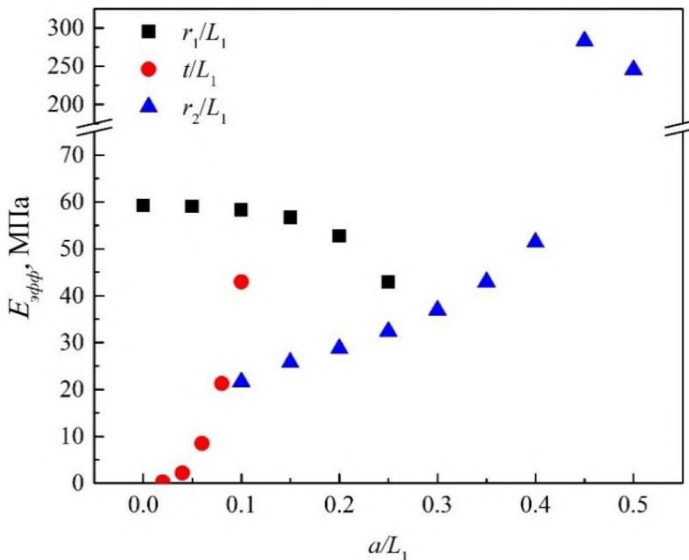


Рис. 5. Зависимости эффективного модуля Юнга двумерного метаматериала от переменных параметров хиральной структуры

Fig. 5. Dependences of effective Young's modulus of a two-dimensional metamaterial on the variable parameters of the chiral structure

При уменьшении внутреннего радиуса происходит увеличение удельного объема базового материала. Следовательно, в этом случае необходимо затратить больше усилий для деформирования образца из метаматериала (см. рис. 5). В исходном образце метаматериала значение реакции опоры было 901.78 Н, это значит, что значение эффективного модуля Юнга будет равно 42.9 МПа. При уменьшении внутреннего радиуса кольца до нуля объем базового материала увеличился на 58%, а значение E_{eff} увеличилось на 38%, до 59.3 МПа (см. рис. 5, квадратные маркеры).

В случае с переменным параметром t видно, что значение эффективного модуля Юнга убывает с уменьшением толщины связки. Минимальное значение эффективного модуля Юнга составляет 0.22 МПа, при $t = 1$. Наибольшее значение достигается при $t = 5$, $E_{eff} = 42.9$ МПа (см. рис. 5, круглые маркеры).

При рассмотрении влияния параметра r_2 было обнаружено, что способность сопротивляться одноосному сжатию существенно возрастает, когда нарушается тетрахиральность структуры. При уменьшении r_2 с 20 по 5 идет линейное уменьшение E_{eff} (рис. 5, треугольные маркеры).

Эффективный коэффициент Пуассона

Для вычисления значения эффективного коэффициента Пуассона при изменении параметров тетрахиальной структуры рассмотрим элементарную ячейку, располагающуюся в центре двумерного образца, т.е. в пятом ряду второго столбца. В этой ячейке были выбраны четыре реперные точки в вершинах элементарной ячейки. Зная координаты и перемещения этих точек, можно рассчитать деформации, по отношению которых можно определить значения эффективного коэффициента Пуассона. В предположении, что первоначальные точки принадлежат квадрату, стороны которого расположены вдоль осей координат, имеем следующие соотношения для разностей координат точек: $y_1 - y_4 = y_2 - y_3 = x_2 - x_1 = x_3 - x_4 = -50$ мм. Для вычисления значения эффективного коэффициента Пуассона используем выражение

$$\nu_{eff} = \frac{\varepsilon_{xx}}{\varepsilon_{yy}} = \frac{\frac{\partial u_x}{\partial x}}{\frac{\partial u_y}{\partial y}} = \frac{-\frac{1}{2} \cdot \left[\frac{(\Delta x_2 - \Delta x_1) \cdot (x_3 - x_4) - (\Delta x_4 - \Delta x_3) \cdot (x_2 - x_1)}{(x_2 - x_1) \cdot (x_3 - x_4)} \right]}{-\frac{1}{2} \cdot \left[\frac{(\Delta y_1 - \Delta y_4) \cdot (y_2 - y_3) - (\Delta y_2 - \Delta y_3) \cdot (y_1 - y_4)}{(y_1 - y_4) \cdot (y_2 - y_3)} \right]} = \frac{-\Delta x_1 + \Delta x_2 + \Delta x_3 - \Delta x_4}{\Delta y_1 + \Delta y_2 - \Delta y_3 - \Delta y_4}.$$

Вычисление значения эффективного коэффициента Пуассона при варьировании параметров хиральной структуры дало результаты, изображенные на рис. 6.

