МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ/MATERIALS SCIENCE

DOI: https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.143.124

МЕТАМАТЕРИАЛЫ. КЛАССИФИКАЦИЯ, АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ РАЗВИТИЯ И ПРИМЕНЕНИЯ

Научная статья

Манько И.Д.[1, *]

[1] Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (totaduna[at]mail.ru)

Аннотация

В данной работе был проведён обобщающий анализ области применения различных метаматериалов, оценён потенциал их применения, возможности производства метаматериалов с механическими свойствами. Для анализа и сравнения метаматериалов была приведена классификация по их свойствам. Для более подробного анализа области применения метаматериалов с особенными механическими свойствами – ауксетиков была введена практическая часть – разработанный и изготовленный на 3D принтере (FDM технология) макет модели (с описанием этапов разработки и особенностей изготовления) решетки макроскопического ауксетика с возможностью применения в качестве пособия при изучении дисциплин «материаловедение» и «теоретическая механика». Оценивается возможность применения изготовленной модели вне рамок учебного пособия.

Ключевые слова: метаматериалы, ауксетик, моностабильный ауксетик, шарнирные конструкции, способ получения, область применения.

METAMATERIALS. CLASSIFICATION, ANALYSIS OF DEVELOPMENT AND APPLICATION POSSIBILITIES

Research article

Manko I.D.[1, *]

[1] Ural Federal University, Ekaterinburg, Russian Federation

* Corresponding author (totaduna[at]mail.ru)

Abstract

In this work, a generalized analysis of the field of application of various metamaterials has been carried out, the potential of their application has been evaluated, and the possibilities of producing metamaterials with mechanical properties have been assessed. In order to analyse and compare metamaterials, a classification according to their properties has been given. For a more detailed analysis of the field of application of metamaterials with special mechanical properties – auxetic materials, a practical part was introduced – a model of a macroscopic auxetic lattice developed and manufactured on a 3D printer (FDM technology) with a description of the stages of development and peculiarities of manufacturing, which can be used as an aid in studying the disciplines "materials science" and "theoretical mechanics". The possibility of using the manufactured model outside the framework of the textbook is evaluated.

Keywords: metamaterials, auxetic, monostable auxetic, hinge structures, method of preparation, field of application.

Введение

В настоящее время в научном сообществе особое внимание уделяется метаматериалам – композиционным материалам, свойства которых определяются искусственно созданной периодической структурой – кристаллической решеткой. Материалы, свойства которых были предсказаны ещё в конце 19-го века, обладают в настоящее время высоким потенциалом к применению. Анализ полезных свойств метаматериалов приводит к необходимости сравнения, классификации, освещения и обсуждения уже известных наработок в области их исследований. В рамках классификации метаматериалов можно разделить их на материалы с особыми механическими, оптическими, а также электромагнитными свойствами.

Получившие широкое распространение, метаматериалы с оптическими и электромагнитными свойствами по праву занимают ведущее положение в многочисленных исследованиях, направленных на их дальнейшее изучение. Такое развитие обусловлено достаточно широко определенной областью применения метаматериалов – в микроэлектронике, радиоэлектронике. Так, в журнале Advanced Science была показана возможность применения метаматериалов в магнонике – спиновой электронике [1]. В таком случае рассматривается возможность приёма и передачи информации с помощью спиновых волн, преимущество которых в небольшой, по сравнению с ЭМ волной, длиной, а также в возможности быть управляемыми внешним магнитным полем. Сравнительно малые размеры получаемых приборов, основанных на кристаллах – сверхпроводниках позволят вывести высокочастотную микроэлектронику на качественно новый уровень. Создание кристаллов на базе кристаллической решетки метаматериала обусловлено необходимостью закладывать в работу компонентов противоположные по физическим свойствам составляющие – сверхпроводники и ферромагнетики. Хотя такой подход к производству микроэлектронных компонентов является во многом инновационным и требующим дальнейших исследований и наработок, ввиду неуклонно возрастающего спроса на микрокомпоненты на базе кремния возникает необходимость в поиске новых способов обработки и передачи сигналов.

