

Список литературы

- 1 Textile Structural Composites / ed. by T.-W. Chou and F. Ko. – Amsterdam – Oxford – New York – Tokio : Elsevier, 1989. – 420 p.
- 2 Малмейстер, А. К. Сопротивление жестких полимерных материалов / А. К. Малмейстер, В. П. Тамуж, Г. А. Тетерс. – Рига : Зинатне, 1972. – 500 с.
- 3 Кристенсен, Р. Введение в механику композитов / Р. Кристенсен. – М. : Мир, 1982 – 334 с.
- 4 Старовойтов, Э. И. Основы теории упругости, пластичности и вязкоупругости / Э. И. Старовойтов. – Гомель : БелГУТ, 2001. – 344 с.
- 5 Хотько, А. В. Возможности оптимального проектирования автомобильной шины по критерию пространственной равнопрочности / А. В. Хотько, С. В. Шилько, С. Н. Бухаров // Механика машин, механизмов и материалов. – 2020. – № 4. – С. 11–18.

УДК 539.3;539.4.

РАЗРАБОТКА И ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СВЕРХСЖИМАЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ В ВИДЕ НАПРАВЛЕННО-АРМИРОВАННЫХ СТЕКЛО- И УГЛЕПЛАСТИКОВ

*С. В. ШИЛЬКО, Т. В. ДРОБЫШ, А. П. САЗАНКОВ,
Институт механики металлополимерных систем им. В. А. Белого
НАН Беларуси, г. Гомель*

*С. И. РОМАНОВИЧ
ОАО «Пеленг», г. Минск, Республика Беларусь*

Обсуждаются возможности создания инновационных сверхсжимаемых материалов конструкционного назначения, обладающих аномально низким коэффициентом Пуассона, путем направленного армирования полимерной/эластомерной матрицы стекло- и углеродными тканями. Изготовлены композиты с различной схемой укладки волокон и проведены статические испытания указанных материалов на растяжение и изгиб. Определены значения модуля упругости, коэффициента Пуассона, предела прочности при растяжении и относительного удлинения при разрыве, а также предел прочности и модуль упругости при изгибе. Анализируются особенности деформационного поведения и области использования исследуемых композитов.

В настоящее время внимание материаловедов привлекают методы повышения эксплуатационных характеристик изделий путем реализации нетривиальных (аномальных) деформационных свойств. К таким аномалиям можно отнести специфическую моду деформирования сверхсжимаемых материалов с близким к нулю и даже отрицательным коэффициентам Пуассона ν (ауксетиков), способных расширяться/сужаться в направлении, перпендикулярном направлению растяжения/сжатия соответственно.

Существование материалов с аномально низкими значениями коэффициента Пуассона допускается соотношениями теории упругости. Для изотропных тел верхний предел $\nu = 0,5$ соответствует несжимаемым материалам типа резины и полиуретана, деформирующимся с сохранением объема при изменении формы, а нижний предел коэффициента Пуассона $\nu = -1$ проявляется в сохранении геометрических пропорций образца при изменении его объема.

Ряд природных, в том числе биологических, материалов демонстрирует сверхсжимаемость (пробка) и ауксетичное (разновидности кварца, древесина в определенных направлениях) поведение. Создание искусственных ауксетиков отражает современную тенденцию проектирования структуры инновационных метаматериалов с заранее заданными свойствами. Обилие публикаций последних лет, описывающих результаты исследований и технические приложения ауксетиков в виде пористых и дисперсно-наполненных материалов, отражено в ряде обобщающих статей, включая первый русскоязычный обзор [1–5].

Деформационные особенности рассматриваемых аномально упругих материалов могут быть использованы в различных технических инновациях. Так, свойственное им повышенное поглощение энергии обеспечивает отличную демпфирующую способность и звукопоглощение; значительное

сопротивление сдавливанию и высокая сдвиговая жесткость важны для создания прецизионных сопряжений; высокая вязкость разрушения способствует повышению трещиностойкости; синклатическая кривизна при изгибе позволяет изготавливать конструкции различной формы за относительно небольшое количество технологических операций; переменная проницаемость дает возможность гибко регулировать характеристики фильтров и т. д.

