

**ПРОЧНОСТЬ АУКСЕТИЧЕСКИХ МЕХАНИЧЕСКИХ МЕТАМАТЕРИАЛОВ:
ОБЗОР ФАКТОРОВ ВЛИЯНИЯ**

И. Ю. ЕРМИЕНКО

Национальный исследовательский Томский политехнический университет

E-mail: ivanermuch@gmail.com

Ауксетические метаматериалы, благодаря своей способности расширяться в поперечном направлении при растяжении (отрицательный коэффициент Пуассона), представляют собой перспективный класс материалов для применения в эндопротезирование, сейсмозащите, авиации и т.д. Актуальность исследования прочности ауксетических метаматериалов обусловлена необходимостью обеспечения надежности и долговечности конструкций, работающих в условиях сложного нагружения. Данная статья представляет собой обзор влияния свойств базового материала и геометрии структуры на прочность ауксетических метаматериалов. Новизна работы заключается в систематизации и обобщении разрозненных данных из научных публикаций, посвященных прочности ауксетических структур, с акцентом на количественные показатели и их интерпретацию с точки зрения влияния геометрии и материала. Цель обзора провести количественный анализ влияния свойств базового материала и геометрии структуры на прочностные характеристики ауксетических механических метаматериалов.

Одним из ключевых факторов, определяющих прочность ауксетических метаматериалов, являются свойства используемого базового материала. Как видно из рисунка 1а, материалы играют решающую роль в определении предела текучести. Металлы, такие как титан и его сплавы [1, 2, 3, 4, 5, 6], демонстрируют высокие абсолютные значения предела текучести. Например, структура возвратные соты (Re-entrant honeycomb 1) из Ti-6Al-4V ELI [3] достигает предела текучести в 280 МПа. Однако, это значение примерно в 3 раза меньше, чем предел текучести исходного материала (880 МПа), что указывает на существенное влияние геометрии и пористости на эффективную прочность. Полимерные материалы, как правило, демонстрируют более низкие значения относительного предела текучести (предел текучести структуры/предел текучести материала) по сравнению с металлами (рисунок 1а). Однако, при относительной плотности около 0,4, структуры Re-entrant double arrowhead honeycomb (RDAH) и Augmented Re-entrant double arrowhead honeycomb (ARDAH)[4] из фотополимерной смолы имеют более высокий относительный предел текучести, чем структуры возвратные медовые соты (Re-entrant honeycomb (RH)) и возвратные медовые соты 1, 2 (Re-entrant honeycomb 1, 2 (RH 1, 2)) из Ti-6Al-4V [3, 6] (рисунок 1 б.). Возвратные с двойным наконечником стрелы для повторного входа (Augmented Re-entrant double arrowhead honeycomb (ARDAH)) достигает максимального структурного коэффициента текучести 0,3375 (рисунок 2)[2]. При плотности 0,2 структуры “Возвратные двойные стрелы” (Re-entrant double arrowhead honeycomb (RDAH)) из AlSi10Mg [4] также превосходят по относительному пределу текучести возвратные соты 1, 2 из Ti-6Al-4V [3].

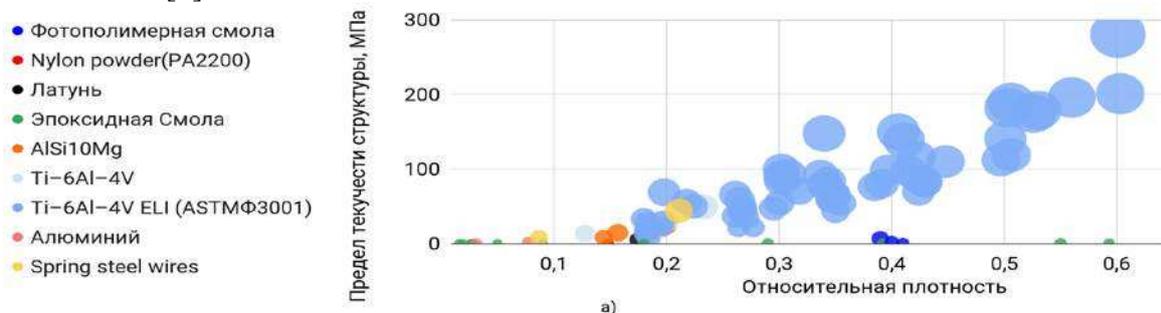


Рисунок 1. График отношения предела текучести и относительной плотности ауксетических структур из разных материалов: а) только материалы б) только структуры [1, 2, 3, 4, 6, 7, 8]

