

УДК 61.61.09:29.35.19

В. О. Говоровский, Н. Р. Прокопчук, А. Г. Любимов, О. М. Касперович
Белорусский государственный технологический университет

ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ АУКСЕТИЧЕСКИХ СТРУКТУР

Основной задачей статьи являлся анализ областей применения ауксетических структур. Перспективность использования ауксетических структур в различных отраслях определяется их уникальными свойствами, в частности отрицательным коэффициентом Пуассона. При растяжении материала его поперечное сечение расширяется, а не сужается как в обычных материалах. Такая уникальная характеристика открывает широкие возможности для их применения в различных областях. Ауксетические материалы демонстрируют ряд и других характеристик по сравнению с обычными материалами, например, отличную стойкость к вдавливанию, высокую жесткость на сдвиг, высокую вязкость разрушения и уникальные способности поглощения энергии.

Ауксетики используются в медицинских имплантах, применяются для создания легких и прочных конструкций, используемых в самолетах и космических аппаратах, что позволяет снизить вес конструкции и сохранить устойчивость к нагрузкам. Они применяются в солнечных панелях и ветряных турбинах благодаря своей способности эффективно распределять нагрузки и улучшать энергоэффективность, в гибких электронных компонентах, в строительстве для повышения сейсмостойкости зданий и сооружений, в спортивной экипировке.

Перспективы использования ауксетических структур огромны – это и разработка новых методов их производства, и изучение влияния микроструктуры на механические свойства ауксетиков, а также тканевая и регенеративная медицина. Таким образом, ауксетические структуры обладают огромным потенциалом для инноваций в науке и технике, чему также способствуют успехи в развитии аддитивных технологий, позволяющих создавать практически любые макроструктурированные материалы.

Ключевые слова: область применения, ауксетик, ауксетическая структура, материалы, коэффициент Пуассона.

Для цитирования: Говоровский В. О., Прокопчук Н. Р., Любимов А. Г., Касперович О. М. Области применения ауксетических структур // Труды БГТУ. Сер. 2, Химические технологии, биотехнологии, полимерное материаловедение. 2026. № 1 (301). С. 92–104.

DOI: 10.52065/2520-2669-2026-301-9.

V. O. Govorovskiy, N. R. Prokopchuk, A. G. Liubimau, V. M. Kasperovich
Belarusian State Technological University

APPLICATION AREA OF AUXETIC STRUCTURES

The main objective of the work was to analyze the application areas of auxetic structures. The prospects of using auxetic structures in various industries are determined by their unique properties, in particular, the negative Poisson ratio. When a material is stretched, its cross-section expands, rather than contracting, as in conventional materials. This unique characteristic opens up wide possibilities for their application in various fields. Auxetic materials exhibit a number of other characteristics compared to conventional materials, such as excellent indentation resistance, high shear stiffness, high fracture toughness, and unique energy absorption abilities.

Auxetics are used in medical implants, used to create lightweight and durable structures used in airplanes and spacecraft, allowing to reduce the weight of the structure and maintain load resistance. They are used in solar panels and wind turbines, due to their ability to efficiently distribute loads and improve energy efficiency, in flexible electronic components, in construction to increase earthquake resistance, buildings and structures, in sports equipment.

The prospects for using auxetic structures are enormous, including the development of new methods of their production, and the study of the effect of microstructure on the mechanical properties of auxetics, tissue and regenerative medicine. Thus, auxetic structures have great potential for innovation in science and technology, which is also facilitated by advances in the development of additive technologies that make it possible to create almost any macrostructured materials.

Keywords: application area, auxetic, auxetic structures, materials, Poisson's ratio.

For citation: Govorovskiy V. O., Prokopchuk N. R., Liubimau A. G., Kasperovich V. M. Application area of auxetic structures. *Proceedings of BSTU, issue 2, Chemical Engineering, Biotechnologies, Polymer Materials Science*, 2026, no. 1 (301), pp. 92–104 (In Russian).

DOI: 10.52065/2520-2669-2026-301-9.

Введение. С момента зарождения авиастроения, космической индустрии, военной промышленности существует постоянная потребность в легких и в то же время жестких материалах. Полимерные композиционные материалы – наиболее перспективные материалы, удовлетворяющие вышеуказанному требованию.

Сравнивая различные композиты, можно отметить, что композит с полимерной матрицей демонстрирует наилучшие характеристики [1–3], такие как высокая ударопрочность [4–6], износостойкость [7–9] и превосходные термические свойства [10]. Интерес представляют ячеистые структуры с превосходной демпфирующей способностью [11] и высокой ударной прочностью [12], которые присутствуют в природных структурных элементах, например в стебле бамбука, кости, дереве и пробке [13].

Такие конструкционные ячеистые материалы, вдохновленные природой, при попытках производства их людьми называются метаматериалами. Метаматериалы – это композитные материалы, свойства которых обусловлены не столько физическими характеристиками их компонентов, сколько микроструктурой. Метаматериалы повсеместно используются в различных инженерных решениях, которые требуют легкости, жесткости, ударопрочности и возможности поглощения энергии. Рациональный геометрический дизайн метаматериалов может привести к уникальным свойствам, таким как отрицательная сжимаемость, отрицательный коэффициент Пуассона и упругий гистерезис, которые обычно не проявляются в природных материалах [14].

Ауксетический эффект – такое поведение, которое наблюдается у материалов с отрицательным значением коэффициента Пуассона. Внутренняя структура материала играет важную роль в получении ауксетического эффекта. Ауксетическое поведение является независимым от масштаба свойством, которое может быть достигнуто на различных структурных уровнях от молекулярного до макроскопического.

Основная часть. В связи с актуальностью и распространением ауксетических структур рассмотрим основные и перспективные области их использования.