При увеличении объема метаматериала (при уменьшении r_1) в рассматриваемой ячейке уменьшается значение эффективного коэффициента Пуассона, но незначительно, и колеблется в районе нуля (см. рис. 6, квадратные маркеры).

Наиболее интересное влияние на эффективный коэффициент Пуассона оказывает параметр t (см. рис. 6, круглые маркеры). Толстые связки плохо изгибаются, поэтому ауксетического поведения нет, и коэффициент Пуассона имеет положительное значение. С уменьшением толщины связок значение эффективного коэффициента Пуассона уменьшается, достигает нуля и при дальнейшем утонении

связок становится отрицательным, продолжая уменьшаться, т.е. метаматериал проявляет ауксетические свойства. Однако имеется некоторое критическое значение толщины связок, после которого коэффициент Пуассона опять начинает расти. Вероятно, это является следствием того, что связки становятся слишком слабыми для поддержания тетрахиральной структуры.

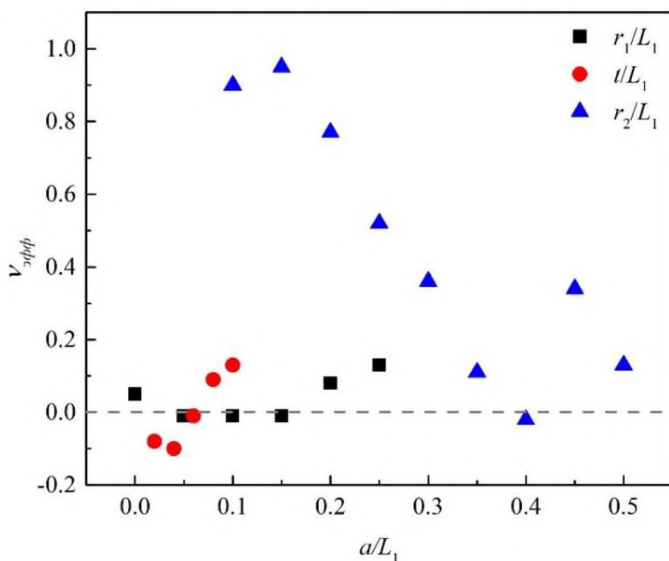


Рис. 6. Зависимости значения эффективного коэффициента Пуассона двумерного метаматериала от переменных параметров хиральной структуры
Fig. 6. Dependences of effective Poisson's ratio of a two-dimensional metamaterial on the variable parameters of the chiral structure

Рассматривая изменение эффективного коэффициента Пуассона в зависимости от параметра r_2 , не стоит брать во внимание значения при 25 и 22.5 мм, так как очевидно, что в этом случае хиральная структура отсутствует, а без скручивания образец ведет себя, как обычный материал, а не метаматериал. Когда структура приобретает способность скручиваться, эффективный коэффициент Пуассона становится отрицательным, хотя и близким к нулю. Дальнейшее изменение приводит к увеличению исследуемой характеристики (см. рис. 6, треугольные маркеры).

Заключение

В результате численного моделирования изучено влияние изменения параметров хиральной структуры двумерного образца метаматериала на его деформацию, напряжения и эффективные упругие свойства. Из полученных результатов в ходе математического моделирования выявлено, что каждый из переменных параметров проявляет различную эффективность, воздействуя на отклик образца из метаматериала. Это свидетельствует о том, что варьированием параметров можно достигнуть требуемого механического поведения метаматериала, а также контролировать его эффективные упругие характеристики. Наибольшее значение отклонения (−13.024 мм) зафиксировано при $r_2 = 20$ мм несмотря на то,

что в данном случае объем базового материала наибольший для всех образцов, реализующих беспрепятственное скручивание структуры. Если провести ранжирование по вкладу в нетривиальный отклик, то можно параметры расположить следующим образом (от большего влияния к меньшему): внешний радиус кольца, внутренний радиус кольца, толщина связи.

В отношении эффективного модуля Юнга образцы подчиняются следующему правилу: при уменьшении объема базового материала необходимо затрачивать меньшие усилия для деформирования и модуль Юнга уменьшается. Наибольшим эффектом обладает параметр t .

