

УДК 620.1:678.8

А.А. Евдокимов¹, А.П. Петрова¹, К.А. Павловский¹, И.Н. Гуляев¹

ВЛИЯНИЕ КЛИМАТИЧЕСКОГО СТАРЕНИЯ НА СВОЙСТВА ПКМ НА ОСНОВЕ ЭПОКСИВИНИЛЭФИРНОГО СВЯЗУЮЩЕГО

DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-3-128-136

Представлены результаты исследований свойств углепластика марки ВКУ-51 и стеклопластика марки ВПС-58, изготовленных на основе эпоксивинилэфирного связующего марки ВСВ-43, после экспозиции в натуральных условиях умеренного и субтропического климата в течение 5 лет с промежуточными съемами после 1 года и 3 лет. Определены физико-механические характеристики (прочность и модуль упругости при растяжении, сжатии и изгибе) и температура стеклования. Исследования показали высокое сохранение свойств при 20 °С: 90–100% – у ВКУ-51 и 73–100% – у ВПС-58 в зависимости от вида испытания.

Ключевые слова: углепластик, стеклопластик, эпоксивинилэфирное связующее, натурная экспозиция, упруго-прочностные свойства, физические свойства.

А.А. Evdokimov¹, А.Р. Petrova¹, К.А. Pavlovskiy¹, I.N. Gulyaev¹

THE INFLUENCE OF CLIMATIC AGEING ON THE PROPERTIES OF PCM-BASED EPOXY RESIN SYSTEMS

The article presents the results of studies of the properties of carbon fiber of the VKU-51 brand and fiberglass of the VPS-58 brand, made on the basis of the epoxy vinyl ester binder of the VSV-43 brand, after exposure in full-scale conditions of moderate and subtropical climate for 5 years with intermediate removals after 1 and 3 years. Physical and mechanical characteristics (strength and modulus of elasticity under tension, compression and bending) and glass transition temperature are determined. Studies have shown a high preservation of properties at 20 °C: 90–100% in VKU-51 and 73–100% in VPS-58, depending on the type of test.

Keywords: carbon fiber, fiberglass, epoxy vinyl ester binder, full-scale exposure, elastic-strength properties, physical properties.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials» State Research Center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

Введение

В настоящее время развитию Крайнего Севера и дальневосточных регионов России со сложными природными условиями вечной мерзлоты уделяется особое внимание. Осуществляются программы развития Дальнего Востока и Северного морского пути (СМП), в том числе и развитие транспортной инфраструктуры в этих регионах [1–3]. Для реализации проекта требуется модернизация морских портов, расположенных на всем протяжении СМП, в том числе и развитие транспортной инфраструктуры (авиационного и автомобильного сообщения). С этой целью планируется проведение работ по модернизации аэропортов и развитие сети автомобильных дорог. Ввиду природных особенностей сдерживающим фактором строительства сети автомобильных дорог в данных регионах являются наличие большого числа водных препятствий (ручьев, рек и т. п.) и необходимость возведения мостов через них. С учетом того, что в этих

регионах преобладает вечная мерзлота и климат отличается довольно непродолжительным летним периодом, во время которого температура окружающей среды положительная, возведение мостов с применением традиционных методов очень затруднено. В сложившихся условиях для строительства мостов требуется применение материалов и строительных технологий, позволяющих осуществлять строительство за непродолжительный отрезок времени (до 3 мес) и без применения тяжелой и крупногабаритной строительной техники.

В таких сложных климатических условиях жесткие требования предъявляются также к весовым и технологическим характеристикам строительных конструкций. Снижение массы конструкции может быть достигнуто путем применения полимерных композиционных материалов (ПКМ) и новых конструктивных решений, позволяющих эффективно использовать уникальные свойства армированных материалов [4]. С точки зрения технологии, для наиболее эффективного применения ПКМ при возведении объектов транспортной инфраструктуры в труднодоступных районах требуется использование ПКМ, способных к формообразованию при температурах, близких к температуре окружающей среды, без применения крупногабаритного и тяжелого оборудования. Одним из примеров использования подобного рода материалов и технологий может служить построенный в 2016 г. в рабочем поселке Языково Ульяновской области автомобильный двухполосный мост, в конструкции которого применены арочные элементы из углепластика и профилированный настил из стеклопластика [5, 6]. Для реализации этого проекта были разработаны и паспортизованы углепластик на основе углеродной преформы радиального типа плетения и стеклопластик на основе равнопрочной стеклоткани. Оба материала изготавливались способом вакуумной инфузии с применением эпоксивинилэфирного связующего марки ВСВ-43, способного к формообразованию при температуре до 40 °С. Данные материалы, согласно проведенным исследованиям, работоспособны в интервале температур от -60 до +80 °С. Для обеспечения надежной эксплуатации строительных конструкций были проведены исследования характеристик ПКМ после воздействия факторов окружающей среды с целью прогнозирования их срока службы.