С другой стороны, метаматериалы могут обладать отрицательным коэффициентом преломления магнитных волн. В таком случае рассматривается применение метаматериалов при производстве миниатюрных антенн, увеличивающих полосу пропускания и силу излучения излучателя [2]. В некоторых печатных антеннах используются метаматериалы,

обладающие на низких частотах отрицательным коэффициентом преломления. При повышении частоты изменяется направленность тройки векторов – магнитного, электрического полей, а также волнового вектора. В таком случае коэффициент преломления материала также становится противоположным, что, в свою очередь, позволяет регулировать резонансную частоту исследуемой печатной антенны. В данной области мы также видим преимущество метаматериалов, базирующееся на их основных свойствах – объединение нескольких противоположных физических свойств, а также миниатюризация производимых компонентов. В отличие от рассматриваемого ранее спинового проводника, печатные антенны на базе метаматериалов не являются предположением к разработке, а имеют реальное применение [2]. Такое применение, к сожалению, на данный момент ограничено. Ведутся работы в области уменьшения частотной дисперсионности и потерь сигналов, вызываемых ею.

Отмеченный коэффициент преломления метаматериалов может быть полезен и в оптике, при изготовлении плоскопараллельных пластин. Такие линзы позволяют проводить поляризацию света. В таком случае метаматериалы могут быть применены в качестве особых световых фильтров с обратным коэффициентом преломления, а соответственно, с обратными свойствами по отношению к обычным линзам.

Выше были описаны сложные метаматериалы, как элементы с высокой скоростью передачи данных и особыми каналами их передачи. Сложно переоценить потенциал таких метаматериалов в оптике и электронике, тем более, если речь касается уже получаемых и используемых в процессе производства метаматериалов. Приведем небольшую классификацию метаматериалов, составленную на базе изучения работ по данному вопросу.

В общем случае метаматериалы можно разделить по их свойствам – физическим и механическим. Физические свойства метаматериалов сложны и опосредованы – такими свойствами мы можем назвать отрицательный коэффициент преломления, различная намагниченность – ориентация спинов. В микроэлектронике принято различать метаматериалы по их волновым и частотным свойствам, в оптике – по коэффициентам дисперсии и преломления. По свойствам преломления различают метаматериалы одномерного, двумерного и трёхмерного преломления [3].

Следует отметить, что метаматериалы могут существовать в природе, что даже противоречит их определению. Так, различают метаматериалы искусственного происхождения и природного происхождения. Примерами материалов природного происхождения могут стать природные ауксетики – материалы с особыми механическими свойствами.

Понятие ауксетиков

На данном этапе познакомимся ближе с метаматериалами ярко выраженных механических свойств. Так как такие свойства не являются опосредованными – проявляются при первом рассмотрении (механическом воздействии), такие метаматериалы кажутся самыми простыми источниками изучения и применения. Остановимся более подробно на изучении метаматериалов с ярко выраженными механическими свойствами – ауксетиков. Ауксетики – материалы, обладающие отрицательным коэффициентом Пуассона.

Коэффициент Пуассона является безразмерной величиной и определяет отношение относительного поперечного сжатия к относительному продольному растяжению материала.

$$\mu = -(\Delta d/d)/(\Delta l/l) \quad (1)$$

Где -Δ*d*/*d* – величина относительного поперечного сжатия, Δ*l*/*l* – величина относительного продольного растяжения.

На примере материалов обычной природы отрицательный знак в формуле коэффициента Пуассона уничтожается отрицательностью значений отношения Δ*d*/*d* при растяжении материала, а также отрицательностью отношения Δ*l*/*l* при сжатии материала.

Отметим также, что абсолютно хрупкие тела обладают нулевым коэффициентом Пуассона (μ=0), а абсолютно несжимаемые материалы имеют коэффициент (μ=0,5).

Представим случай, в котором относительные продольное растяжение и поперечное сжатие не равны нулю, а также неотрицательны. Тогда по формуле (1) получим μ <0.

Материалы, обладающие такими свойствами, известны достаточно давно – с начала 20-го века. Первое упоминание ауксетических свойств материалов было опубликовано в монографии математика Августа Лява, примером описания вещества с отрицательным коэффициентом Пуассона в которой послужил пирит (дисульфид железа). Однако долгое время не представлялось возможным объяснить эти свойства.

Примерами материалов с отрицательным коэффициентом Пуассона можно назвать бумагу, пирит, кристаллы лития, натрия [4]. На данный момент открыто более 400 кристаллов, обладающих ауксетическими свойствами, около 300 из которых обладают кубической симметрией [5].