Относительно редкими являются публикации, в которых описываются технические приложения высокопрочных и высокомодульных направленно-армированных ауксетиков, эффективность использования которых во многом определяется выбором схемы армирования. Отсутствует информация о возможности самоупрочнения и самозалечивания структурных повреждений (трещин) сверхсжимаемых материалов.

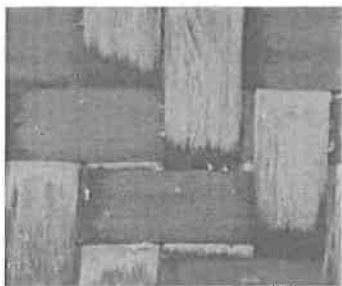


Рисунок 1 – Фрагмент ортогонально армированного углеродного композита

Цель работы – изучение возможности получения сверхсжимаемых композитов путем направленного армирования полимерной / эластомерной матрицы и характеристика их деформационно-прочностных свойств в условиях одноосного растяжения и изгиба.

Материалы и методы. Для механических испытаний были изготовлены образцы стекло- и углепластиков с различной схемой укладки волокон в виде полосок (для испытания на трехточечный изгиб) и двухсторонних лопаток с накладками для надежной фиксации образцов в захватах испытательной машины и предотвращения разрушения материала за пределами рабочей зоны. В качестве примера на рисунке 1 показана структура композита на основе эпоксидной смолы, армированной углеродной тканью с ортогональной укладкой волокон.

Деформационно-прочностные характеристики изучаемых композитов при растяжении и изгибе определялись на испытательной машине «Инстрон 5567» (рисунок 2) при комнатной температуре (20 °С). Для измерения поперечных и продольных деформаций образцов применялись тензодатчики и экстензометр контактного типа, устанавливаемый последовательно в продольном и поперечном направлениях.

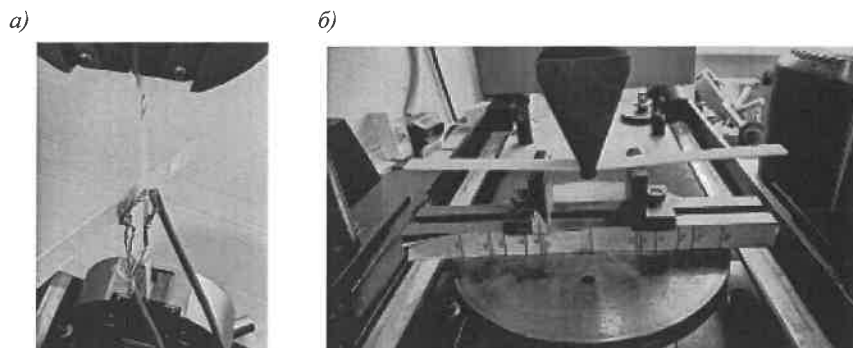


Рисунок 2 – Испытание образцов композитов на растяжение (а) и трехточечный изгиб (б)

Скорость нагружения при испытании на растяжение составляла 0,1 мм/мин на начальной стадии деформирования при определении упругих характеристик (модуля упругости и коэффициента Пуассона) и 1 мм/мин при определении предела прочности. Скорость нагружения при испытании на изгиб задавалась равной 20 мм/мин с базой испытания (расстоянием между опорами), равной 60 мм.

Результаты и их обсуждение. В ходе проведенных испытаний были измерены модуль упругости, коэффициент Пуассона, предел прочности при растяжении и относительное удлинение при разрыве, а также предел прочности и модуль упругости при изгибе изученных материалов. Средние значения указанных механических характеристик приведены в таблице 1, из которой видно, что полученные деформационно-прочностные характеристики исследуемых материалов достаточно высоки, что позволяет использовать их в качестве конструкционных. Модуль упругости стекло- и углепластиков при растяжении превышает модуль упругости при изгибе, в частности, для углепластика – в 1,8 раза. Обращает на себя внимание весьма низкое (близкое к нулю) значение коэффициента Пуассона углепластика, что объясняется ортогональной схемой армирования (см. рисунок 1). При косоугольном армировании коэффициент Пуассона может принимать отрицательные значения, что подтверждает возможность получения высокопрочных ауксетичных материалов.