Прогнозирование срока службы происходило в несколько этапов. На первом этапе при разработке и паспортизации материалов были проведены лабораторные испытания для оценки стойкости к воздействию искусственно созданных эксплуатационных факторов, а также оценено воздействие повышенных температур (60 и 80 °С), воды (при 20 °С), тепловлажностного старения (60 °С и $\phi=85\%$), плесневых грибов, бензина марки АИ-92, дизельного топлива, моторного масла и тропического влажного климата в течение 3 мес экспозиции. Для оценки влияния естественных климатических факторов проводили испытания образцов материалов после длительной экспозиции в различных климатических зонах, что позволило оценить динамику изменения свойств материалов при эксплуатации их в естественных условиях [7].

Вопросам старения ПКМ в естественных условиях в различных климатических зонах уделяется большое внимание [8, 9]. К ПКМ, применяемым при возведении объектов транспортной инфраструктуры, предъявляются особые требования безопасности для обеспечения надежности конструкции из них. Существенное влияние на ПКМ в процессе длительной эксплуатации изделий оказывают климатические факторы: температура, относительная влажность воздуха, атмосферные осадки, солнечная радиация, циклическое изменение температуры окружающего воздуха, что может вызвать снижение прочностных характеристик материалов [10–13].

Актуальность исследования свойств ПКМ после проведения экспозиции на естественной площадке подтверждается данными зарубежных авторов [14–18]. Опубликованы

результаты подробных исследований пластин стеклопластика толщиной 3,2 мм на основе стекловолокон Dow Corning 801-Eglass и комбинированного эпоксидного связующего на основе смол DEN438 и EPON828, экспонированных в течение 2 лет в пяти климатических регионах (тропический лес и побережье Панамского канала, Пуэрто-Рико, штаты Аризона и Массачусетс, Австралия). В ходе проведения исследований выявлена доминирующая роль солнечной радиации как фактора, вызывающего процессы деструкции и сшивания в эпоксидной матрице стеклопластика. Атмосферная влага в данном случае является пластификатором и инициатором гидролиза, причем этот фактор воздействия частично обратим. При воздействии сочетания дождя и ветра проявляются эффекты эрозии поверхности. Влага вызывает значительное ухудшение механических свойств стеклопластика из-за активного влияния на стекловолокно, особенно при повышенных напряжениях.

В данной статье представлены результаты исследований свойств углепластика ВКУ-51 и стеклопластика ВПС-58 на основе эпоксивинилэфирного связующего, предназначенных для изготовления несущих строительных конструкций мостового сооружения, после длительной экспозиции этих материалов в различных климатических зонах.

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 13. «Полимерные композиционные материалы» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года»).

Материалы и методы

В данной работе объектами исследований являлись углепластик марки ВКУ-51 и стеклопластик марки ВПС-58 на основе эпоксивинилэфирного связующего ВСВ-43 после экспозиции в натуральных условиях различных климатических зон:

- умеренный климат, промышленная атмосфера г. Москвы – МЦКИ (умеренный пояс – внутриконтинентальный умеренный климат);
- теплый влажный климат с мягкой зимой г. Геленджика – ГЦКИ (климат средиземноморского типа).

На экспозицию были выставлены плиты ПКМ габаритами 300×300 мм и толщиной 2,5 (углепластик) и 3,5 мм (стеклопластик) без нанесения защитного лакокрасочного покрытия. Экспозицию проводили на атмосферном стенде, расположенном под углом 45 градусов к горизонту, в течение 5 лет с промежуточными съемами после 1 года и 3 лет (рис. 1). Оценку влияния климатических факторов на материалы производили путем сравнения исходных значений физико-механических характеристик, полученных до экспозиции, со значениями, полученными после проведения экспозиции.