Замечательные свойства ауксетиков объясняются их микроскопической структурной особенностью, а также особенностями отдельных молекул. Кристаллическая решетка ауксетиков, как схема, отражающая закономерность расположения материальных частиц в кристаллической структуре вещества, должна иметь свои геометрические особенности. Так, кристаллическая решетка ауксетика обладает «шарнирным» свойством. Особенность межмолекулярных связей приводит к изменению структуры вещества при механическом воздействии. Такое воздействие не влияет на длину вектора, связывающего частицы, но приводит к взаимному отклонению векторов всех частиц относительно начальных фиксированных точек, частиц, что меняет общую конфигурацию и положение связей. В результате увеличивается толщина, но уменьшается плотность материала, причем не наблюдается нарушений законов физики [6].

На данный момент в научном сообществе накоплен внушительный объем информации и исследовательских работ, рассматривающих различные способы применения и получения ауксетиков. Одной из главных проблем является дороговизна производства и добычи ауксетика. В научных условиях возможен синтез данного материала, однако для массового потребления эти объемы недостаточны.

В области изучения ауксетиков существует два направления – изучение их микроскопической, реальной структуры, а также изучение материалов со свойствами ауксетиков в макроскопических масштабах. Так, кристаллическая решетка ауксетиков, увеличенная в некоторое количество раз, может быть «напечатана» с использованием современных промышленных технологий. Ввиду трудоемкости изучения свойств ауксетиков научным сообществом, рассмотрим далее искусственно созданные материалы, лишь обладающие ауксетическими свойствами, состоящие, грубо говоря, из макроскопической кристаллической решетки ауксетика.

На данный момент существует несколько способов получения искусственных ауксетиков: на раскройной 2D машине, на 3D принтере, путем вспенивания, складывания, путем комбинирования [7].

При выпуске материала на 3D принтерах возникают два важных фактора, влияющие на его ауксетические свойства: выбор конфигурации решетки и выбор сырья, из которого эта решетка будет изготовлена.

К недостаткам этого способа относится невозможность приближения размеров решетки материала к размерам реального ауксетика – в мире пока не существует машины, имеющей столь малое разрешение (толщину печатного слоя).

Понятие моностабильного ауксетика дает обозначение подвижной структуре, обладающей при движении в плоскости одной степенью свободы.

Такие системы примечательны более разнообразной палитрой узоров, применяемых в качестве элементов решетки, а также отсутствием связей в их привычном понимании. Здесь их роль играют шарниры, соединяющие элементы схемы [8].

Практическая часть

Возьмем для изучения модель элемента кристаллической решетки моностабильного ауксетика, состоящую из четырех лепестков (рис. 1). Данная схема имеет достаточно сложную механику разворота.

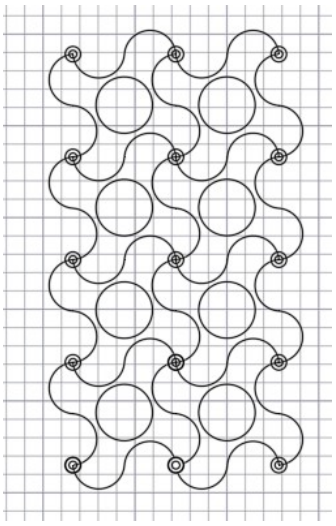

Рисунок 1 - Общий вид решетки рассматриваемого моностабильного ауксетика
DOI: https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.143.124.1

Наибольшее значение коэффициент Пуассона принимает при повороте элементов решетки на 45 градусов. При дальнейшем повороте данная решетка начнет «складываться». Пиковое значение коэффициента Пуассона несложно рассчитать, произведя простейшие измерения. Рассматривая элемент схемы можно объяснить угол поворота, при котором коэффициент Пуассона максимален. Данный элемент обладает аксиальной симметрией. Его можно повернуть 4 раза вокруг своей оси, на углы 90 градусов. Каждые 45 градусов положение решетки от начального будет отклоняться максимально.

Каждый лепесток модели должен содержать шарнир, соединяющий элементы решетки и обеспечивающий их вращение.

При дальнейшем рассмотрении схемы становится очевидной проблема: шарниры не позволяют решетке складываться. Такую проблему возможно решить особым типом шарниров, занимающим не всю толщину элемента, а лишь его часть. (1/4 толщины, по числу конечностей элемента). Некоторую сложность представляет расчет шарниров для движения элементов как в прямом, так и в обратном направлениях.

