

АУКСЕТИЧЕСКИЕ МЕХАНИЧЕСКИЕ МЕТАМАТЕРИАЛЫ: ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ В АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЯХ

Ермиенко И. Ю.¹

¹Томский политехнический университет, г. Томск, ivanermuch@gmail.com

Ключевые слова: ауксетические механические метаматериалы, авиационное производство, отрицательный коэффициент Пуассона, аддитивные технологии.

Современные авиационные двигатели – это высокотехнологичные устройства, работающие в экстремальных условиях высоких температур, давлений и динамических нагрузок, что требует применения материалов с уникальными свойствами [1–4]. Развитие аддитивных технологий открывает новые возможности в этой области, позволяя создавать ауксетические механические метаматериалы (АММ) [5]. АММ – это искусственно созданные материалы с отрицательным коэффициентом Пуассона (ОКП), который определяется их структурой [6]. Это значит, что при растяжении они расширяются не только в направлении приложенной силы, но и в перпендикулярном направлении. Благодаря этому, ауксетические материалы обладают рядом преимуществ по сравнению с традиционными материалами, такими как: повышенная сопротивляемость к сдвигу и вдавливанию, синкластическая кривизна [5–9]. Эти свойства делают АММ перспективными для создания более легких, твердых материалов, способных эффективно поглощать энергию удара и вибрации.

Способность материалов поглощать ударную энергию объектов, таких как: птицы, мелкие частицы, вулканический пепел и лед, а также сопротивление внедрению этих частиц, являются ключевыми критериями, определяющими работоспособность авиационных двигателей. Улучшенные характеристики АММ в области поглощения энергии исследуются с 1990-х годов. Исследования, проведенные с использованием взрывной нагрузки, показали, что АММ эффективнее распределяют энергию взрыва по сравнению с традиционными материалами, снижая прогиб панели на 56% [10]. Также отмечается повышенное поглощение энергии при комбинировании материалов, например, использование сдвигающейся загустевшей жидкости в ауксетичной пене, что позволяет увеличить затухание ударной нагрузки в 1,5 раза [11]. Кроме того, АММ могут быть почти вдвое тверже обычных материалов. Важно учитывать, что сопротивление вдавливанию (твердость) ауксетических сотовых структур зависит от соотношения толщины стенок и относительной плотности [12,13]. Это позволяет контролировать сочетание твердости и поглощения энергии, делая АММ перспективным материалом для создания многослойных конструкций с повышенной стойкостью к ударным нагрузкам.

Помимо повышенной ударопрочности, ауксетические материалы привлекательны уникальными акустическими свойствами. Благодаря пространственному повторению ячеек в ауксетической решетке, можно контролировать распространение волн, создавая полосы пропускания и заграждения [14, 15]. Это открывает возможности для создания эффективных систем виброизоляции [16] и снижения шума, производимого двигателем.

Однако, несмотря на многообещающие характеристики, внедрению АММ в авиастроение препятствуют такие факторы, как: низкий модуль Юнга, низкая удельная прочность и недостаточная изученность влияния усталости и температуры на их характеристики. Например, в то время как титан обладает модулем Юнга примерно 112 ГПа, модуль Юнга ауксетических материалов, в зависимости от структуры, может составлять приблизительно 10% от этого значения и ниже [17]. Тем не менее исследования показывают, что эту проблему можно решить путем армирования АММ [18] или использованием АММ с более жесткой структурой [19], что позволяет добиться значительного повышения жесткости и эффективности поглощения энергии при вдавливании.

Вопрос влияния температуры на ауксетические материалы также требует дальнейшего изучения, так как полученные на сегодняшний день данные являются

противоречивыми. Структура на основе фуллерена C36, обладающая изотропными свойствами и сочетающая в себе: высокую энергетическую, динамическую, термическую и механическую стабильность, а также ауксетичность, обладает полупроводниковыми свойствами и низкой теплопроводностью [20]. С другой стороны, есть данные о том, что теплопроводность ауксетических структур увеличивается при растяжении в 7 раз [21].

Наряду с температурой, циклические нагрузки, приводящие к усталости материала, являются еще одним важным фактором, который необходимо учитывать при разработке авиационных двигателей. В отношении АММ исследования усталости находятся на начальном этапе. Известно, что ауксетический пенополиуретан обладает низким сопротивлением усталости. Причиной этого является повышенная хрупкость ауксетического пенополиуретана из-за большего количества разломов ребер в микроструктуре, которые, вероятно, возникают во время производства не аддитивным методом, что приводит к их ускоренному разрушению при циклическом нагружении [22].

Анализ научной литературы демонстрирует, что ауксетические материалы, обладая улучшенными механическими и акустическими свойствами, а также повышенной устойчивостью к разрушению, имеют потенциал для усовершенствования авиационных двигателей. В частности, создание двухслойной лопатки вентилятора авиадвигателя из ауксетика или ауксетического композита может увеличить твердость и эффективное поглощение энергии. Также ауксетики могут служить в качестве виброизоляции. Однако, для реализации этого потенциала необходимо провести дальнейшие исследования, направленные на повышение жесткости и удельной прочности АММ, а также на детальное изучение их поведения при высоких температурах и циклических нагрузках, характерных для работы авиационных двигателей. Успешное решение этих задач откроет путь к созданию нового поколения авиационных двигателей с повышенной надежностью, эффективностью и безопасностью.