Относительно эффективного коэффициента Пуассона стоит отметить, что тетрахиральная структура обладает свойством ауксетичности лишь при некоторых вариациях переменных параметров. При варьировании параметров r_1 и t коэффициент Пуассона имеет значения вблизи нуля. Наибольшее влияние оказывает параметр r_2 , вызывая изменение значения коэффициента Пуассона в диапазоне от -0.04 до 0.95 . Это связано с отношением длины связки к кольцу: чем меньше кольцо, тем больше связка тетрахиральной структуры. Самое большое отрицательное значение коэффициента Пуассона (-0.1) проявила структура с толщиной связок 2 мм.

Указанные закономерности получены при независимом варьировании параметров хиральной структуры. Однако надо иметь в виду, что переменные параметры можно выбирать и с учетом их влияния на остальные характеристики элементарной ячейки, когда заданы определенные ограничения на построение хиральной структуры [19]. Принятие такого условия может оказать влияние на отклик тетрахиральных структур, степень этого влияния необходимо исследовать дополнительно.

Список источников

1. Akhmetshin L.R., Iokhim K., Kazantseva E., Smolin I.Yu. Response evolution of a tetrachiral metamaterial unit cell under architectural transformations // *Symmetry*. 2022. V. 15, is. 1. 14 p. doi: 10.3390/sym15010014
2. Schaedler T., Jacobsen A., Torrents A., Sorensen A., Lian J., Greer J., Valdevit L., Carter W.B. Ultralight metallic microlattices // *Science*. 2011. V. 334 (6058). P. 962–965. doi: 10.1126/science.1211649
3. 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. V. 254. Art. 113717. doi: 10.1016/j.apenergy.2019.113717
4. Cumber S.A., Christensen J., Alù A. Controlling sound with acoustic metamaterials // *Nature Reviews Materials*. 2016. V. 1. Art. 16001. doi: 10.1038/natrevmats.2016.1
5. Колубаев Е.А., Рубцов В.Е., Чумаевский А.В., Астафурова Е.Г. Научные подходы к микро-, мезо- и макроструктурному дизайну объемных металлических и полиметаллических материалов с использованием метода электронно-лучевого аддитивного производства // *Физическая мезомеханика*. 2022. Т. 25, № 4. С. 5–18. doi: 10.55652/1683-805X_2022_25_4_5
6. Зеленугин С.А., Толкачев В.Ф., Тырышкин И.М. Анализ эффективности противоударной стойкости двух групп керамических и композитных материалов // *Вестник Томского государственного университета. Математика и механика*. 2022. № 80. С. 85–96. doi: 10.17223/19988621/80/8
7. Sangsefidi A.R., Kadkhodapour J., Anaraki A.P., Dibajian S.H., Schmauder S. Повышение эффективности сбора энергии приборами на основе метаматериалов // *Физическая мезомеханика*. 2022. Т. 25, № 4. С. 106–121. doi: 10.55652/1683-805X_2022_25_4_106