Биомедицина. Искусственный кровеносный сосуд является типичным примером для медицинского применения. Если кровеносный сосуд изготовлен из обычного материала, он имеет тенденцию к уменьшению толщины стенки по мере того, как сосуд «открывается» в ответ на пульсацию крови, протекающей через него (рис. 1). Это может привести к разрыву сосуда с потенциально катастрофическими последствиями. Однако, если используется ауксетический кровеносный сосуд, толщина стенки его увеличивается, когда через него проходит ток крови. Кроме того, был описан стент для открытия полости артерии или аналогичного сосуда для использования в хирургии сердца (ангиопластике) и связанных с ней процедурах (рис. 2). Коронарная артерия открывается боковым расширением гибкого ауксетического полого стержня или оболочки, изготовленной из политетрафторэтилена под напряжением. Больше потенциальных возможностей для применения включают хирургические имплантаты [15] и шовные фиксаторы или фиксаторы мышц/связок, где дополнительное преимущество пористой структуры должно способствовать росту костей [16, 17].

Беспрецедентные преимущества продемонстрировали ауксетики и в роли межпозвоночных вставок (рис. 3), особенно при нагрузке [18–20], имплантов, костных винтов [21], при эндопротезировании тазобедренных суставов [22]. Например, трехмерные ауксетические материалы с возвратными сотовыми структурами использовались в качестве костных винтов, общего эндопротезирования тазобедренного сустава, сосудистых стентов [23], тканевых каркасов [24] и т. д.

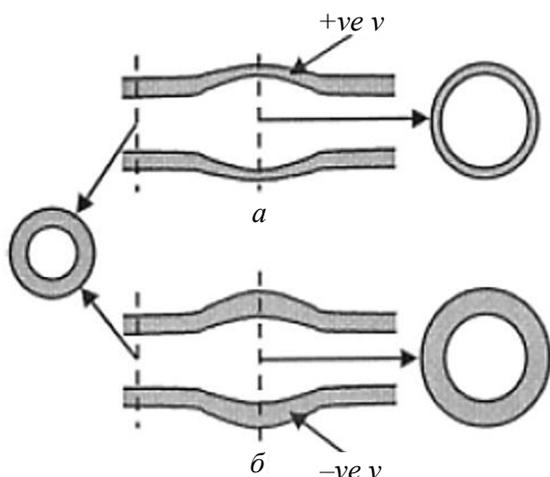


Рис. 1. Искусственный кровеносный сосуд:
 а – обычный материал; б – ауксетик

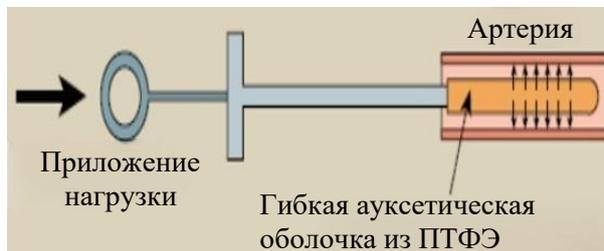


Рис. 2. Расширитель для открытия
 полости артерии

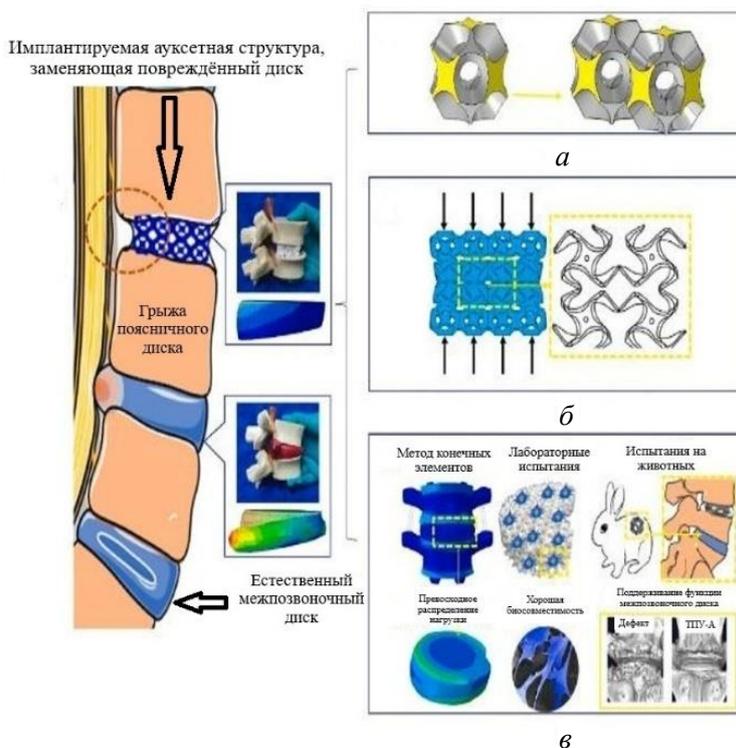


Рис. 3. Межпозвоночная вставка:
 а – схема ауксетической структуры;
 б – механическая реакция; в – оценка эффективности

Композиты, армированные ауксетическим волокном. Ожидается, что вспомогательные армирующие волокна должны повысить стойкость композитов к разрушению. Хорошо известно, что граница раздела между матрицей и волокнами считается самой слабой частью композитного материала. Вытягивание волокна является основной проблемой в армированных волокном композитах. Например, однонаправленный композитный материал, нагруженный при растяжении, будет подвергаться поперечному сжатию как матрицы, так и волокон, что приведет к разрушению на границе раздела волокно – матрица. Однако замена обычного волокна на ауксетическое может задержать вытягивание волокон, потенциально помогая противостоять росту трещин, поскольку возможность согласования коэффициентов Пуассона матрицы и волокна приводит к расширению волокна во время растяжения [25, 26].

«Умный», или «интеллектуальный», текстиль. При изготовлении защитной одежды также можно извлечь выгоду из таких материалов, что приведет к большой вариативности в широком диапазоне изделий – от термобелья до боевых курток и бронежилетов. В настоящее время защитные материалы должны быть толщиной до сантиметра, как следствие, они очень жесткие, тяжелые и негибкие.