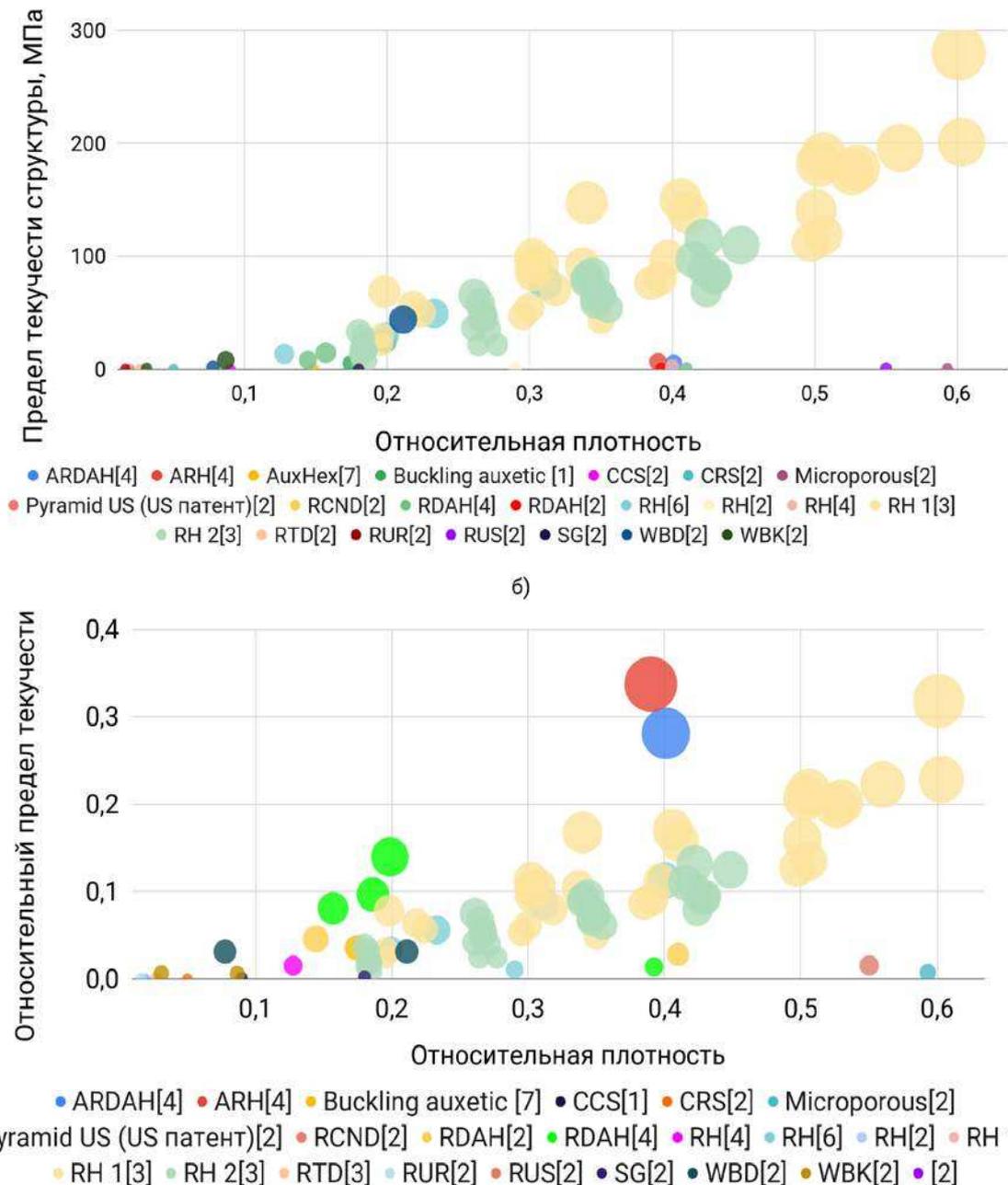


Рисунок 2. График отношения относительного предела текучести и относительной плотности