Список литературы

1. Suhrutha K., Srinivas G. Recent Developments of Materials used in Air breathing and Advanced Air breathing Engines // IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng. 2020. Vol. 872. № 1. P. 012082.
2. Parveez B. et al. Scientific Advancements in Composite Materials for Aircraft Applications: A Review: 22 // Polymers. Multidisciplinary Digital Publishing Institute. 2022. Vol. 14. № 22. P. 5007.
3. Belan J., Vaško A., Kuchariková L. A brief overview and metallography for commonly used materials in aero jet engine construction // Prod. Eng. Arch. 2017. Vol. 17. № 17. P. 8-13.
4. Recent advances in the development of aerospace materials // Prog. Aerosp. Sci. Pergamon. 2018. Vol. 97. P. 22-34.
5. On local indentation and impact compliance of isotropic auxetic materials from the continuum mechanics viewpoint // Int. J. Eng. Sci. Pergamon. 2012. Vol. 54. P. 42-57.
6. Chan N., Evans K.E. Indentation Resilience of Conventional and Auxetic Foams // J. Cell. Plast. SAGE Publications Ltd STM, 1998. Vol. 34. № 3. P. 231-260.
7. Lakes R. Foam Structures with a Negative Poisson's Ratio // Science. American Association for the Advancement of Science. 1987. Vol. 235. № 4792. P. 1038-1040.
8. Whitty J., Nazare F., Alderson A. Modelling the effects of density variations on the in-plane Poisson's ratios and Young's Moduli of periodic conventional and re-entrant honeycombs - Part 1: Rib thickness variations. // IMRI J. Artic. Peer-Rev. 2002. Vol. 21.
9. Choi J.B., Lakes R.S. Non-linear properties of metallic cellular materials with a negative Poisson's ratio // J. Mater. Sci. 1992. Vol. 27. № 19. P. 5375-5381.
10. Imbalzano G. et al. Three-dimensional modelling of auxetic sandwich panels for localised impact resistance // J. Sandw. Struct. Mater. SAGE Publications. 2017. Vol. 19, № 3. P. 291-316.

11. Tahir D., Zhang M., Hu H. Auxetic Materials for Personal Protection: A Review // Phys. Status Solidi B. 2022. Vol. 259. № 12. P. 2200324.
12. Dynamic indentation of auxetic and non-auxetic honeycombs under large deformation // Compos. Struct. Elsevier, 2019. Vol. 207. P. 323-330.
13. Li Z., Wang K.F., Wang B.L. Indentation resistance of brittle auxetic structures: Combining discrete representation and continuum model // Eng. Fract. Mech. 2021. Vol. 252. P. 107824.
14. Ruzzene M., Scarpa F., Soranna F. Wave beaming effects in two-dimensional cellular structures // Smart Mater. Struct. 2003. Vol. 12. № 3. P. 363.
15. Phani A.S., Woodhouse J., Fleck N.A. Wave propagation in two-dimensional periodic lattices // J. Acoust. Soc. Am. 2006. Vol. 119. № 4. P. 1995-2005.
16. Shiyin X., Xiuchang H., Hongxing H. A study on the isolation performance of trichiral lattices with gradient geometry // J. Vib. Control. SAGE Publications Ltd STM. 2015. Vol. 21. № 16. P. 3465-3475.
17. Montgomery-Liljeroth E., Schievano S., Burriesci G. Elastic properties of 2D auxetic honeycomb structures- a review // Appl. Mater. Today. 2023. Vol. 30. P. 101722.
18. Li T., Liu F., Wang L. Enhancing indentation and impact resistance in auxetic composite materials // Compos. Part B Eng. 2020. Vol. 198. P. 108229.
19. Lu C. et al. Architectural Design and Additive Manufacturing of Mechanical Metamaterials: A Review // Engineering. 2022. Vol. null. P. null.
20. A novel two-dimensional C36 fullerene network; an isotropic, auxetic semiconductor with low thermal conductivity and remarkable stiffness // Mater. Today Nano. Elsevier. 2023. Vol. 21. P. 100280.
21. Unprecedented mechanical response of the lattice thermal conductivity of auxetic carbon crystals // Carbon. Pergamon. 2017. Vol. 122. P. 374-380.
22. Chaithanya Vinay V., Mohan Varma D.S. Fabrication and Testing of Auxetic Foams for Rehabilitation Applications // J. Indian Inst. Sci. 2019. Vol. 99. № 3. P. 511-518.

Сведения об авторах

Ермиенко Иван Юрьевич, аспирант. Область научных интересов: ауксетические механические метаматериалы.

AUXETIC MECHANICAL METAMATERIALS: APPLICATION PROSPECTS IN AIRCRAFT ENGINES

Ermienko I. Yu.

Keywords: auxetic mechanical metamaterials, aircraft manufacturing, negative Poisson's ratio, additive technologies.

The article discusses the potential application of auxetic mechanical metamaterials (AMM) - artificially created materials with negative Poisson's ratio - in the design of aircraft engines. The advantages of AMM are analyzed, such as: increased impact resistance, sound absorption and resistance to destruction, which can contribute to increasing the efficiency and reliability of engines. At the same time, the insufficient study of the influence of high temperatures and cyclic loads on AMM is revealed, as well as the need to solve the problem of their reduced stiffness and specific strength for successful integration into aircraft construction.