Ауксетические материалы обладают еще одним особым свойством – поведением при изгибе. Например, если лист какого-либо материала согнуть вниз, верхняя поверхность неизбежно слегка растягивается. Обычный материал реагирует на это, пытаясь сжаться в перпендикулярном направлении, поэтому края имеют возможность загибаться вверх, что приводит к образованию поверхности в форме седла (антикластическая кривизна) (рис. 4). Но в ауксетических материалах реакция заключается в том, что края изгибаются вниз, т. е. имеют выпуклую форму (куполообразную форму), которая имеет то же направление, что и сила изгиба. Такая особенность ауксетических материалов полезна для изготовления более совершенных бронежилетов, потому что ауксетический бронежилет может обеспечить такую же защиту, при этом быть тоньше, легче и лучше соответствовать синкластической двойной кривизне человеческого тела [27, 28]. Кроме того, выпуклые формы более подходят, чем седловидные формы сэндвич-панелей для самолетов или автомобилей (рис. 5) [29, 30].

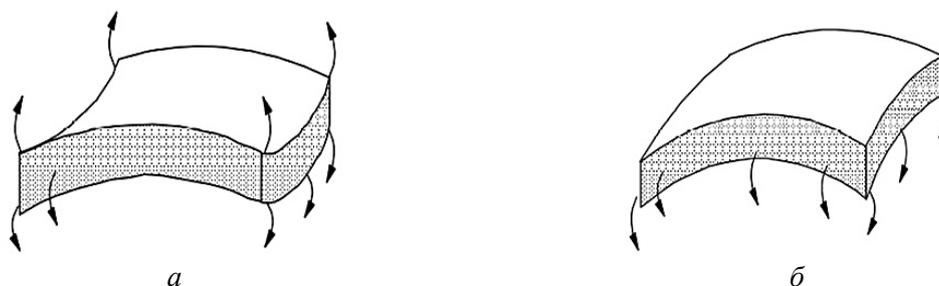


Рис. 4. Седловидные формы:
а – антикластическая кривизна и выпуклая куполообразная форма;
б – синкластическая кривизна

Защитное агентство одежды и текстиля (DCTA) в Колчестере, которое отвечает за исследования в области высокотехнологичной одежды для военных, изучает возможность использования ауксетического текстиля в военных целях [31].

Еще одной перспективной областью применения является использование ауксетических структур для придания пуленепробиваемым шлемам или жилетам большей устойчивости к ударам и осколкам. Когда ауксетический шлем подвергается воздействию с одного направления, материал должен поступать в это место с других направлений, чтобы компенсировать воздействие удара (рис. 5). Таким образом, травмы головы могут быть предотвращены или быть менее серьезными.



Рис. 5. Вариант исполнения шлема из ауксетиков

Крепежные детали и заклепки. Поскольку ауксетические материалы расширяются в стороны при вытягивании, следовательно, они идеально подходят для изготовления крепежных деталей и заклепок. При вставке такого крепежа плотное фиксирование обеспечивает боковое сжатие, в то время как его удаление затруднено, поскольку крепеж при растяжении расширяется и более плотно удерживается в отверстии [32].

Материалы, поглощающие энергию, для защиты груза при падении в воздухе. В настоящее время рассеивающий энергию материал (РЭМ) используется для смягчения удара при приземлении воздушных поставок и для обеспечения того, чтобы они доставлялись на землю в целостности и сохранности и были полностью функциональными. РЭМ представляет собой бумажное изделие, состоящее из сотового сердечника из крафт-бумаги толщиной 75 мм, облицованного с обеих сторон крафт-бумагой. Идея состоит в том, что при контакте РЭМ сжимается, по крайней мере, до 70% от его первоначальной толщины, рассеивая часть удара и выпуская захваченный воздух, чтобы предотвратить сильный удар, который может повредить груз [33]. Ауксетики обладают высокой ударопрочностью, стойкостью к вдавливанию и свойством поглощения энергии. Поэтому могут быть потенциально применены для защиты авиационного оборудования при сбросе груза, чтобы предотвратить его повреждение [34]. Однако самый большой вопрос заключается в том, является ли такой материал коммерчески доступным и удовлетворяет ли его прочность требованиям в качестве конструкционного материала в данном конкретном случае.

Облегченные роботы. Легкие материалы внедряются в робототехнику для облегчения их применения в биомедицине и для создания более простых и дееспособных роботов. Одним из путей упрощения является проектирование корпуса робота с использованием «умных» материалов, которые выполняют функции управления и приведения его в действие. Метаматериалы обеспечивают именно такое рациональное свойство материала. При создании легкого робота используют механические метаматериалы для внутренней синхронизации двух пассивных сцеплений, которые контактируют с поверхностью его перемещения. Это позволяет ему перемещаться по замкнутому контуру с помощью движения червяка, приводимого в движение одним приводом. Легкий робот состоит из двух 3D-печатных метаматериалов, которые обладают ауксетическими и стандартными эластичными свойствами. Поскольку механизм синхронизации является особенностью материального корпуса робота, считается, что предложенная конструкция позволит реализовать совместимые и надежные решения, которые хорошо масштабируются при миниатюризации.

Привод облегченного робота был составлен из следующих элементарных ауксетических структур (рис. 6).

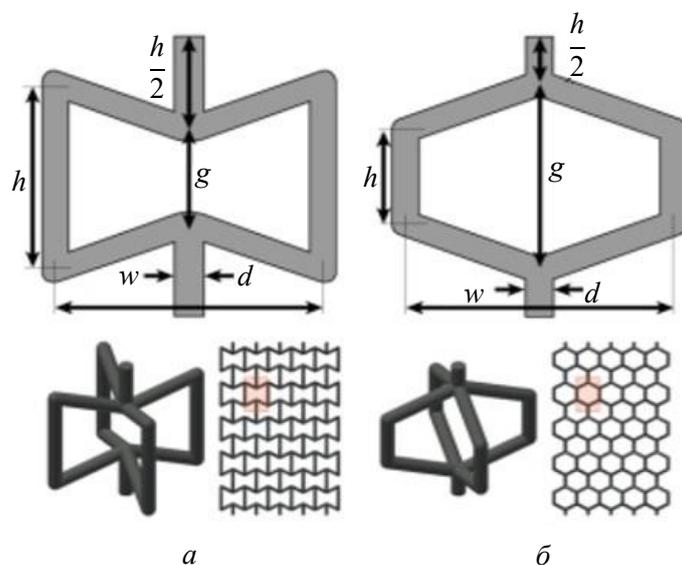


Рис. 6. Элементарные ауксетические структуры:
 а – структура «песочные часы»; б – структура в виде соты