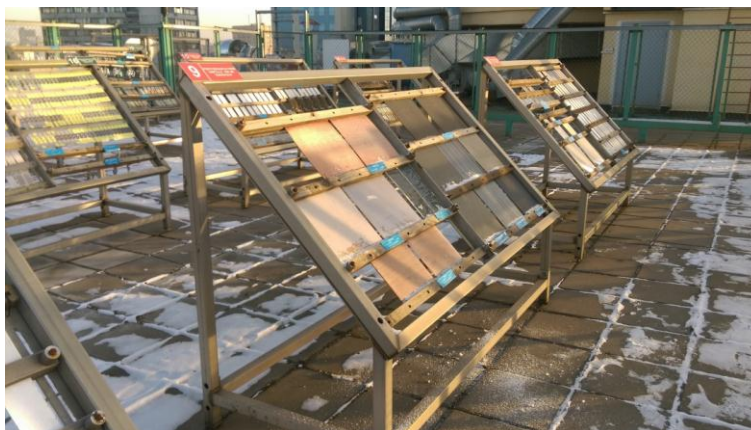


Рис. 1. Проведение экспозиции плит ПКМ на открытой площадке в г. Москве

Исследования углепластика проводили по следующим видам испытаний:

- определение прочности и модуля упругости при растяжении по ГОСТ 25.601–83 на испытательной машине LFM-250;
- определение прочности и модуля упругости при статическом изгибе по ГОСТ 25.604–82 на испытательной машине Z-005;
- определение плотности по ГОСТ 15139–69 на аналитических весах НТР-220СЕ;
- определение температуры стеклования материала по СТО 1-595-36-464–2015 на установке динамического механического анализа.

Исследования стеклопластика проводили по следующим видам испытаний:

- определение прочности и модуля упругости при растяжении по ГОСТ 25.601–83 на испытательной машине LFM-250;
- определение изгибающего напряжения и модуля упругости при изгибе по ГОСТ 4648–2014 на испытательной машине Z-005;
- определение прочности при сжатии по ГОСТ 25.602–80 на испытательной машине LFM-100;
- определение плотности по ГОСТ 15139–69 на аналитических весах НТР-220СЕ;
- определение температуры стеклования материала по СТО 1-595-36-464–2015 на установке динамического механического анализа.

Результаты и обсуждение

Внешний осмотр плит образцов ПКМ после экспозиции показал различное состояние лицевой и тыльной поверхности. Лицевой стороной считалась сторона, обращенная к солнцу при экспонировании на атмосферном стенде. Лицевая поверхность на всех плитах повреждена гораздо сильнее, чем тыльная (теневая) сторона. На лицевой стороне в большей степени наблюдается деградация полимерной матрицы и эрозионные повреждения волокон и связующего как у плит, находящихся на экспозиции в МЦКИ, так и в ГЦКИ. Внешний вид плит ПКМ после экспозиции представлен на рис. 2.

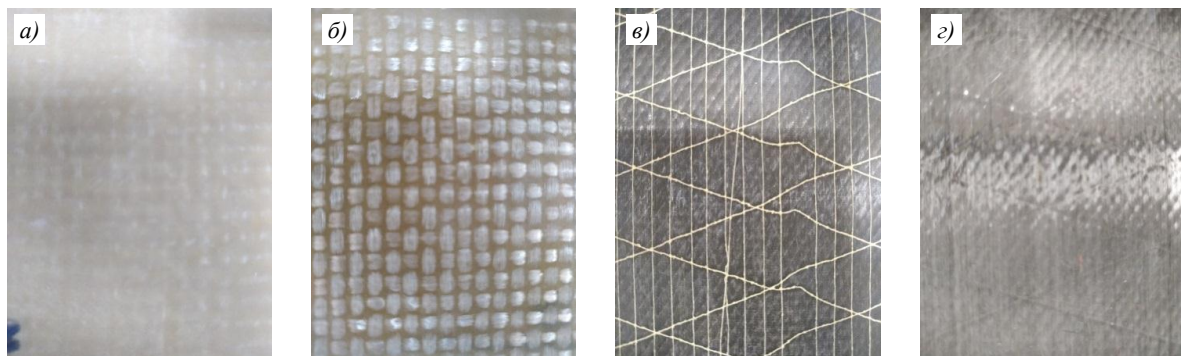


Рис. 2. Внешний вид плит ПКМ после экспозиции в ГЦКИ в течение 5 лет: из стеклопластика ВПС-58 (а, б) и углепластика ВКУ-51 (в, з) с теневой (а, в) и лицевой стороны (б, з)

