

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.

Каждый класс имеет свои достоинства и недостатки, однако наиболее частое применение при производстве ПКМ нашли термореактивные связующие.

Одним из наиболее актуальным направлением развития ПКМ для БПЛА, является создание новых эпоксидных систем, а именно: эпоксидные связующие, эпоксидные наполнители, эпоксидные клеи.[1]

Разработка эпоксидного на доступной сырьевой базе, является одним из перспективных направлений для композитной отрасли, как по причине ухода многих производителей из недружественных стран, так и по причинам незначительного количества отечественных производителей на территории России и СНГ. Также эпоксидные смолы позволяют получить недорогие системы с высокими физико-механическими характеристиками, клеи с хорошей адгезией и другое.[2]

Материалы и методы

Предмет исследования – эпоксидные связующие «Резикарб-ЭП», «Резикарб-Аэро». Температуру и продолжительность отверждения связующего подбирали по разным режимам. Рекомендуемым режимом считается выдержка до формообразования при комнатной температуре (для достижения лучшего результата в течение 24 ч при 25°C), а затем отверждение при 60, 80 и 120°C, пока связующее не наберет максимальные характеристики.

Температуру стеклования отвержденных образцов измеряли в соответствии с ГОСТ 56753-2015 при скорости нагрева 5°C/мин. Проводили испытания образцов размером 50×10×4 мм на термоанализаторе динамическо-механической модификации DMA 242 E фирмы Netzsch.

Тепловой эффект реакции определяли методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) на дифференциальном сканирующем калориметре марки Netzsch (Германия) с интервалом рабочих температур от -100 до +400°C и диапазоном скоростей нагрева от 1 до 5°C/мин. Испытания проводили в соответствии с ГОСТ Р 55134-2012.

Вязкость образцов связующих Резикарб ЭП и Резикарб-Аэро измеряли в соответствии с ГОСТ 25271–93 на вискозиметре Брукфильда марки DV2TLV при комнатной температуре.

Прочность при изгибе определяли на испытательной машине по ГОСТ 4648–2014 при комнатной температуре. Испытание проводили при скорости 2 мм/мин на образцах размером 80×10×4 мм, расстояние между опорами составляло 60 мм.

Прочность при растяжении определяли на испытательной машине по ГОСТ 11262—2017. Испытание проводили при скорости 2 мм/мин.

Результаты и обсуждение

Были разработаны на основе отечественной компонентной базы эпоксидные связующие Резикарб-ЭП и Резикарб-Аэро, подходящие для получения ПКМ методами вакуумной инфузии и ручного формования. Технологические параметры связующих представлены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1.

Параметр	«Резикарб ЭП-Б»	«Резикарб ЭП-С»	«Резикарб ЭП-М»
Соотношение смешивание, масс.ч.	100:25	100:30	100:25
Вязкость не более, мПа*с	800	500	400
Время жизни, мин.	30-40	40-50	150-210
Рекомендованный режим отверждения*	- 24 ч. при 25 °С - 5 ч при 80 °С	- 24 ч. при 25 °С - 5 ч при 80 °С	- 24 ч. при 25 °С - 5 ч при 80 °С
*Возможен ускоренный режим отверждения при повышенных температурах			

Таблица 2

Параметр	«Резикарб Аэро-Б»	«Резикарб Аэро-С»	«Резикарб Аэро-М»
Соотношение смешивание, масс.ч.	100:30	100:30	100:30
Вязкость не более, мПа*с	400-500	400-500	550-650
Время жизни, мин.	50	90-120	180-240
Рекомендованный режим отверждения*	25 °С – 24 ч, +постотверждение при 80 °С – 10 ч или при 60 °С – 15 ч	25 °С – 24 ч, +постотверждение при 80 °С – 10 ч или при 60 °С – 15 ч	25 °С – 24 ч, +постотверждение при 80 °С – 10 ч или при 60 °С – 15 ч
*Возможен ускоренный режим отверждения при повышенных температурах			

Комплектация модифицированной эпоксидной основы комбинированными отвердителями, различающимися по времени гелеобразования (на среднем, быстром и медленном) позволяет варьировать время технологического процесса и свойства конечных изделий. А смешение отвердителей в определенных пропорциях ЭП-Б и ЭП-М позволяет

подбирать различное (от 30 минут до 3 часов) технологическое окно, необходимое под конкретные задачи.

Зарубежными аналогами Резикарб-ЭП и Резикарб-Аэро являются системы L (R&G) и LR285 (Hexion). Сравнительные характеристики представлены в таблицах 3 и 4.

Таблица 3.

-	LR285+ LH285	Аэро-Б	LR285+ LH286	Аэро-С	LR285+ LH287	Аэро-М
Вязкость, мПа*с	Не менее 600	Не более 400-500	Не менее 600	Не более 400-500	Не менее 600	Не более 500-650
Время жизни, мин.	40-50	40-50	90-100	90-120	180-240	180-240
Рекомендо- ванный режим отверждения	24 ч при 25 °С + 15 ч при 80 °С	24 ч при 25 °С +10 ч при 80°С	24 ч при 25 °С + 15 ч при 80 °С	24ч при 25 °С +10 ч при 80°С	24 ч при 25 °С + 15 ч при 80°С	24ч при 25 °С +10 ч при 80°С
Температура стеклования, не менее	80-90°С	90- 100°С	80-90°С	80-90°С	80-90°С	90-100 °С
Разрушающее напряжение на растяже- ние, МПа	70-80	65-75	70-80	60-65	70-80	75-80
Модуль упру- гости, ГПа	3,0-3,3	3,4	3,0-3,3	3,3	3,0-3,3	3,15
Прочность на изгиб, Мпа	110-120	120-125	110-120	115-125	110-120	130-135
Модуль упру- гости, МПа	-	3400	-	3390	-	3100
Степень от- верждения, ДСК, %	-	99	-	99	-	99

Таблица 4.