Робот, полученный из ауксетических структур, оказался чрезвычайно гибким, что позволило использовать его для навигации в скважинах или каналах, в том числе неизвестного поперечного сечения. Поскольку робот, приведенный в статье [35], оказался необычайно гибким, он хорошо подходит для навигации в скважинах, которые сами по себе очень мягкие. Это также говорит о том, что конструкция будет соответствовать требованиям и иметь низкие коэффициент трения и величины помех, что делает ее хорошо подходящей для каналов с неправильным или неизвестным поперечным сечением. Используя ячеистые метаматериалы с другими параметрами ячейки (например, шестиугольными), возможно оптимизировать устройство для передвижения в проходах другой геометрии (например, цилиндрических трубах). Ожидается, что в будущих конструкциях микророботов будут и далее использоваться метаматериалы для упрощения их конструкции и улучшения их функций.

Непневматические (бескамерные) шины. В статье представлена разработанная и испытанная бескамерная шина [36], выполненная из ауксетических структур (рис. 7). Применение ауксетиков в производстве автомобильных шин позволяет восстанавливать структуру шины после повреждения, что защищает от утечки воздуха, повышает амортизационные свойства, улучшает комфорт и управляемость.

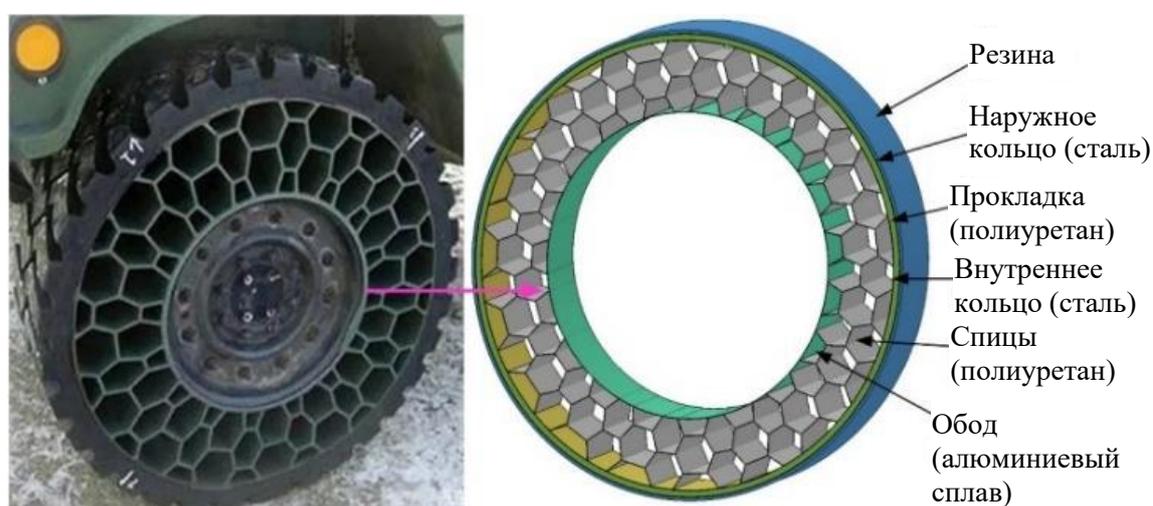


Рис. 7. Бескамерная шина

Другие области использования. Помимо вышеуказанных сфер применения, ауксетические материалы получили широкое распространение в аэрокосмической промышленности. Коэффициент Пуассона не зависит от масштаба изделия, поэтому ауксетические материалы не сложно внедрить в конструкции, построенные из обычных компонентов, которые «расширяются» при растяжении. Такие конструкции как большие антенны и солнцезащитные экраны можно было бы запускать в космос в закрытой компактной форме, а затем «открывать» на более позднем этапе в космосе [37].

Как упоминалось ранее, ауксетические материалы обладают более высокой устойчивостью к сдвигу и скручиванию, чем обычные материалы. Эти свойства особенно важны для конструктивных элементов, которые могут разрушаться при деформации сдвига (такие как балки в зданиях, листы, используемые в самолетах или автомобилях и т. д.). Управление военно-морских исследований США показало, что чувствительность приемника гидролокатора была увеличена на порядок за счет замены неауксетической матрицы на изотропную ауксетическую матрицу [38].

Еще одним преимуществом использования ауксетических материалов является их поведение при изгибе. Как упоминалось ранее, двойная кривизна является одним из важных механизмов деформации в ауксетических материалах. Такая функция может быть использована при формировании сэндвич-панелей для компонентов самолетов и автомобилей.

В работе [39] рассматривается альтернатива преобразования аэродинамики птичьего полета (поведение крыльев) в аналогичную по аэродинамике конструкцию. Внутренний каркас конструкции (рис. 8) спроектирован таким образом, чтобы выдерживать аэродинамические нагрузки и обеспечивать достаточную жесткость конструкции крыла на изгиб и кручение. Такой элемент каркаса позволяет практически точно повторить поведение птичьего крыла при полете. Работы [40, 41] ставят перед собой немного иную задачу, однако также решают вопрос аэродинамики полета. В них рассмотрены применения ауксетических структур в качестве элементов конструкции, которые позволяют изменять структуру крыла в зависимости от типа полета. Изменяющаяся конструкция аэродинамического профиля должна иметь возможность изменять свою форму для адаптации между высоко- и низкоскоростным полетом или для управления полетом в различных скоростных режимах, тем самым повышая эффективность полета, стабильность и безопасность.



Рис. 8. Внутренний каркас аэродинамической конструкции

Статья [42] дополняет вышеупомянутые работы по аэродинамике и описывает применение оптимизации топологии на основе хиральных структур. В ней раскрывается вариативность использования различных конфигураций ауксетических структур и рациональность их применения.

Статья [43] рассматривает возможность использования ауксетических структур в качестве зацепляющего элемента (лапки) при посадке беспилотника на неустойчивую поверхность (рис. 9). Такая аналогия была взята по примеру приземления птиц на любую поверхность при помощи их лапок. Цель состояла в том, чтобы изготовить контактные модули с ауксетической формой, которые могли бы максимально увеличить их форму для формирования типичной геометрии контакта с окружающей средой.