Изменение состояния поверхности плит из стеклопластика и углепластика, наблюдаемое при длительной экспозиции в естественных условиях различных климатических зон, является типичным для ПКМ. В реальных условиях эксплуатации такие явления, как эрозионные поражения полимерной матрицы и ее унос, оголение и разрушение армирующих волокон, отсутствуют благодаря лакокрасочным покрытиям, обеспечивающим защиту поверхности элементов авиационных конструкций от воздействия внешних факторов [19–21].

В табл. 1 приведены упруго-прочностные свойства углепластика ВКУ-51 после длительной экспозиции в различных климатических зонах.

Таблица 1

Упруго-прочностные свойства* углепластика ВКУ-51

Свойства	Значения свойств						
	в исходном состоянии	после экспозиции на открытом стенде в течение					
		1 года		3 лет		5 лет	
		МЦКИ	ГЦКИ	МЦКИ	ГЦКИ	МЦКИ	ГЦКИ
Предел прочности при растяжении, МПа (ГОСТ 25.601–83)	610–830 729	790–910 831	662–912 789	610–770 664	610–840 718	640–740 674	710–900 786
Модуль упругости при растяжении, ГПа (ГОСТ 25.601–83)	59–62 61	57–62 59	57–60 59	58–66 62	58–72 63	66–73 69	61–69 66
Предел прочности при поперечном изгибе, МПа (ГОСТ 25.604–82)	540–730 663	530–850 658	680–830 768	670–780 725	630–760 680	580–640 606	590–660 632
Модуль упругости при поперечном изгибе, ГПа (ГОСТ 25.604–82)	57–67 63	60–67 63	54–64 60	62–70 65	55–60 57	47–54 52	44–52 48

*В числителе – минимальное и максимальное значение, в знаменателе – среднее.

Видно, что экспозиция на климатических станциях МЦКИ и ГЦКИ не оказала значительного влияния на прочностные свойства углепластика ВКУ-51. Более того, можно наблюдать, что после экспозиции в течение 5 лет некоторые характеристики имеют более высокие значения по сравнению с исходными. Так, наблюдается увеличение модуля упругости при растяжении в течение 5 лет на уровне 13% при экспозиции в МЦКИ и 8% при экспозиции в ГЦКИ. Помимо этого, наблюдается увеличение предела прочности при растяжении на 8% при экспозиции в ГЦКИ, в то же время наблюдается незначительное снижение свойств при экспозиции в МЦКИ – на 8%. Сохранение предела прочности и модуля упругости при изгибе после экспозиции в течение 5 лет составило: 91 и 83% – в МЦКИ и 95 и 76% – в ГЦКИ соответственно. Изменение прочности при растяжении и изгибе углепластика ВКУ-51 после 1 года, 3 и 5 лет экспозиции представлено на рис. 3.

