

механических свойств создают предпосылки для получения новых градиентных материалов.

*Данное исследование финансировалось Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (Грант № AP23485709).*

## ЛИТЕРАТУРА

1. Al-Mangour B., Grzesiak D., Yang J.-M. In-situ formation of novel TiC-particle-reinforced 316L stainless steel bulk-form composites by selective laser melting. Journal of Alloys and Compounds. 2017. Vol. 706. P. 409-418.

2. Levy A., Miriyev A., Elliott A., Suresh Babu S., Frage N. Additive manufacturing of complex-shaped graded TiC/steel composites. Materials & Design. 2017. Vol.118, P. 198-203.

УДК 678.8

## ПРИМЕНЕНИЕ АУКСЕТИКОВ ПРИ РАЗРАБОТКЕ КРЫЛА С ИЗМЕНЯЕМОЙ ГЕОМЕТРИЕЙ

А.Г. ЛЮБИМОВ, Н.Р. ПРОКОПЧУК, В.О. ГОВОРОВСКИЙ  
Белорусский государственный технологический университет  
ЗАО «Беспилотные летательные аппараты»  
Минск, Беларусь

Крыло является основным несущим элементом беспилотного летательного аппарата (БПЛА). Оно выполняет сразу несколько критически важных функций: создаёт подъёмную силу, определяет аэродинамическое качество, обеспечивает устойчивость в полёте, а также служит конструктивной платформой для размещения оборудования. Традиционные крылья проектируются под определённый режим полёта (чаще всего крейсерский), что обеспечивает оптимальные характеристики только в узком диапазоне условий.

При изменении скорости или угла атаки эффективность таких крыльев снижается: растёт аэродинамическое сопротивление, ухудшается манёвренность и падает устойчивость. Для частичной компенсации этих ограничений используются механизированные поверхности – закрылки, предкрылки, элероны. Однако они вносят дополнительные

недостатки: увеличивают массу, усложняют конструкцию, создают щели и разрывы обшивки, которые вызывают турбулентность и снижают аэродинамическое качество.

В связи с этим возникает необходимость в разработке морфинг-крыльев, способных адаптировать геометрию в полёте. Одним из наиболее перспективных подходов к созданию таких конструкций являются ауксетические метаматериалы – структуры с отрицательным коэффициентом Пуассона. В отличие от обычных материалов, которые при растяжении сужаются поперёк, ауксетики при растяжении расширяются, обеспечивая уникальное сочетание деформируемости и прочности [1].

На рис. 1 приведено схематически поведение обычного и ауксетического материала при растяжении (отрицательный коэффициент Пуассона).

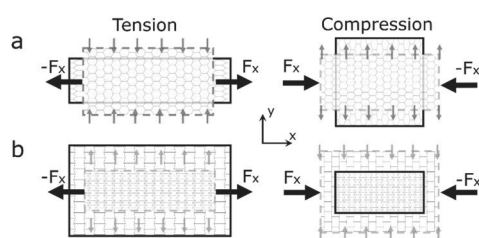


Рис. 1 – Сравнение поведения обычного и ауксетического материала при растяжении (отрицательный коэффициент Пуассона) [1]

Главное свойство ауксетиков – способность изменять геометрию под нагрузкой так, что материал расширяется в поперечном направлении при растяжении и сужается при сжатии. Это открывает ряд преимуществ для авиационных конструкций:

- управляемая деформация профиля – возможность плавно изменять кривизну крыла без применения сложной механизации;
- повышенная энергоёмкость – способность аккумулировать и рассеивать значительные объёмы энергии при ударе или вибрации;
- снижение массы конструкции – отказ от тяжёлых приводов и упрощение внутренней архитектуры крыла;
- устойчивость к повреждениям – перераспределение напряжений по поверхности, что повышает надёжность конструкции.

Ауксетики могут изготавливаться в виде различных ячеистых структур: re-entrant honeycomb, chiral-соты, перфорированные пластины и др. [1]. Каждая из конфигураций имеет свои механические и аэродинамические особенности, что позволяет выбирать оптимальное решение под конкретные условия полёта.

На рисунке 2 показаны примеры ауксетических ячеек (re-entrant, chiral и др.), используемых в морфинг-конструкциях

Одним из ключевых направлений является включение ауксетических сердечников в состав сотовых панелей крыла. Это позволяет изменить геометрию профиля без применения сложных приводов.