Здесь, однако, есть также свои закономерности. Так, для рабочего соединения требуется, чтобы соединение противоположных элементов находились на разной высоте, причем чередуясь (верхний-нижний, правый – левый). Соблюдать эту очередность необходимо для складывания элементов решетки.

Из аналитических соображений получим следующую схему: (Рис. 2)

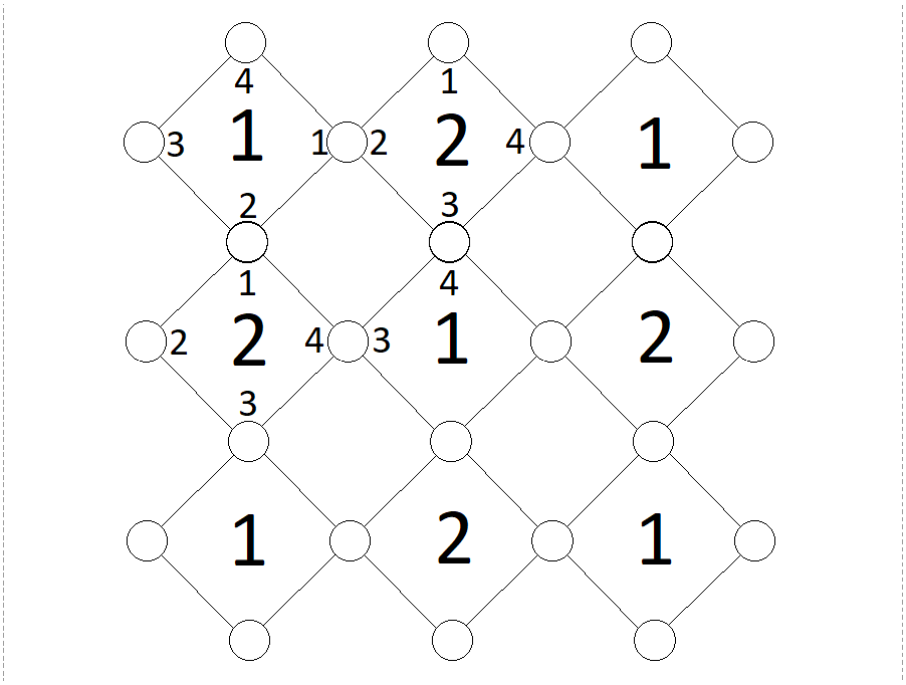

Рисунок 2 - Общий вид схемы строения шарниров рассматриваемого моностабильного ауксетика
DOI: https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.143.124.2

Маленькими цифрами (1,2,3,4) помечены положения шарниров по высоте (1 – нижний шарнир, 4 – верхний шарнир).

Большими цифрами помечены типы элементов решетки. Ввиду того, что лепестки разрабатываемого моностабильного ауксетика имеют свое направление (направлены направо), количество положений, в которых может находиться модель, уменьшается в два раза. (Вращение в обратную сторону с сохранением идентичной формы, в отличие от квадратного элемента, невозможно).

Первый тип отличается от второго противоположным расположением шарниров 2 и 4.

Отметим, что такая конструкция применения шарниров не имеет аналогов, разработана впервые. Она позволяет при минимальном наборе деталей (всего два типа), по заданному правилу, собирать полотно из большого количества элементов. Такая схема сработает как по часовой, так и против часовой стрелки. Данный вывод получен эмпирически.

Без наличия доказательства возникает необходимость в ручной проверке полотен. Грубо говоря, без вывода формулы невозможен промышленный выпуск решетки данного моностабильного ауксетика.

Действие шарниров элементов осуществляется при помощи винта. Шляпка винта утапливается в верхние шарниры и свободно вращается. В средних шарнирах винты жестко зафиксированы – здесь ими нарезается резьба. На углах лепесков вырезаны канавки. Это необходимо для свободного хода шарниров. Дополнительно по периметру всех граней детали используются закругленные фаски – для уменьшения трения и неровностей соприкосновения элементов решетки.

Разработка данной решетки и правила использования шарниров заняла несколько месяцев. При разработке использовались программы AutoCAD и Inventor. Печать производилась на принтере модельного ряда F200.

В заключении данного раздела следует отметить, что существует другой способ соединения элементов решетки описываемого моноауксетика. Соединение осуществляется при помощи «пластичных материалов».

