

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

стали, при массе всего около четверти металла. Композитные материалы устойчивы к коррозии, воздействию агрессивных сред и ультрафиолетового излучения. Благодаря этому существенно увеличивается срок службы элементов конструкции, особенно критичных для эксплуатации в экстремальных условиях.

Современные технологии производства позволяют создавать детали сложной формы и геометрии непосредственно из полимерных материалов с волокнистым наполнителем, обеспечивая точное соответствие проектируемым аэродинамическим характеристикам. Благодаря своей структуре и составу, полимерные композиты способны эффективно поглощать энергию удара и вибрации, снижая вероятность повреждений при аварийных ситуациях и увеличивая ресурс аппаратуры. Многие виды полимерных композитов демонстрируют высокую температуростойкость, позволяя применять их в зонах двигателей, воздухозаборников и теплонагруженных участках конструкции. Использование легких и прочных композитных крыльев позволяет повысить грузоподъемность аппарата, уменьшить сопротивление воздуха и увеличить дальность полета. Такие крылья часто используются в современных военных дронах типа «Bayraktar TB2» и гражданских моделях вроде DJI Mavic Pro.

Применение полимерных композитов для изготовления корпусов электродвигателей снижает вес, увеличивая массу полезной нагрузки. Аналогично применение лёгких пластиковых каркасов для аккумуляторных батарей помогает минимизировать общий вес и оптимизировать конструкцию батареи.

Некоторые типы композитных материалов прозрачны для электромагнитных волн, что делает их незаменимыми для радиоантенн и датчиков, установленных на корпусе дронов.

Несмотря на очевидные плюсы, существуют некоторые трудности и ограничения, связанные с внедрением полимерных композитов в авиационную промышленность:

- высокая стоимость материалов и сложность технологий изготовления требуют значительных инвестиций;
- большая доля ручного труда;
- необходимость специальных производственных условий (например, автоклавов высокого давления);
- проблемы с повторной переработкой отходов композитов;
- недостаточная стандартизация процессов контроля качества и испытаний деталей из композитов.

Еще одним перспективным направлением в проектировании БПЛА является создание крыльев с изменяемой геометрией (морфинг-крыльев)

(рис. 1). В отличие от традиционных жёстких конструкций с ограниченными возможностями управления, морфинг-крылья обеспечивают гибкие изменения формы без использования жёстких рулевых структур. Это позволяет более точно настраивать аэродинамические характеристики самолёта в реальном времени, улучшая управляемость и эффективность полёта [1].

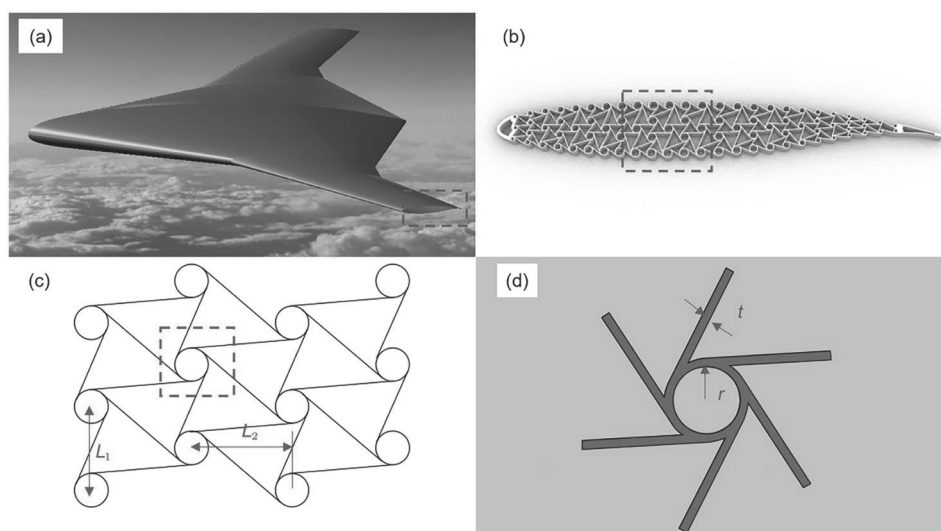


Рис. 1. Оптимизация хиральных решёток с помощью генетических алгоритмов, подтвержденная 3D-печатными образцами