В работе Rudresh et al. (2024) рассмотрена модель крыла Eppler-420 с ауксетическим наполнителем. Численные расчёты показали, что такая конструкция повышает резонансные частоты крыла и увеличивает прогиб задней кромки без потери прочности (рисунок 2) [3].

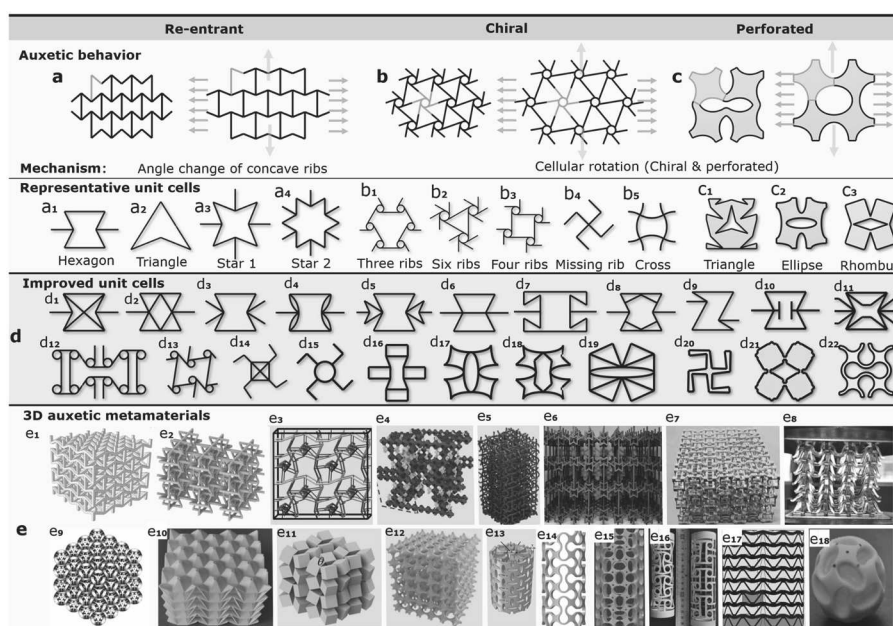


Рис. 2 – Примеры ауксетических ячеек (re-entrant, chiral и др.), используемых в морфинг-конструкциях [1]

Это доказывает, что ауксетики могут заменить классические механизированные элементы и при этом улучшить устойчивость к флаттеру.

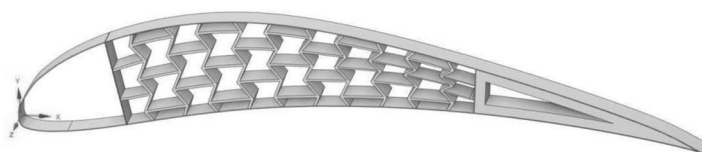


Рис. 3 – Геометрия крыла Eppler-420 с интегрированным ауксетическим сердечником для повышения жёсткости и устойчивости к флаттеру [3]

Ведущая кромка крыла является одной из наиболее уязвимых частей конструкции. При столкновении с птицами или другими объектами она должна сохранять целостность, иначе возникает риск разрушения крыла.

В работе Zhao и соавт. (2025) предложена Arc-Z-образная ауксетическая ячеистая структура для использования в обшивке передней кромки крыла. Численное моделирование удара птицы на скорости

около 125 м/с показало, что применение такой структуры снижает максимальные деформации примерно на 25% по сравнению с традиционными сотовыми заполнителями (рисунок 4) [4].