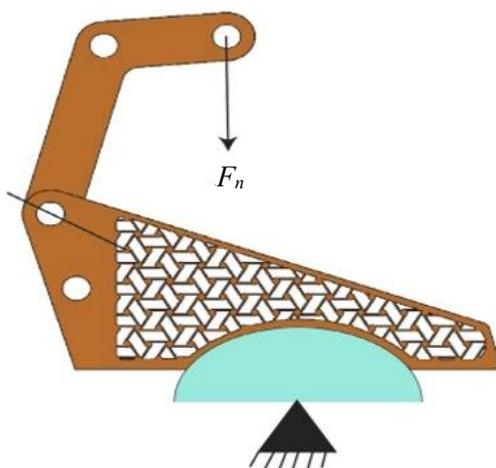


Рис. 9. Вспомогательные лапки при посадке

Была принята гексахиральная конструкция для поглощения динамических нагрузок при посадке, так чтобы общая конструкция могла быть устойчива к большинству типов поверхностей. В статье [44] приводится анализ такой конструкции и ее аэродинамики.

Статья [45] рассматривает градиентные изменяющиеся ауксетические структуры и их анализ в программе Ansys при помощи метода конечных элементов. Данная статья описывает процесс построения структур и их анализ, что позволяет дать оценку применения таких структур в различных отраслях. Рассматриваемые структуры прекрасно позиционируют себя как демпфирующие «подушки», которые гасят энергию удара.

Заключение. Таким образом, можно сделать вывод о том, что использование ауксетических структур – современное, динамичное, актуальное и перспективное направление развития в области метаматериалов. Обилие областей применения, вариативность исполнения и наработка исследований, таких как авиамоделирование и авиастроение, оборонная промышленность, машиностроение, биомедицина, открывают большие возможности для продуктивной работы и ее развития в современных реалиях и оригинальных решениях в сфере инженерии, аэрокосмических технологий и не только.

Перспективные структуры появляются, обновляются и дорабатываются с момента их открытия и продолжают развиваться по сей день, открывая новые возможности. Ауксетические структуры способствуют облегчению конструкций, увеличению прочности и надежности механизмов и соединений.

Список литературы

1. Quasistatic and dynamic nanomechanical properties of HDPE reinforced with 0/1/2-dimensional carbon nanofillers based hybrid nanocomposite using nanoindentation / S. K. Sahu [et al.] // *Materials Chemistry and Physics*. 2018. No. 203. P. 173–184.
2. Quasistatic and dynamic nanomechanical properties of HDPE reinforced with 0/1/2-dimensional carbon nanofillers based hybrid nanocomposite using nanoindentation / N. D. Badgayan [et al.] // *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*. 2018. No. 80. P. 180–188.
3. Experimental investigation on multidimensional carbon nanofiller reinforcement in HDPE: An evaluation of mechanical performance / S. K. Sahu [et al.] // *Materials Today Processing*. 2020. No. 24. P. 415–421.
4. An insight into mechanical properties of polymer nanocomposites reinforced with multi-dimensional filler system: A state of art review / N. D. Badgayan [et al.] // *Materials Today Processing*. 2020. No. 24. P. 422–431.
5. Dynamic mechanical thermal analysis of high-density polyethylene reinforced with nano-diamond, carbon nanotube and graphite nanoplatelet / S. K. Sahu [et al.] // *Materials Science Forum* 917. 2018. P. 27–31.
6. Assessment of bulk mechanical properties of HDPE hybrid composite filled with 1D/2D nanofiller system / N. D. Badgayan [et al.] // *Materials Science Forum* 917. 2018. P. 12–16.
7. Experimental investigation on tribological properties of PTFE based composite / P. S. Kumar [et al.] // *AIP Conference Proceedings* 2148. 2019. No. 03. P. 23–32.
8. Tribological behaviour of 1D and 2D nanofiller based high density polyethylene hybrid nanocomposites: A run-in and steady state phase analysis / N. D. Badgayan [et al.] // *Wear*. 2017. No. 376–377. P. 1379–1390.
9. Sahu S. K., Badgayan N. D., Sreekanth P. S. R. Understanding the influence of contact pressure on the wear performance of HDPE/multi-dimensional carbon filler-based hybrid polymer nanocomposites // *Wear*. 2019. No. 438–439. P. 1–10.
10. Evaluation of Dynamic Mechanical and Thermal Behavior of HDPE Reinforced with MWCNT/h-BNNP: An Attempt to Find Possible Substitute for a Metallic Knee in Transfemoral Prosthesis / N. D. Badgayan [et al.] // *International Journal of Thermophysics*. 2019. No. 40. P. 1–20.