8. Prall D., Lakes R.S. Properties of a chiral honeycomb with a poisson's ratio of -1 // *International Journal of Mechanical Sciences*. 1997. V. 39 (3). P. 305–314.
9. Eidini M. Zigzag-base folded sheet cellular mechanical metamaterials // *Extreme Mechanics Letters*. 2016. V. 6. P. 96–102. doi: 10.1016/j.eml.2015.12.006
10. Zheng X., Lee H., Weisgraber T.H., Shusteff M., DeOtte J., Duoss E.B., Kuntz J.D., Biener M.M., Ge Q., Jackson J.A., Kucheyev S.O., Fang N.X., Spadaccini C.M. Ultralight, ultrastiff mechanical metamaterials // *Science*. 2014. V. 344. P. 1373–1377. doi: 10.1126/science.1252291
11. Gold V. Compendium of chemical terminology. International Union of Pure and Applied Chemistry, 2014. V. 528.
12. Goldstein R.V., Gorodtsov V.A., Lisovenko D.S., Volkov M.A. Negative Poisson's ratio for cubic crystals and nano/microtubes // *Physical Mesomechanics*. 2014. V. 17 (2). P. 97–115. doi: 10.1134/S102995991402002
13. Goldstein R.V., Gorodtsov V.A., Lisovenko D.S., Volkov M.A. Thin Homogeneous Two-Layered Plates of Cubic Crystals with Different Layer Orientation // *Physical Mesomechanics*. 2019. V. 22 (4). P. 261–268. doi: 10.1134/S1029959919040015
14. Zhong R., Fu M., Chen X., Zheng B., Hu L. A novel three-dimensional mechanical metamaterial with compression-torsion properties // *Composite Structures*. 2019. V. 226. Art. 111232. doi: 10.1016/j.compstruct.2019.111232
15. Zheng B.-B., Zhong R.-C., Chen X., Fu M.-H., Hu L.-L. A novel metamaterial with tension-torsion coupling effect // *Materials & Design*. 2019. V. 171. Art. 107700. doi: 10.1016/j.matdes.2019.107700
16. Frenzel T., Kadic M., Wegener M. Three-dimensional mechanical metamaterials with a twist // *Science*. 2017. V. 358. P. 1072–1074. doi:10.1126/science.aao4640
17. Spadoni A., Ruzzene M. Elasto-static micropolar behavior of a chiral auxetic lattice // *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 2012. V. 60. P. 156–171. doi: 10.1016/j.jmps.2011.09.012
18. Ахметшин Л.Р., Смолин И.Ю. Анализ некоторых методов соединения ячеек в механическом тетрахиальном метаматериале // *Вестник Томского государственного университета. Математика и механика*. 2022. № 77. С. 27–37. doi: 10.17223/19988621/77/3
19. 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. V. 11 (3). P. 265–273. doi: 10.1615/NanoSciTechnolIntJ.2020033737

References

1. Akhmetshin L.R., Iokhim K., Kazantseva E., Smolin I.Yu. (2022) Response evolution of a tetrachiral metamaterial unit cell under architectural transformations. *Symmetry*. 15(1). pp. 1–14. doi: 10.3390/sym15010014
2. Schaedler T., Jacobsen A., Torrents A., Sorensen A., Lian J., Greer J., Valdevit L., Carter W.B. (2011) Ultralight metallic microlattices. *Science*. 334(6058). pp. 962–965. doi: 10.1126/science.1211649
3. Tan T., Yan Zh., Zou H., Ma K., Liu F., Zhao L., Peng Zh., Zhang W. (2019) Renewable energy harvesting and absorbing via multi-scale metamaterial systems for Internet of things. *Applied Energy*. 254. Article 113717. doi: 10.1016/j.apenergy.2019.113717
4. Cummer S. A., Christensen J., Alù A. (2016) Controlling sound with acoustic metamaterials. *Nature Reviews Materials*. 1. Article 16001. doi: 10.1038/natrevmats.2016.1
5. Kolubaev E.A., Rubtsov V.E., Chumakov A.V., Astafurova E.G. (2022) Micro-, meso- and macrostructural design of bulk metallic and polycrystalline materials by wire-feed electron-beam additive manufacturing. *Physical Mesomechanics*. 25. pp. 479–491. doi: 10.1134/S1029959922060017
6. Zelepugin S.A., Tolkachev V.F., Ty'ry'shkin I.M. (2022) Analiz effektivnosti protivoudarnoy stoykosti dvukh grupp keramicheskikh i kompozitnykh materialov [Analysis of the impact resistance efficiency of two groups of ceramic and composite materials]. *Vestnik Tomskogo*