Помимо свойств материала, существенное влияние на прочность ауксетических метаматериалов оказывает геометрия их структуры. Для структур типа re-entrant [3, 5, 6] ключевыми параметрами являются угол возврата (θ), отношение сторон ребра (a/b) и отношение толщин. Чем острее внутренний угол (θ), тем выше коэффициент Пуассона, но ниже предел текучести. Предел текучести может увеличиваться либо уменьшаться в 1,2–1,8 раза в зависимости от угла. Увеличение отношения сторон ребра (a/b) может как увеличивать максимум предел текучести в 1.8 так и максимум уменьшить в 2.1 [3]. Размер ячейки влияет на относительную плотность и, следовательно, на прочность (рисунок 2): меньшие размеры ячеек и более тонкие стенки приводят к снижению механических свойств [3]. Увеличение толщины стенки, как правило, увеличивает относительную плотность и уменьшает размер пор, что положительно сказывается на пределе текучести [3]. В статье [1] показано, что коэффициент масштабирования рисунка (PSF) и объемная доля влияют на механические свойства структуры. В [9] изменяя

геометрию повторяющегося элемента, можно контролировать значение коэффициента Пуассона.

Исходя из представленного обзора литературы, можно сделать следующие выводы, что прочность ауксетических метаматериалов является результатом сложного взаимодействия свойств базового материала, геометрических особенностей структуры. Наиболее значимыми геометрическими параметрами, влияющими на предел текучести и прочность, являются угол возврата, отношение сторон ребра, относительная плотность, размеры ячейки и толщина стенки. Выбор материала определяет абсолютные значения прочности, а геометрия позволяет "настраивать" механические свойства в широком диапазоне, адаптируя метаматериал под конкретные требования.

Полученные в ходе обзора данные подчеркивают необходимость дальнейших исследований, направленных на: разработку аналитических моделей, учитывающих взаимосвязь между геометрией, материалом и прочностными характеристиками различных типов ауксетических структур; оптимизацию параметров аддитивного производства для повышения прочности и снижения анизотропии печатных метаматериалов; исследование долговременной прочности и усталостной стойкости ауксетических метаматериалов при различных режимах нагружения.

Список литературы

1. Experiments and parametric studies on 3D metallic auxetic metamaterials with tuneable mechanical properties / X. Ren, J. Shen, A. Ghaedizadeh [et al.] // *Smart Materials and Structures*. – 2015. – Vol. 24, № 9. – P. 095016.
2. Han S.C. Two nature-mimicking auxetic materials with potential for high energy absorption / S.C. Han, D.S. Kang, K. Kang // *Materials Today*. – 2019. – Vol. 26. – P. 30-39.
3. Mechanical performance of auxetic meta-biomaterials / H. M. A. Kolken, K. Lietaert, T. van der Sloten [et al.] // *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*. – 2020. – Vol. 104. – P. 103658.
4. Novel Negative Poisson's Ratio Lattice Structures with Enhanced Stiffness and Energy Absorption Capacity / Z. Chen, Z. Wang, S. Zhou [et al.] // *Materials*. – 2018. – Vol. 11, № 7. – P. 1095.
5. Large deformation of an auxetic structure in tension: Experiments and finite element analysis // *Composite Structures*. – 2018. – Vol. 184. – Large deformation of an auxetic structure in tension. – P. 92-101.
6. Compressive properties of Ti-6Al-4V auxetic mesh structures made by electron beam melting // *Acta Materialia*. – 2012. – Vol. 60. – № 8. – P. 3370-3379.
7. Mechanical properties and energy absorption capability of AuxHex structure under in-plane compression: Theoretical and experimental studies / M. Xu, Z. Xu, Z. Zhang [et al.] // *International Journal of Mechanical Sciences*. – 2019. – Vol. 159. – Mechanical properties and energy absorption capability of AuxHex structure under in-plane compression. – P. 43-57.
8. Novel auxetic structures with enhanced mechanical properties / X. Li, Q. Wang, Z. Yang, Z. Lu // *Extreme Mechanics Letters*. – 2019. – Vol. 27. – P. 59-65.
9. Semianalytical Geometry-Property Relationships for Some Generalized Classes of Pentamod-like Additively Manufactured Mechanical Metamaterials / R. Hedayati, S. Jedari Salami, Y. Li [et al.] // *Physical Review Applied*. – 2019. – Vol. 11. – № 3. – P. 034057.