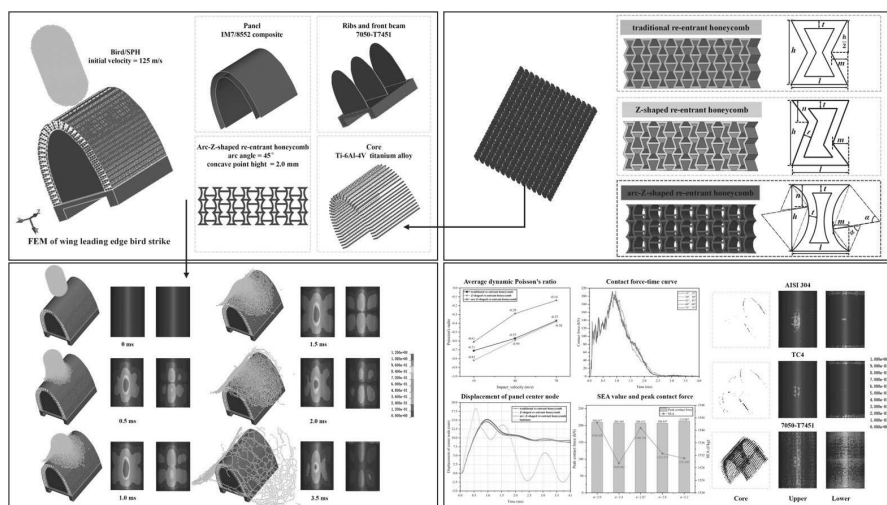


Рис. 4 – Моделирование удара птицы в переднюю кромку крыла с применением Arc-Z-образной ауксетической структуры, сравнение с традиционными сотовыми заполнителями [4].

Таким образом, ауксетики не только обеспечивают морфинг, но и повышают живучесть крыла при экстремальных нагрузках.

Развитие ауксетических материалов идёт по пути интеграции с новыми технологиями:

- интеллектуальные структуры с эффектом shape memory, способные восстанавливаться после деформаций;
- био-вдохновлённые ячейки, копирующие природные геометрии и обладающие многоступенчатой жёсткостью [5];
- использование аддитивных технологий, позволяющих создавать сложные 3D-конфигурации ячеек.

Эти направления делают ауксетики особенно перспективными для применения в авиации, где требуется совмещать лёгкость, адаптивность и прочность. Ауксетические структуры открывают новые возможности для проектирования морфинг-крыльев. Они позволяют:

- изменять профиль крыла без сложной механизации;
- снижать массу конструкции;
- повышать устойчивость к флаттеру и динамическим нагрузкам;
- обеспечивать защиту leading edge от ударов.

Таким образом, ауксетические метаматериалы могут стать основой для разработки крыльев нового поколения, объединяющих адаптивность, энергоэффективность и высокую прочность.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Wang Y., Guo Y., Yang H. Mechanical properties of re-entrant hybrid honeycomb structures for morphing wings // *Biomimetics*. – 2024. – Vol. 9, no. 11. – P. 521. <https://doi.org/10.3390/biomimetics9110521>
2. Zhang Y., et al. Recent advances of auxetic metamaterials in smart materials and structural systems // *Materials & Design*. – 2025. – Vol. 250. – P. 112874. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2025.112874>
3. Rudresh M., Prashanth K.P., Praveen Kumar M.V., Ravikumar M., Sivambika S. Flutter control of aircraft wing using auxetic structures // *Thin-Walled Structures*. – 2024. – Vol. 210. – P. 111937. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2024.111937>
4. Zhao Y., et al. Arc-Z re-entrant honeycomb sandwich panels with rotational deformation mechanism for leading edge structures // *Composite Structures*. – 2025. – Vol. 335. – P. 118782. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2025.118782>
5. Hamzehei R., Bodaghi M., Wu N. Bio-inspired design and 4D printing of multi-stiffness wavy metamaterial energy absorbers/dissipators with shape recovery features // *Engineering Structures*. – 2025. – Vol. 327. – P. 119538. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2025.119538>

УДК 678.8

## ПОЛИМЕРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ АУКСЕТИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ В КОНСТРУКЦИИ БПЛА

А.Г. ЛЮБИМОВ, О.М. КАСПЕРОВИЧ,  
Л.А. ЛЕНАРТОВИЧ, А.Ф. ПЕТРУШЕНЯ

Белорусский государственный технологический университет  
Минск, Беларусь

Перспективы применения полимерных композиционных материалов (ПКМ) в конструкциях беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) весьма многообещающие благодаря ряду преимуществ, которые обеспечивают значительное улучшение характеристик БПЛА. Полимерные композиционные материалы имеют значительно меньшую плотность по сравнению с традиционными материалами (алюминиевыми сплавами и сталью). Это позволяет снизить массу конструкций БПЛА, сохраняя при этом необходимую жесткость и прочность. Например, углепластики обладают прочностью на уровне титана и