Таблица 1 – Механические характеристики направленно-армированных композитов при растяжении и изгибе

Образец	$\sigma_p / \sigma_{\text{н}}$, МПа	$E_e / E_{\text{н}}$, ГПа	δ , %	ν
Стеклопластик 1	380/372	25,0/16,2	2,38	0,19
Стеклопластик 2	142/96	5,47/4,1	7,57	0,25
Углепластик	611/482	58,3/32,9	1,84	0,06

Заключение. Проведенные механические испытания ряда высокопрочных композитов, полученных с использованием различных схем армирования полимерного связующего стекло- и углеродными тканями, выявили ряд особенностей их деформирования и разрушения при растяжении и изгибе, а именно весьма низкие значения коэффициента Пуассона при косоугольной укладке волокон наполнителя.

Исследование поддержано БРФФИ (проект № T24T-067 «Биоподобные композиты конструкционного и триботехнического назначения на основе полимеров и эластомеров, реализующие самоупрочнение и самозалечивание структурных повреждений».

Список литературы

- 1 Материалы с отрицательным коэффициентом Пуассона (обзор) / Д. А. Конек [и др.] // Механика композиц. матер. и констр. – 2004. – Т. 10, № 1. – С. 35–69.
- 2 Rad, A. B. Static Analysis of Non-Uniform 2D Functionally Graded Auxetic-Porous Circular Plates Interacting with the Gradient Elastic Foundations Involving Friction Force / A. B. Rad // Aerospace Science and Technology. – 2018. – Vol. 76. – P. 315–339.
- 3 Auxetics and Other Systems with "Negative" Characteristics / K. W. Wojciechowski [et al.] // Physica Status Solidi (B). – 2020. – Vol. 257, is. 10.
- 4 Cellular Auxetic Structures for Mechanical Metamaterials: A Review / P. U. Kelkar [et al.] // Sensors. – 2020. – No. 20. – 3132.
- 5 Madke, R. R. Anti-Impact Behavior of Auxetic Sandwich Structure with Braided Face Sheets and 3D Re-entrant Cores / R. R. Madke, R. Chowdhury // Composite Structures. – 2020. – Vol. 236:111838.

УДК 681.2+004

АЛГОРИТМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ АНОМАЛЬНЫХ ЗНАЧЕНИЙ ИЗ МАССИВА ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ДАННЫХ

О. В. ЮХНОВСКАЯ, М. А. ГУНДИНА, К. В. ПАНТЕЛЕЕВ
Белорусский национальный технический университет, г. Минск

Алгоритмы автоматического определения объектов широко используются в цифровых устройствах и включают в себя несколько этапов. Для начала производится локализация области интереса. Затем она изолируется от остальной части изображения или, наоборот, в случае необходимости рассматривается в качестве области интереса. Дальнейшая сегментация позволяет определить необходимые элементы изображения.

Современные устройства формирования изображений позволяют решать комплекс технических и научных задач, требующих синтеза и анализа методов обработки с использованием пороговой бинаризации, классификации изображений, кластеризации, применением машинного обучения [1, 2]. Развитие микропроцессорной техники позволяет повысить сложность применяемых алгоритмов для решения прикладных задач. В литературе широко обсуждаются также вопросы сегментации, распознавания образов, описания и представления деталей, морфологического анализа снимков, полученных промышленным оборудованием.

Предварительная обработка такого изображения направлена на улучшение и восстановление изображения. Этот процесс устраняет шум, выделяет края и улучшает общее качество изображения. При предварительной обработке изображения полутоновое изображение проходит через множество процедур масштабирования, расширения, фильтрации и улучшения контуров и др. [3, 4].

При сегментации изображения актуальной задачей является определение области аномальных значений.

Известно, что аномальные значения способны существенно исказить функционирование математических моделей анализа данных. Это может привести к снижению надежности и некорректной работе информационно-измерительной системы, однако аномальные значения могут быть использованы для выявления областей интереса на изображении [5].