Институт исследования прочности авиационных конструкций Китая (подразделение AVIC) успешно завершил теоретическую проверку полностью решётчатой распределённой структуры морфинг-крыла на основе механических метаматериалов. Исследование посвящено разработке и анализу крыла самолёта с использованием специальных ауксетических структур (имеющих отрицательный коэффициент Пуассона), которые позволяют менять форму крыла (морфинг) под действием внешних нагрузок. В работе рассматриваются два типа ауксетических структур: Re-entrant («вогнутые») (рис. 2, а) и S-образные (рис. 2, б) [2].

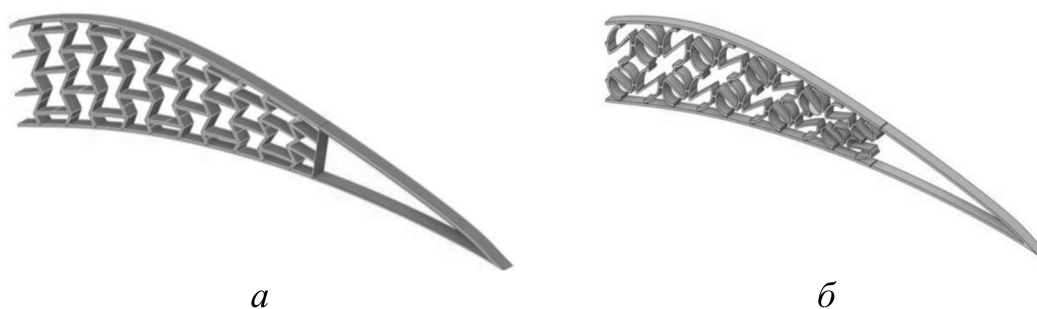


Рис. 2. Различные ауксетические структуры в морфинг-крыльях

Статический анализ отдельных ауксетических структур показал, что структура типа Re-entrant имеет меньшие максимальные напряжения и большую гибкость, чем S-образная структура.

Базируясь на приведенных выше работах, на кафедре полимерных композиционных материалов и кафедре механики и конструирования проводятся исследования, связанные с исследованием фундаментальных свойств ауксетических материалов «вогнутого» типа. Исследования направлены на определение поведения механических метаматериалов, полученных аддитивными технологиями, с различной геометрией ячейки, соотношением размеров элементов ячейки и из различных термопластичных материалов, при квазистатическом сжатии и воздействии ударных нагрузок.

ЛИТЕРАТУРА

1. Zheng Q., Zhu W., Zhi Q., Sun H., Li D., Ding X. Genetic algorithm optimization design of gradient conformal chiral metamaterials and 3D printing verification for morphing wings // *Chinese Journal of Mechanical Engineering*. – 2024. – Vol. 37, no 1, <https://doi.org/10.1186/s10033-024-01132-3>.

2. Shatindra B., Navalgund S. V., Tejas C C; Chindi R. V., Dr. Hareesha N.G. Aircraft wing morphing using Auxetic Structures // *International Journal of Innovative Science and Research Technology (IJISRT)*. – 2024. – Vol. 9, Issue 5. – P. 526–555, <https://doi.org/10.38124/ijisrt/ijisrt24may1201>.

УДК 678.6

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ МАТЕРИАЛЫ: НОВЫЕ ЭПОКСИДНЫЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ КОНСТРУКЦИЙ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

А.С. ЛЮБИМОВА, Н.С. ПЕТРОВ
ООО «Композит Изделия»

Снижение массы без механических потерь является наиболее актуальной задачей в производстве беспилотных летательных аппаратов, поэтому производство беспилотных летательных аппаратов сложно представить без полимерных композиционных материалов (ПКМ).

В основе ПКМ лежит полимерная матрица, может быть, как на основе термопластичных, так и на основе термореактивных полимеров.