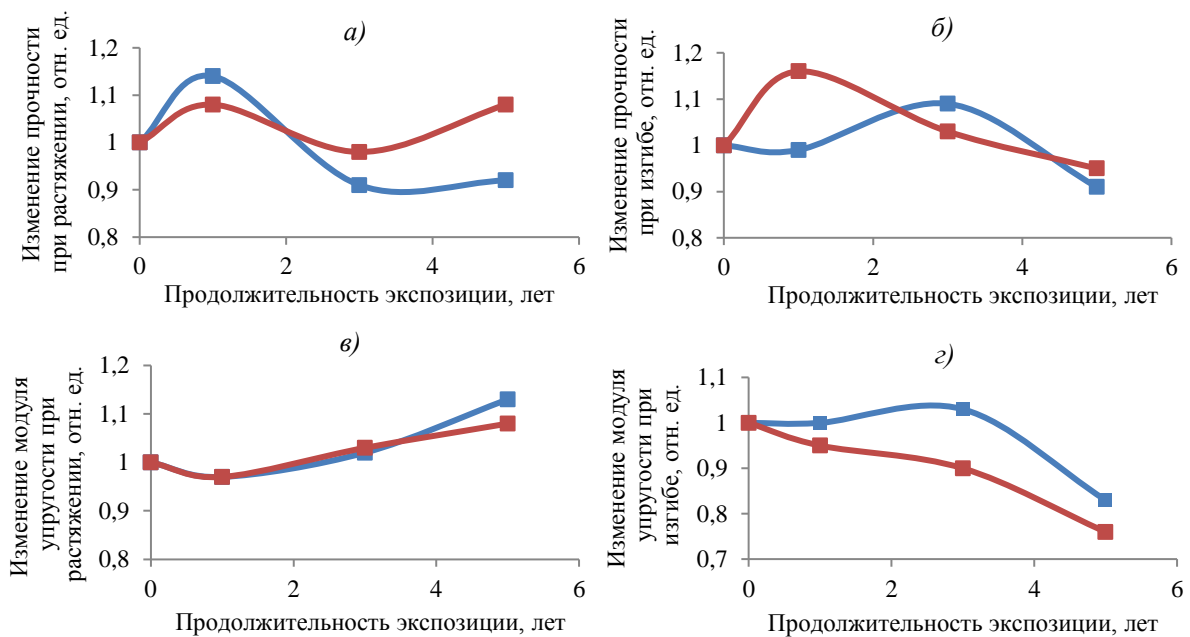


Рис. 3. Изменение упруго-прочностных свойств углепластика ВКУ-51 после экспозиции в МЦКИ (■) и ГЦКИ (■) в течение 1 года, 3 и 5 лет

Представленные на рис. 3 данные свидетельствуют о том, что прочностные свойства углепластика марки ВКУ-51 улучшились после проведения экспозиции на климатических площадках как в МЦКИ, так и в ГЦКИ. Наблюдается также незначительное снижение модуля упругости при изгибе.

В табл. 2 приведены физические свойства углепластика ВКУ-51 после длительной экспозиции в различных климатических зонах.

Таблица 2

Физические свойства углепластика ВКУ-51

Свойства	Значения свойств						
	в исходном состоянии	после экспозиции на открытом стенде в течение					
		1 года		3 лет		5 лет	
		МЦКИ	ГЦКИ	МЦКИ	ГЦКИ	МЦКИ	ГЦКИ
Плотность, кг/см ³ (ГОСТ 15139–69)	1510	1480	1470	1484	1477	1458	1477
Температура стеклования материала, °С (СТО 1-595-36-464–2015)	104	115	113	110	102	110	107

Анализируя данные, приведенные в табл. 2, можно отметить незначительное уменьшение плотности углепластика после экспозиции в течение 5 лет (на 3% – в МЦКИ и на 2% – в ГЦКИ) и сохранение температуры стеклования углепластика на уровне исходных значений. Это свидетельствует о стойкости связующего ВСВ-43 к воздействию внешних факторов.

В табл. 3 приведены упруго-прочностные свойства стеклопластика ВПС-58 после длительной экспозиции в различных климатических зонах.

Таблица 3

Упруго-прочностные свойства* стеклопластика ВПС-58

Свойства	Значения свойств						
	в исходном состоянии	после экспозиции на открытом стенде в течение					
		1 года		3 лет		5 лет	
		МЦКИ	ГЦКИ	МЦКИ	ГЦКИ	МЦКИ	ГЦКИ
Предел прочности при растяжении, МПа (ГОСТ 25.601–83)	450–525	420–440	476–549	365–380	400–440	500–510	405–425
	500	430	504	375	421	502	417
Модуль упругости при растяжении, ГПа (ГОСТ 25.601–83)	24–26	22–27	24–26	25–27	25–27	29–33	27–30
	25	25	25	26	26	31	29
Изгибающее напряжение, МПа (ГОСТ 4648–2014)	480–770	465–550	560–780	550–610	420–470	520–640	415–425
	601	511	670	580	440	574	420
Модуль упругости при изгибе, ГПа (ГОСТ 4648–2014)	20–25	17–19	23–26	15–22	17–31	20–25	21–23
	23	18	24	20	26	22	22
Предел прочности при сжатии, МПа (ГОСТ 25.602–80)	300–400	260–310	345–370	345–370	220–270	370–405	275–290
	343	292	355	350	250	386	282

*В числителе – минимальное и максимальное значение, в знаменателе – среднее.