11. Influence of cell size on out of plane stiffness and in-plane compliance character of the sandwich beam made with tunable PCTPE nylon honeycomb core and hybrid polymer nanocomposite skin / S. K. Sahu [et al.] // *International Journal of Mechanical Sciences*. 2018. No. 148. P. 284–292.
12. Sahu S. K., Badgayan N. D., Sreekanth P. S. R. Numerical investigation on the effect of wall thickness on quasistatic crushing properties of nylon honeycomb structure // *Materials Today: Proceedings*. 2019. No. 12. P. 351–362. DOI: 10.1016/j.matpr.2019.12.351.
13. Usami T., Ge H. B. Analyzing the strength and ductility of plated structures // *Civil and Structural Engineering*. 2022. No. 1. P. 365–401.
14. Surjadi J. U., Gao L. Mechanical Metamaterials and Their Engineering Applications // *Advanced Engineering Materials*. 2019. No. 21. P. 1–21.
15. Evans K. E., Alderson K. L. Auxetic materials: the positive side of being negative // *Engineering Science and Education*. 2000. No. 5. P. 148–154.
16. Evans K. E., Alderson A. Auxetic materials: Functional materials and structures from lateral thinking // *Advanced Materials*. 2000. Vol. 12, no. 9. P. 617–628.
17. Evans K. E. Tailoring the negative Poisson's ratio // *Chemistry & Industry*. 1990. Vol. 20. P. 654–657.
18. Liquid-crystal-elastomer-based dissipative structures by digital light processing 3D printing / N. A. Traugott [et al.] // *Advanced Materials*. 2020. No. 1. P. 797–809. DOI: 10.1002/adma.202000797.
19. Electroconductive melt electrowritten patches matching the mechanical anisotropy of human myocardium / D. Olvera [et al.] // *Advanced Functional Materials*. 2020. No. 9. P. 880–892. DOI: 10.1002/adfm.201909880.
20. Auxetic cardiac patches with tunable mechanical and conductive properties toward treating myocardial infarction / M. Kapnisi [et al.] // *Advanced Functional Materials*. 2018. No. 1. P. 618–627. DOI: 10.1002/adfm.201800618.
21. A novel auxetic structure-based bone screw design: tensile mechanical characterization and pullout fixation strength evaluation / Y. Yao [et al.] // *Materials and Design*. 2020. No. 188. P. 424–431. DOI: 10.1016/j.matdes.2019.108424.
22. Rationally designed meta-implants: a combination of auxetic and conventional meta-biomaterials / H. M. A. Kolken [et al.] // *Materials Horizons*. 2018. No. 5 (1). P. 28–35.
23. 4D printing of personalized shape memory polymer vascular stents with negative Poisson's ratio structure: a preliminary study / C. Lin [et al.] // *Science China Technological Sciences*. 2020. No. 63 (4). P. 578–588.
24. Pluripotent stem cell expansion and neural differentiation in 3-D scaffolds of tunable Poisson's ratio / Y. Yan [et al.] // *Acta Biomaterialia*. 2017. No. 49. P. 192–203.
25. Liu Q. Literature Review: Materials with Negative Poisson's Ratios and Potential Applications to Aerospace and Defence // *Materials World*. 2000. Vol. 8. P. 12–14.
26. Garber A. M. Pyrolytic materials for thermal protection systems // *Aerospace Engineering*. 1963. Vol. 22. P. 126–137.
27. McMullan P. J., Kumar S., Griffin A. C. Textile fibres engineered from molecular auxetic polymers // *Institute of Technology*. 2004. P. 28.
28. Lakes R. S. Polyhedron cell structure and method of making same // *International Patent Publication*. 1987. No. WO88/00523. P. 7.
29. Lakes R. S. Advances in negative Poisson's ratio materials // *Advanced Materials*. 1993. Vol. 5. P. 293–296.
30. Choi J. B., Lakes R. S. Design of a fastener based on negative Poisson's ratio foam // *Cellular Polymers*. 1991. Vol. 10. P. 205–212.
31. Prous G. Z. Solutions for a safe landing are on the horizon // *DSTO Connections*. 2005. No. 98. P. 3.
32. Grima J. N., Alderson A., Evans K. E. An alternative explanation for the negative Poisson's ratios in auxetic foams // *Journal of the Physical Society of Japan*. 2005. Vol. 74, no. 4. P. 1341–1342.

33. Smith W. A. Optimizing electromechanical coupling in piezocomposites using polymers with negative Poisson's ratio // IEEE. 1991. P. 661–666.
34. Jones D. I. G. Handbook of viscoelastic vibration damping. New York: John Wiley & Sons. Ltd., 2001. 416 p.
35. Mark A. G., Palagi S. Auxetic metamaterial simplifies soft robot design // IEEE. 2016. No. 74. P. 877–886. DOI: 10.1109/ICRA.2016.7487701.
36. Jin X., Hou C. Investigation on the static and dynamic behaviors of non-pneumatic tires with honeycomb spokes // Composite Structures. 2017. P. 27.
37. Energy absorption and self-sensing performance of 3D printed CF/PEEK cellular composites Deshpande / J. J. Andrew [et al.] // Materials & Design. 2021. No. 208. P. 1–32.
38. Compressive behavior of auxetic structural metamaterial for lightweight construction using ANSYS static structural analysis / M. Shrutia [et al.] // Materials Today: Proceedings. 2021. Vol. 38. P. 12–17. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.05.410.
39. Budarapu P. R., Sudhir Sastry Y. B., Natarajan R. Design concepts of an aircraft wing: composite and morphing airfoil with auxetic structures // Aerospace Engineering. 2016. No. 3. P. 52–67. DOI: 10.1007/S11709-016-0352-Z.
40. Morphing skins / C. Thill [et al.] // Aeronautical Journal. 2008. No. 112 (1129). P. 117–139.
41. Mechanical design and multifunctional applications of chiral mechanical metamaterials: a review / W. Wu [et al.] // Materials and Design. 2019. No. 180. P. 1–34.
42. Arredondo-Soto M., Cuan-Urquizo E., Gómez-Espinosa A. A Review on Tailoring Stiffness in Compliant Systems, via Removing Material: Cellular Materials and Topology Optimization // Applied Sciences. 2021. No. 11 (8). P. 1–23.
43. Magesh M., Jawahar P. K. Examination of shape memory polymer-auxetic landing gears on landing approach for quadcopter // Materials Today Proceedings. 2021. No. 47 (3). P. 1–18.
44. Magesh M., Jawahar P. K. Aerodynamics of Drones with Auxetic Landing Gears During Perching Conditions // International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering. 2019. Vol. 9. P. 25–34.
45. Najafi M., Ahmadi H., Liaghat G. Experimental investigation on energy absorption of auxetic structures // Materials Today Proceedings. 2020. No. 34 (4792). P. 241–263.