- gosudarstvennogo universiteta. *Matematika i mekhanika – Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*. 80. pp. 85–96. doi: 10.17223/19988621/80/8
7. Sangsefidi A.R., Kadhodapour J., Anaraki A.P., Dibajian S.H., Schmauder S. (2022) Enhanced energy harvesting by devices with the metamaterial substrate. *Physical Mesomechanics*. 25(6). pp. 568–582. doi: 10.1134/S1029959922060091
 8. Prall D., Lakes R.S. (1997) Properties of a chiral honeycomb with a Poisson's ratio of -1 . *International Journal of Mechanical Sciences*. 39(3). pp. 305–314.
 9. Eidini M. (2016) Zigzag-base folded sheet cellular mechanical metamaterials. *Extreme Mechanics Letters*. 6. pp. 96–102. doi: 10.1016/j.eml.2015.12.006
 10. Zheng X., Lee H., Weisgraber T.H., Shusteff M., DeOtte J., Duoss E.B., Kuntz J.D., Biener M.M., Ge Q., Jackson J.A., Kucheyev S.O., Fang N.X., Spadaccini C.M. (2014) Ultralight, ultrastiff mechanical metamaterials. *Science*. 344. pp. 1373–1377. doi: 10.1126/science.1252291
 11. Gold V. (2014) *Compendium of Chemical Terminology*. Volume 528. International Union of Pure and Applied Chemistry.
 12. Goldstein R.V., Gorodtsov V.A., Lisovenko D.S., Volkov M.A. (2014) Negative Poisson's ratio for cubic crystals and nano/microtubes. *Physical Mesomechanics*. 17(2). pp. 97–115. doi: 10.1134/S102995991402002
 13. Goldstein R.V., Gorodtsov V.A., Lisovenko D.S., Volkov M.A. (2019) Thin homogeneous two-layered plates of cubic crystals with different layer orientation. *Physical Mesomechanics*. 22(4). pp. 261–268. doi: 10.1134/S1029959919040015
 14. Zhong R., Fu M., Chen X., Zheng B., Hu L. (2019) A novel three-dimensional mechanical metamaterial with compression-torsion properties. *Composite Structures*. 226. Article 111232. doi: 10.1016/j.compstruct.2019.111232
 15. Zheng B.-B., Zhong R.-C., Chen X., Fu M.-H., Hu L.-L. (2019) A novel metamaterial with tension–torsion coupling effect. *Materials & Design*. 171. Article 107700. doi: 10.1016/j.matdes.2019.107700
 16. Frenzel T., Kadic M., Wegener M. (2017) Three-dimensional mechanical metamaterials with a twist. *Science*. 358. pp. 1072–1074. doi: 10.1126/science.aao4640
 17. Spadoni A., Ruzzene M. (2012) Elasto-static micropolar behavior of a chiral auxetic lattice. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 60. pp. 156–171. doi: 10.1016/j.jmps.2011.09.012
 18. Akhmetshin L.R., Smolin I.Yu. (2022) Analiz nekotorykh metodov soedineniya yacheek v mekhanicheskom tetrakhiral'nom metamateriale [Analysis of some cell connection methods in a mechanical tetrachiral metamaterial]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika – Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*. 77. pp. 27–37. doi: 10.17223/19988621/77/3
 19. Akhmetshin L.R., Smolin I.Yu. (2020) Influence of unit cell parameters of tetrachiral mechanical metamaterial on its effective properties. *Nanoscience and Technology: An International Journal*. 11(3). pp. 265–273. doi: 10.1615/NanoSciTechnolIntJ.2020033737

Сведения об авторах:

Ахметшин Линар Ришатович – аспирант кафедры механики деформируемого твердого тела Томского государственного университета; младший научный сотрудник Института физики прочности и материаловедения Сибирского отделения РАН (Томск, Россия). E-mail: akhmetshin.lr@gmail.com

Иохим Кристина Владимировна – аспирант кафедры механики деформируемого твердого тела Томского государственного университета; младший научный сотрудник Института физики прочности и материаловедения Сибирского отделения РАН (Томск, Россия). E-mail: iokhim.k@mail.ru

Казанцева Екатерина Александровна – аспирант кафедры прочности и проектирования Томского государственного университета; младший научный сотрудник Института физики прочности и материаловедения Сибирского отделения РАН (Томск, Россия). E-mail: kazantseva.ea@ispms.ru

Смолин Игорь Юрьевич – доктор физико-математических наук, доцент, главный научный сотрудник Института физики прочности и материаловедения Сибирского отделения РАН; профессор кафедры прочности и проектирования Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: smolin@ispms.ru

Information about the authors:

Akhmetshin Linar R. (Tomsk State University, Institute of Strength Physics and Materials Science of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Tomsk, Russian Federation). E-mail: akhmetshin.lr@gmail.com

Iokhim Kristina V. (Tomsk State University, Institute of Strength Physics and Materials Science of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Tomsk, Russian Federation). E-mail: iokhim.k@mail.ru

Kazantseva Ekaterina A. (Tomsk State University, Institute of Strength Physics and Materials Science of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Tomsk, Russian Federation). E-mail: kazantseva.ea@ispms.ru

Smolin Igor' Yu. (Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Institute of Strength Physics and Materials Science of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: smolin@ispms.ru

Статья поступила в редакцию 26.04.2023; принята к публикации 03.06.2024

The article was submitted 26.04.2023; accepted for publication 03.06.2024