Видно, что более низкие значения пределов прочности при растяжении, сжатии и изгибе наблюдаются у образцов после 3 и 5 лет экспозиции на климатической станции ГЦКИ. Сохранение предела прочности при растяжении составило 83%, при сжатии 73%, при изгибе 70%. Сохранение прочности при растяжении, изгибе и сжатии стеклопластика ВПС-58 после 1 года, 3 и 5 лет экспозиции представлены на рис. 4.

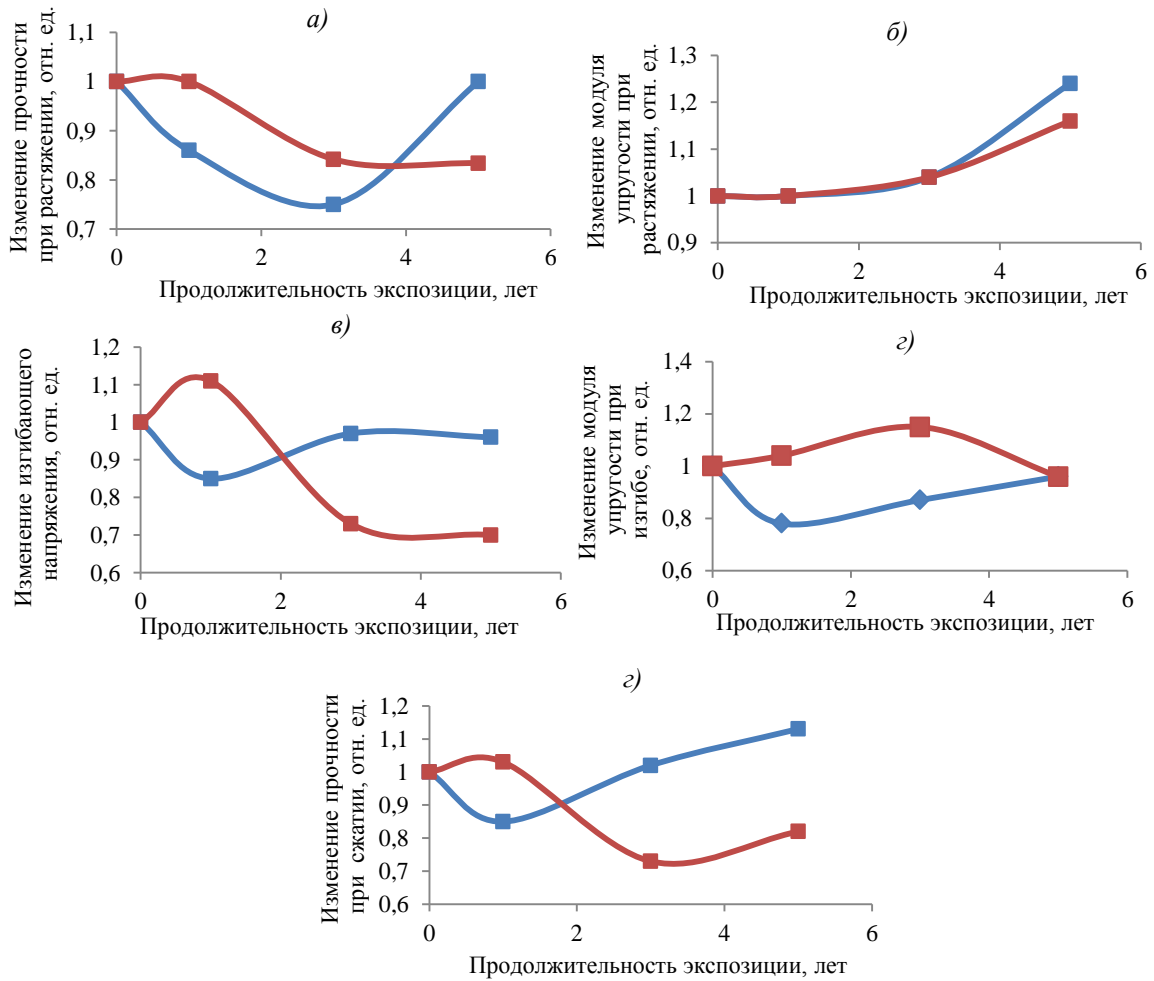


Рис. 4. Изменение упруго-прочностных свойств стеклопластика ВПС-58 после экспозиции в МЦКИ (■) и ГЦКИ (■) в течение 1 года, 3 и 5 лет

Представленные на рис. 4 данные свидетельствуют о том, что значения прочности после 5 лет экспозиции оказались выше на климатической станции в МЦКИ, чем в ГЦКИ. Это обусловлено большим количеством солнечной радиации, которое попадает на образцы, в ГЦКИ по сравнению с МЦКИ. В то же время значения модуля упругости после 5 лет экспозиции в ГЦКИ и МЦКИ практически одинаковы.