References

1. Sahu S. K., Badgayan N. D., Samanta S., Sreekanth P. S. R. Quasistatic and dynamic nanomechanical properties of HDPE reinforced with 0/1/2-dimensional carbon nanofillers based hybrid nanocomposite using nanoindentation. *Materials Chemistry and Physics*, 2018, no. 203, pp. 173–184.
2. Badgayan N. D., Sahu S. K., Samanta S., Sreekanth P. S. R. Quasistatic and dynamic nanomechanical properties of HDPE reinforced with 0/1/2-dimensional carbon nanofillers based hybrid nanocomposite using nanoindentation. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 2018, no. 80, pp. 180–188.
3. Sahu S. K., Badgayan N. D., Samanta S., Sreekanth P. S. R. Experimental investigation on multidimensional carbon nanofiller reinforcement in HDPE: An evaluation of mechanical performance. *Materials Today Processing*, 2020, no. 24, pp. 415–421.
4. Badgayan N. D., Sahu S. K., Samanta S., Sreekanth P. S. R. An insight into mechanical properties of polymer nanocomposites reinforced with multidimensional filler system: A state of art review. *Materials Today Processing*, 2020, no. 24, pp. 422–431.
5. Sahu S. K., Badgayan N. D., Samanta S., Sreekanth P. S. R. Dynamic mechanical thermal analysis of high-density polyethylene reinforced with nanodiamond, carbon nanotube and graphite nanoplatelet. *Materials Science Forum 917*, 2018, pp. 27–31.

6. Badgayan N. D., Sahu S. K., Samanta S., Sreekanth P. S. R. Assessment of bulk mechanical properties of HDPE hybrid composite filled with 1D/2D nanofiller system. *Materials Science Forum* 917, 2018, pp. 12–16.
7. Kumar P. S., Vinayak M. S., Vaishak V. N., Deepthi P. Experimental investigation on tribological properties of PTFE based composite. *AIP Conference Proceedings* 2148, 2019, no. 03, pp. 23–32.
8. Badgayan N. D., Samanta S., Sahu S. K., Siva S. B. V., Sadasivuni K. K., Sahu D., Sreekanth P. S. R. Tribological behaviour of 1D and 2D nanofiller based high density polyethylene hybrid nanocomposites: A run-in and steady state phase analysis. *Wear*, 2017, no. 376–377, pp. 1379–1390.
9. Sahu S. K., Badgayan N. D., Sreekanth P. S. R. Understanding the influence of contact pressure on the wear performance of HDPE/multi-dimensional carbon filler-based hybrid polymer nanocomposites. *Wear*, 2019, no. 438–439, pp. 1–10.
10. Badgayan N. D., Sahu S. K., Samanta S., Sreekanth P. S. R. Evaluation of Dynamic Mechanical and Thermal Behavior of HDPE Reinforced with MWCNT/h-BNNP: An Attempt to Find Possible Substitute for a Metallic Knee in Transfemoral Prosthesis. *International Journal of Thermophysics*, 2019, no. 40, pp. 1–20.
11. Sahu S. K., Badgayan N. D., Samanta S., Sahu D., Sreekanth P. S. R. Influence of cell size on out of plane stiffness and in-plane compliance character of the sandwich beam made with tunable PCTPE nylon honeycomb core and hybrid polymer nanocomposite skin. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2018, no. 148, pp. 284–292.
12. Sahu S. K., Badgayan N. D., Sreekanth P. S. R. Numerical investigation on the effect of wall thickness on quasistatic crushing properties of nylon honeycomb structure. *Materials Today: Proceedings*, 2019, no. 12, pp. 351–362. DOI: 10.1016/j.matpr.2019.12.351.
13. Usami T., Ge H. B. Analyzing the strength and ductility of plated structures. *Civil and Structural Engineering*, 2022, no. 1, pp. 365–401.
14. Surjadi J. U., Gao L. Mechanical Metamaterials and Their Engineering Applications. *Advanced Engineering Materials*, 2019, no. 21, pp. 1–21.
15. Evans K. E., Alderson K. L. Auxetic materials: the positive side of being negative. *Engineering Science and Education*, 2000, no. 5, pp. 148–154.
16. Evans K. E., Alderson A. Auxetic materials: Functional materials and structures from lateral thinking. *Advanced Materials*, 2000, vol. 12, no. 9, pp. 617–628.
17. Evans K. E. Tailoring the negative Poisson's ratio. *Chemistry & Industry*, 1990, vol. 20, pp. 654–657.
18. Traugott N. A., Mistry D., Luo C., Yu K. Liquid-crystal-elastomer-based dissipative structures by digital light processing 3D printing. *Advanced Materials*, 2020, no. 1, pp. 797–809. DOI: 10.1002/adma.202000797.
19. Olvera D., Sohrabi Molina M., Henty G., Monaghan M. G. Electroconductive melt electrowritten patches matching the mechanical anisotropy of human myocardium. *Advanced Functional Materials*, 2020, no. 9, pp. 880–892. DOI: 10.1002/adfm.201909880.
20. Kapnisi M., Mansfield C., Marijon C., Guex A. G., Perbellini F., Bardy I., Humphrey E. J., Puetzer J. L., Mawad D., Koutsogeorgis D. C., Stuckey D. J., Terracciano C. M., Harding S. E., Stevens M. M. Auxetic cardiac patches with tunable mechanical and conductive properties toward treating myocardial infarction. *Advanced Functional Materials*, 2018, no. 1, pp. 618–627. DOI: 10.1002/adfm.201800618.
21. Yao Y., Wang L., Li J., Tian S. A novel auxetic structure-based bone screw design: tensile mechanical characterization and pullout fixation strength evaluation. *Materials and Design*, 2020, no. 188, pp. 424–431. DOI: 10.1016/j.matdes.2019.108424.
22. Kolken H. M. A., Janbaz S., Leeflang M., Lietaert K. Rationally designed meta-implants: a combination of auxetic and conventional meta-biomaterials. *Materials Horizons*, 2018, no. 5 (1), pp. 28–35.
23. Lin C., Zhang L., Liu Y., Liu L., Leng J. 4D printing of personalized shape memory polymer vascular stents with negative Poisson's ratio structure: a preliminary study. *Science China Technological Sciences*, 2020, no. 63 (4), pp. 578–588.