Полученное автором правило открывает новые возможности при использовании конкретной решетки моностабильного ауксетика. Использование схемы шарниров на винтах максимально упрощает производство полотна описываемой решетки, следственно, снижает затраты, что невозможно представить при использовании постороннего материала, обладающего свойствами пластичности.

Общая структура применения материалов, проявляющих свойства ауксетиков структурируется по трем областям – применение в тяжелой промышленности и легкой промышленности, в медицине.

В тяжелой промышленности ауксетики могут быть использованы для повышения прочности материалов при производстве брони. Трехмерная модель ауксетика обладает свойством сильного уплотнения в области деформации, что предотвращает пробой техники снарядом.

В медицине рассматривается применение ауксетиков для проектирования стентов коронарных сосудов [9]. В промышленности также можно получить сплавы, обладающие особыми ауксетическими свойствами [3].

В строительстве ауксетические материалы могут использоваться при разработке сэндвич-композитных панелей, геотекстиля – материала покрытия взлетных полос, автомобильных и железных дорог [5].

В космической отрасли авторами [10] предлагается использование ауксетиков, как материалов для строительства ЭкоКосмоДома (ЭКД) – жилых модулей, обеспечивающих в космическом пространстве условия среды, максимально близкой к тропическому и субтропическому поясу.

Применение «макроскопических» ауксетиков возможно в легкой промышленности, согласно нуждам потребителей. Из материалов разрабатываются предметы интерьера, одежда, обувь.

Полотно, разработанное автором, может быть использовано для создания компактных ширм, что применимо при дизайне и зонировании помещений малой площади. В сложенном состоянии ширма занимает небольшое количество места, в разложенном формирует перегородку. Дешевизна в исполнении и простота сборки таких ширм дополняются положительным эстетическим качеством и компактностью.

Также возможно исполнение предметов интерьера, таких как: складные полки, столики, подставки.

Заключение

Рассмотренные выше виды метаматериалов дают хорошую почву для дальнейших исследований, обладая рядом выгодных преимуществ. Небольшая классификация, приведенная выше, помогает в кратких чертах различить метаматериалы по их назначению, а также физическим свойствам. Более подробно рассмотрены метаматериалы с механическими свойствами – ауксетики. Практическая работа показала, что печать моноауксетика сложной формы на 3D принтере максимально проста и экономична. Однако результаты нашей работы вызывают два важных вопроса: проверка справедливости разработанного правила, вывод корректной формулы расчета шарниров, а также более углубленное изучение области применения таких ауксетиков в легкой промышленности, реализация собственных проектов.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Мещеринов В.В. Метаматериал для альтернативной магнонной электроники / В.В. Мещеринов // Журнал «За науку». — 2019. — URL: mihttps://zanauku.mipt.ru/2019/08/13/metamaterial-dlya-alternativnoj-magnonnoj-elektroniki/pt.ru (дата обращения: 01.03.2022).

2. Слюсар В.И. Метаматериалы в конструкциях антенн / В.И. Слюсар // Первая миля. Last Mile (Приложение к журналу “Электроника: Наука, Технология, Бизнес”). — 2010. —№ 30-4. — С. 44-60.

3. Муслов С.А. Сплавы с памятью формы: свойства, получение и применение в медицине / С.А. Муслов, А.В. Шеляков, В.А. Андреев // Высокие технологии и инновации в науке. — 2020. — С. 204-212.

4. Петрова Т.Е. Ауксетики, материалы с “обратными” свойствами / Т.Е. Петрова // Вузовская наука в современных условиях. — 2020. — С. 41-44.

5. Ивойлов М.М. Ауксетики и их потенциал в строительной области / М.М. Ивойлов, А.И. Павлова, И.В. Любавская // Наука и инновации в строительстве. — 2020. — С. 98-101.

6. Бокий И.Д. Нелинейные колебания и ауксетические свойства двумерной решетки: дис. … канд. физико-математических наук: 01.04.07 / Бокий Дмитрий Игоревич; науч. рук. Е. А. Корзникова; АлтГТУ им. И. И. Ползунова. — Барнаул, 2016. — 118 с.

7. Мазаев А.В. Ауксетические материалы: классификация, механические свойства и приложения / А.В. Мазаев, О. Аженеза, М.В. Шитикова // XXXI Международная инновационная конференция молодых ученых и студентов по проблемам машиноведения. — 2020. — С. 32-35.