В табл. 4 приведены физические свойства стеклопластика ВПС-58 после длительной экспозиции в климатических зонах.

Таблица 4

Физические свойства стеклопластика ВПС-58

Свойства	Значения свойств						
	в исходном состоянии	после экспозиции на открытом стенде в течение					
		1 года		3 лет		5 лет	
		МЦКИ	ГЦКИ	МЦКИ	ГЦКИ	МЦКИ	ГЦКИ
Плотность, кг/см ³ (ГОСТ 15139–69)	1930	1950	1950	1953	1950	1950	1930
Температура стеклования материала, °С (СТО 1-595-36-464–2015)	107	121	118	124	122	124	122

Анализируя данные, приведенные в табл. 4, можно отметить, что плотность стеклопластика после экспозиции в течение 5 лет в МЦКИ и ГЦКИ осталась на уровне исходных значений. В то же время наблюдается увеличение температуры стеклования стеклопластика относительно исходного значения на 17 °С. Это свидетельствует о стойкости связующего ВСВ-43 к воздействию внешних факторов и дополнительной сшивке полимерной матрицы в ПКМ в процессе экспозиции.

Некоторые из полученных значений физико-механических характеристик ПКМ имеют нелинейный характер в зависимости от продолжительности экспозиции. Так, прочность при растяжении углепластика ВКУ-51 после экспозиции на площадках в МЦКИ и ГЦКИ, оказалась минимальной после 3 лет экспозиции, а после 5 лет – значения оказались выше. Аналогичную ситуацию можно наблюдать и относительно значений прочности при растяжении и сжатии стеклопластика ВПС-58. По-видимому, подобное явление наблюдается вследствие уменьшения толщины поверхности и микротвердости экспонируемых образцов ПКМ. Описанию данных явлений будут посвящены последующие работы.

Заключения

Деградация поверхности исследуемых ПКМ наблюдается уже после 1 года экспозиции, что не является критичным, так как даже после 5 лет экспозиции сохранение свойств значительное. Кроме этого, в реальных условиях эксплуатации изделия из ПКМ работают с нанесенным лакокрасочным покрытием.

Разработанные во ФГУП «ВИАМ» углепластик ВКУ-51 и стеклопластик ВПС-58 на основе эпоксивинилэфирного связующего ВСВ-43 показали высокий уровень сохранения физико-механических свойств после длительного воздействия эксплуатационных факторов в разных климатических зонах, что свидетельствует об их устойчивости к внешним воздействиям. По сравнению с уровнем свойств исходных ПКМ исследованные материалы после длительной экспозиции (в течение 5 лет) показали высокое сохранение упруго-прочностных свойств (70–100%) в зависимости от вида испытаний.

Результаты комплекса проведенных испытаний показали, что наиболее агрессивное воздействие на углепластик оказывает промышленная атмосфера г. Москвы. На стеклопластик же наиболее агрессивное воздействие оказал умеренно теплый влажный климат, характерный для климатической площадки г. Геленджика. Это обусловлено наиболее пагубным воздействием солнечной радиации, которое в гораздо большем объеме попадает на образцы в ГЦКИ, по сравнению с промышленной атмосферой МЦКИ, характеризующейся меньшим количеством солнечных дней.

Библиографический список

1. Принятые решения направлены на создание инфраструктурных условий для дальнейшего развития Северного морского пути и прибрежных территорий: Распоряжение Правительства Российской Федерации от 21 декабря 2019 года №3120-р. URL: <http://www.government.ru/docs/38714> (дата обращения: 07.12.2020).
2. О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года: Указ Президента Российской Федерации от 7 мая 2018 года №204. URL: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/43027> (дата обращения: 07.12.2020).
3. Национальная программа развития Дальнего Востока: Распоряжение Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2020 года №2464-р. URL: <http://www.government.ru/docs/40487> (дата обращения: 07.12.2020).
4. Каблов Е.Н. ВИАМ: материалы нового поколения для ПД-14 // Крылья Родины. 2019. №7–8. С. 54–58.