24. Yan Y., Li Y., Song L., Zeng C., Li G. Pluripotent stem cell expansion and neural differentiation in 3-D scaffolds of tunable Poisson's ratio. *Acta Biomaterialia*, 2017, no. 49, pp. 192–203.
25. Liu Q. Literature Review: Materials with Negative Poisson's Ratios and Potential Applications to Aerospace and Defence. *Materials World*, 2000, vol. 8, pp. 12–14.
26. Garber A. M. Pyrolytic materials for thermal protection systems. *Aerospace Engineering*, 1963, vol. 22, pp. 126–137.
27. McMullan P. J., Kumar S., Griffin A. C. Textile fibres engineered from molecular auxetic polymers. *Institute of Technology*, 2004, p. 28.
28. Lakes R. S. Polyhedron cell structure and method of making same. *International Patent Publication*, 1987, no. WO88/00523, p. 7.
29. Lakes R. S. Advances in negative Poisson's ratio materials. *Advanced Materials*, 1993, vol. 5, pp. 293–296.
30. Choi J. B., Lakes R. S. Design of a fastener based on negative Poisson's ratio foam. *Cellular Polymers*, 1991, vol. 10, pp. 205–212.
31. Prous G. Z. Solutions for a safe landing are on the horizon. *DSTO Connections*, 2005, no. 98, p. 3.
32. Grima J. N., Alderson A., Evans K. E. An alternative explanation for the negative Poisson's ratios in auxetic foams. *Journal of the Physical Society of Japan*, 2005, vol. 74, no. 4, pp. 1341–1342.
33. Smith W. A. Optimizing electromechanical coupling in piezocomposites using polymers with negative Poisson's ratio. *IEEE*, 1991, pp. 661–666.
34. Jones D. I. G. Handbook of viscoelastic vibration damping. New York, John Wiley & Sons. Ltd., 2001. 416 p.
35. Mark A. G., Palagi S. Auxetic metamaterial simplifies soft robot design. *IEEE*, 2016, no. 74, pp. 877–886. DOI: 10.1109/ICRA.2016.7487701.
36. Jin X., Hou C. Investigation on the static and dynamic behaviors of non-pneumatic tires with honeycomb spokes. *Composite Structures*, 2017, p. 27.
37. Andrew J. J., Alhashmi H., Schiffer A., Kumar S. Energy absorption and self-sensing performance of 3D printed CF/PEEK cellular composites Deshpande. *Materials & Design*, 2021, no. 208, pp. 1–32.
38. Shrutia M., Hemanth N. S., Bagdayan N. D., Sahu S. K. Compressive behavior of auxetic structural metamaterial for lightweight construction using ANSYS static structural analysis. *Materials Today: Proceedings*, 2021, vol. 38, pp. 12–17. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.05.410.
39. Budarapu P. R., Sudhir Sastry Y. B., Natarajan R. Design concepts of an aircraft wing: composite and morphing airfoil with auxetic structures. *Aerospace Engineering*, 2016, no. 3, pp. 52–67. DOI: 10.1007/S11709-016-0352-Z.
40. Thill C., Etches J., Bond I. P., Potter K. Morphing skins. *Aeronautical Journal*, 2008, no. 112 (1129), pp. 117–139.
41. Wu W., Hu W., Qian G., Liao H., Xu., Berto F. Mechanical design and multifunctional applications of chiral mechanical metamaterials: a review. *Materials and Design*, 2019, no. 180, pp. 1–34.
42. Arredondo-Soto M., Cuan-Urquizo E., Gómez-Espinosa A. A Review on Tailoring Stiffness in Compliant Systems, via Removing Material: Cellular Materials and Topology Optimization. *Applied Sciences*, 2021, no. 11 (8), pp. 1–23.
43. Magesh M., Jawahar P. K. Examination of shape memory polymer-auxetic landing gears on landing approach for quadcopter. *Materials Today Proceedings*, 2021, no. 47 (3), pp. 1–18.
44. Magesh M., Jawahar P. K. Aerodynamics of Drones with Auxetic Landing Gears During Perching Conditions. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*, 2019, vol. 9, pp. 25–34.
45. Najafi M., Ahmadi H., Liaghat G. Experimental investigation on energy absorption of auxetic structures. *Materials Today Proceedings*, 2020, no. 34 (4792), pp. 241–263.

Информация об авторах

Говоровский Вадим Олегович – аспирант кафедры полимерных и композиционных материалов. Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: govov746@gmail.com.

Прокопчук Николай Романович – член-корреспондент НАН Беларуси, заслуженный деятель науки Республики Беларусь, доктор химических наук, профессор, профессор кафедры полимерных и композиционных материалов. Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: prli171951@gmail.com. SPIN-код: 3126-7297. Scopus ID: 7005521371. ORCID: 0000-0001-7290-1199. ResearcherID: ABA-5557-2020.

Любимов Александр Геннадьевич – кандидат технических наук, доцент, докторант кафедры полимерных композиционных материалов. Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: lubimov@belstu.by. Scopus ID: 56861963200. ORCID: 0000-0002-0229-9937. ResearcherID: H-5492-2016.

Касперович Ольга Михайловна – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры полимерных и композиционных материалов. Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: kasperovichvolha@yandex.by. SPIN-код: 7558-2597. Scopus ID: 6504122970. ORCID: 0000-0002-1203-5206.

Information about the authors

Govorovskiy Vadim Olegovich – PhD student, the Department of Polymer Composite Materials. Belarusian State Technological University (13a Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: govov746@gmail.com.

Prokopchuk Nikolay Romanovich – Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Belarus, Honored Scientist of the Republic of Belarus, DSc (Chemistry), Professor, Professor, the Department of Polymer Composite Materials. Belarusian State Technological University (13a Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: prli171951@gmail.com. SPIN code: 3126-7297. Scopus ID: 7005521371. ORCID: 0000-0001-7290-1199. ResearcherID: ABA-5557-2020.

Liubimau Aleksandr Gennad'yevich – PhD (Engineering), Associate Professor, post-doctoral student, the Department of Polymer Composite Materials. Belarusian State Technological University (13a Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: lubimov@belstu.by. Scopus ID: 56861963200. ORCID: 0000-0002-0229-9937. ResearcherID: H-5492-2016.

Kasperovich Volha Mikhaylovna – PhD (Engineering), Associate Professor, Assistant Professor, the Department of Polymer Composite Materials. Belarusian State Technological University (13a Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: kasperovichvolha@yandex.by. SPIN code: 7558-2597. Scopus ID: 6504122970. ORCID: 0000-0002-1203-5206.

Поступила 05.12.2025