-	L+GL1	ЭП-Б	L+L	ЭП-С	L+GL2	ЭП-М
Вязкость, мПа*с	820	600-700	580±10 0	450-500	249	250-300
Время жизни, мин.	30	30-40	40	40-50	210	150-210
Рекомендо- ванный ре- жим отвер- ждения	24ч при 25°C +15ч при 70°C	24ч при 25°C +5ч при 80°C или 8ч при 60°C	24ч при 25°C +15ч при 70°C	24ч при 25°C +5ч при 80°C или 8ч при 60°C	24ч при 25°C +15ч при 70°C	24ч при 25°C +5ч при 80°C
Температура стеклования, не менее	80°C	80°C	60°C	80°C	85°C	95 °C
Разрушающее напряжение на растяже- ние, МПа	74	60-70	69	60-70	74,8	65-75
Модуль упру- гости, ГПа	3,5	3,5-3,7	2,95	3,5-3,7	4,0	3,5-3,7
Прочность на изгиб, Мпа	135	100-110	110	138	119	143
Модуль упру- гости, МПа	3500	3900	2950	3750	3050	3740

Как видно из данных табл. 3 и 4, связующие Резикарб-ЭП и Резикарб-Аэро по сравнению с зарубежными аналогами не уступает по технологическим и физико-механическим параметрам, а также имеют низкую вязкость при комнатной температуре. При работе со связующими отмечена легкая дегазация при вакуумировании. Для систем с быстрым сроком жизни можно проводить несколько формовок и снятий за рабочую смену. А также разработка ООО «Композит изделия» позволила сократить время доотверждения в сравнении с зарубежными

аналогами, снизить с 15 часов до 5-8 для системы Резикарб ЭП, и с 15 часов до 10 для системы Резикарб Аэро.

Методом вакуумной инфузии были изготовлены образцы ПКМ на основе связующего Резикарб-ЭП и исследованы их физико-механические. Использовалась стеклоткани плетения твил с плотностью 200 г/м² (13 слоев) (Е-стекло), толщина плит получилась 2,5 мм. В качестве связующего использовалась система Резикарб-ЭП с набором отвердителей: быстрым (ЭП-Б), средним (ЭП-С) и медленным (ЭП-М). Режим отверждения: 24 часа при 25°C + доотверждение 5 часов при 80°C.

Эпоксидное связующее демонстрирует оптимальную вязкость, обеспечивая глубокую и равномерную пропитку стеклоткани без образования сухих зон, что способствует получению качественного изделия.

Физико-механические свойства полученных стеклопластиков подтверждены испытаниями:

Таблица 5.

Отвердитель	Испытание	Н/Д на испытание	Прочность (МПа)	Модуль (ГПа)
Резикарб ЭП-Б	Сжатие	ГОСТ Р 56812-2015	225-240	24
	Изгиб	ГОСТ 56810—2015	320-335	15
	Растяжение	ГОСТ Р 56785-2015	480-500	19
Резикарб ЭП-С	Сжатие	ГОСТ Р 56812-2015	220-225	23
	Изгиб	ГОСТ 56810—2015	300-315	14
	Растяжение	ГОСТ Р 56785-2015	460-480	18
Резикарб ЭП-М	Сжатие	ГОСТ Р 56812-2015	245-260	27
	Изгиб	ГОСТ 56810—2015	330-350	15
	Растяжение	ГОСТ Р 56785-2015	490-505	19

Полученные показатели свидетельствуют о высокой прочности материалов, что делает их пригодными для изготовления различных деталей и изделий в самых разных сферах промышленности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Hairi S. M. F. B. S. et al. A review on Composite Aerostructure Development for UAV application //Green Hybrid Composite in Engineering and Non-Engineering Applications. – 2023. – С. 137-157.
2. Negoita C., Cristache N., Bodor M. The epoxy resin-History and perspectives //Mater. Plast. – 2016. – Т. 53. – №. 3.

УДК 678.7.027:629.735.33

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ФАНЕРЫ В ТЕХНОЛОГИИ БЕСПИЛОТНЫХ СИСТЕМ

А.А. МАКАРУК, М.В. АНДРЮХОВА

Белорусский государственный технологический университет
Минск, Беларусь

С развитием технологий построения летательных аппаратов древесины как древесный композиционный материал (ДКМ) вытеснили металлы и синтетические композиты, превосходившие ее по стабильности и прочности в суровых условиях эксплуатации.

Однако развитие материаловедения привело к использованию древесины в виде многослойной структуры, которая благодаря модифицированию приобрела повышенную прочность, влагостойкость, долговечность и минимальный вес.

В процессе проектирования планера беспилотных летательных аппаратов (БЛА) необходимо учитывать полезную нагрузку, дальность, скорость, высоту, время полета, срок службы, коэффициент перегрузки. Конструкторами уделяется внимание возможности уменьшения массы БЛА исходя из внешних геометрических размеров, аэродинамики, силовой установки и свойств используемых материалов (прочность, жесткость, плотность) с учетом технологии изготовления деталей из них. Максимальной экономии веса и стоимости в прогрессивных самолетных конструкциях можно добиться за счет современных композитных конструкций, а также внедрения дешевых методов изготовления деталей и оснастки, сборки, ремонта [1].

Ключевыми причинами интереса к ДКМ для беспилотных систем являются высокое удельное отношение прочности и жесткости к весу. Материал должен быть максимально прочным и жестким, но при этом