5. Мишкин С.И., Раскутин А.Е., Евдокимов А.А., Гуляев И.Н. Технологии и основные этапы строительства первого в России арочного моста из композиционных материалов // Труды ВИАМ. 2017. №6 (54). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 10.12.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-6-5-5.
6. Евдокимов А.А., Раскутин А.Е., Мишкин С.И., Михалдыкин Е.С. Арочные мосты с применением углепластиковых арочных элементов // Конструкции из композиционных материалов. 2019. №2 (154). С. 22–29.
7. Гладких А.В., Курс И.С., Курс М.Г. Анализ данных натуральных климатических испытаний, совмещенных с приложением эксплуатационных факторов, неметаллических материалов (обзор) // Труды ВИАМ. 2018. №10 (70). Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 06.12.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-10-74-82.
8. Каблов Е.Н., Кириллов В.Н., Жирнов А.Д., Старцев О.В., Вапиров Ю.М. Центры для климатических испытаний авиационных ПКМ // Авиационная промышленность. 2009. №4. С. 36–46.
9. Каблов Е.Н., Старцев О.В. Фундаментальные и прикладные исследования коррозии и старения материалов в климатических условиях (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2015. №4 (37). С. 38–52. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-4-38-52.
10. Каблов Е.Н., Старцев В.О. Системный анализ влияния климата на механические свойства полимерных композиционных материалов по данным отечественных и зарубежных источников // Авиационные материалы и технологии. 2018. №2 (51). С. 47–58. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-2-47-58.
11. Авиационные материалы: справочник: в 13 т. / под общ. ред. Е.Н. Каблова. 7-е изд., перераб. и доп. М.: ВИАМ, 2015. Т. 13: Климатическая и микробиологическая стойкость неметаллических материалов. 270 с.
12. Каблов Е.Н., Старцев В.О., Иноземцев А.А. Влагонасыщение конструктивно-подобных элементов из полимерных композиционных материалов в открытых климатических условиях с наложением термоциклов // Авиационные материалы и технологии. 2017. №2 (47). С. 56–68. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-2-56-68.
13. Лаптев А.Б., Барботько С.Л., Николаев Е.В. Основные направления исследований сохранности свойств материалов под воздействием климатических и эксплуатационных факторов // Авиационные материалы и технологии. 2017. №S. С. 547–561. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-547-561.
14. Roylance D., Roylance M. Weathering of fiber-reinforced epoxy composites // Polymer Engineering and Science. 1978. Vol. 18. No. 4. P. 249–254.
15. Belec L., Nguyen T.H., Nguyen D.L., Chailan J.F. Comparative effects of humid tropical weathering and artificial ageing on a model composite properties from nano- to macro-scale // Composites. Part A. 2015. Vol. 68. No. 1. P. 235–241.
16. De Bruijn J.C.M., Meijer H.D.F. The design and application of a microfoil tensile test apparatus for monitoring the degree of ultraviolet degradation of polymers // Review of Scientific Instruments. 1991. No. 62. P. 1620–1623.
17. De Bruijn J.C.M. Degradation profiles of thick high-density polyethylene samples after outdoor and artificial weathering // Polymer durability: degradation, stabilization, and lifetime prediction. Washington: American Chemical Society, 1996. P. 599–620.
18. Gu X., Dickens B., Stanley D. et al. Linking accelerating laboratory test with outdoor performance results for a model epoxy coating system. Iowa State University, 2008. P. 1–47.
19. Деев И.С., Курышев Е.В., Лонский С.Л., Железина Г.Ф. Влияние длительного климатического старения на микроструктуру поверхности эпоксидных органопластиков и характер ее разрушения в условиях изгиба // Вопросы материаловедения. 2016. №3 (87). С. 104–114.
20. Старцев В.О. Климатическая стойкость полимерных композиционных материалов и защитных покрытий в умеренно теплом климате: дис. ... д-ра техн. наук. М.: ВИАМ, 2018. 308 с.
21. Старцев В.О., Валева Е.О., Гуляев А.И. Влияние старения поверхности полимерных композиционных материалов на их механические свойства // Труды ВИАМ. 2020. №8 (90). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 11.12.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-8-64-76.