8. Stavrik M. Geometrical Elaboration of Auxetic Structures / M. Stavrik, A. Wiltsche // Nexus Network Journal. — 2019.

9. Буланов А.В. Использование ауксетиков для проектирования стентов коронарных сосудов / А.В. Буланов, О.А. Блудова // Политехнический молодёжный журнал. — 2017.

10. Конек Д.А. Перспективы применения ауксетичных материалов в конструкциях экокосмодома / Д.А. Конек, С.В. Шилько, А.Э. Юницкий // Технологии материалов. — 2022. — С. 188-194.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Meshcherinov V.V. Metamaterial dlya al'ternativnoj magnonnoj elektroniki [Metamaterial for alternative magnonic electronics] / V.V. Meshcherinov // ZHurnal «Za nauku» [The journal "For Science"]. — 2019. — URL: mihttps://zanauku.mipt.ru/2019/08/13/metamaterial-dlya-alternativnoj-magnonnoj-elektroniki/pt.ru (accessed: 01.03.2022) [in Russian].

2. Slyusar V.I. Metamaterialy v konstrukciyah antenn [Metamaterials in antenna designs] / V.I. Slyusar // Pervaya milya. Last Mile (Prilozhenie k zhurnalu “Elektronika: Nauka, Tekhnologiya, Biznes”) [The first mile. The Last Mile (Appendix to the magazine “Electronics: Science, Technology, business")]. — 2010. —№ 30-4. — P. 44-60 [in Russian].

3. Muslov S.A. Splavy s pamyat'yu formy: svojstva, poluchenie i primenenie v medicine [Shape memory alloys: properties, preparation and application in medicine] / S.A. Muslov, A.V. SHelyakov, V.A. Andreev // Vysokie tekhnologii i innovacii v nauke [High technologies and innovations in science]. — 2020. — P. 204-212 [in Russian].

4. Petrova T.E. Auksetiki, materialy s “obratnymi” svojstvami [Auxetics, materials with “reverse” properties] / T.E. Petrova // Vuzovskaya nauka v sovremennyh usloviyah [University science in modern conditions]. — 2020. — P. 41-44 [in Russian].

5. Ivojlov M.M. Auksetiki i ih potencial v stroitel'noj oblasti [Auxetics and their potential in the construction field] / M.M. Ivojlov, A.I. Pavlova, I.V. Lyubavskaya // Nauka i innovacii v stroitel'stve [Science and innovation in construction]. — 2020. — P. 98-101 [in Russian].

6. Bokij I.D. Nelinejnye kolebaniya i aukseticheskie svojstva dvumernoj reshetki [Nonlinear oscillations and acoustic properties of a two-dimensional lattice]: dis. ... candidate of Physical and Mathematical Sciences: 01.04.07 / Bokij Dmitrij Igorevich; scientific. Director E. A. Korznikova; AltGTU named after I. I. Polzunov. — Barnaul, 2016. — 118 p. [in Russian]

7. Mazaev A.V. Aukseticheskie materialy: klassifikaciya, mekhanicheskie svojstva i prilozheniya [Acoustic materials: classification, mechanical properties and applications] / A.V. Mazaev, O. Azheneza, M.V. SHitikova // XXXI Mezhdunarodnaya innovacionnaya konferenciya molodyh uchenyh i studentov po problemam mashinovedeniya [XXXI International Innovative Conference of Young Scientists and Students on the Problems of Machine Science]. — 2020. — P. 32-35 [in Russian].

8. Stavrik M. Geometrical Elaboration of Auxetic Structures / M. Stavrik, A. Wiltsche // Nexus Network Journal. — 2019.

9. Bulanov A.V. Ispol'zovanie auksetikov dlya proektirovaniya stentov koronarnyh sosudov [The use of auxetics for the design of coronary vessel stents] / A.V. Bulanov, O.A. Bludova // Politekhnicheskij molodyozhnyj zhurnal [Polytechnic Youth Magazine]. — 2017 [in Russian].

10. Konek D.A. Perspektivy primeneniya auksetichnyh materialov v konstrukciyah ekokosmodoma [Prospects for the use of auxetic materials in ecocosmodome structures] / D.A. Konek, S.V. SHil'ko, A.E. YUnickij // Tekhnologii materialov [Materials technology]. — 2022. — P. 188-194 [in Russian].