

Научная статья

УДК 620.1:678.8

DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-10-94-108

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ УГЛЕПЛАСТИКА С ПОКРЫТИЯМИ ПОСЛЕ 8 И 13 ЛЕТ СТАРЕНИЯ В УМЕРЕННО ТЕПЛОМ КЛИМАТЕ Часть 1. Влагосодержание и коэффициенты диффузии влаги

О.В. Старцев^{1, 2}, Т.В. Коваль¹, А.С. Кротов², Е.В. Двирная¹, И.М. Велигодский¹

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

²Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Якутский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук» Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова Сибирского отделения Российской академии наук, Якутск, Россия; administration@iptpn.ysn.ru

Аннотация. Углепластик КМКУ-2м.120, защищенный фторэпоксидным (ВЭ-46) и акрилстирольным (АС-1115) покрытиями, экспонировали в открытых условиях умеренно теплого климата г. Геленджика в течение 8 и 13 лет. Исследована кинетика влагопереноса состаренных образцов углепластика. Значения относительного изменения массы образцов разных форм и размеров аппроксимированы одномерными и трехмерными моделями Фика и Ленгмюра. Определено влияние типа и цвета покрытия, продолжительности климатического воздействия на влагосодержание и коэффициенты диффузии влаги в плоскости армирования и трансверсальном направлении.

Ключевые слова: углепластик, фторэпоксидное покрытие, акрилстирольное покрытие, климатическое старение, сушка, увлажнение, влагоперенос, анизотропия

Для цитирования: Старцев О.В., Коваль Т.В., Кротов А.С., Двирная Е.В., Велигодский И.М. Исследование свойств углепластика с покрытиями после 8 и 13 лет старения в умеренно теплом климате. Часть 1. Влагосодержание и коэффициенты диффузии влаги // Труды ВИАМ. 2024. № 10 (140). Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-10-94-108.

Scientific article

INVESTIGATION OF THE PROPERTIES OF CARBON FIBER REINFORCED PLASTIC WITH COATINGS AFTER 8 AND 13 YEARS OF WEATHERING IN MODERATELY WARM CLIMATE Part 1. Moisture content and diffusion coefficients

O.V. Startsev^{1, 2}, T.V. Koval¹, A.S. Krotov², E.V. Dvirnaya¹, I.M. Veligodsky¹

¹Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

²V.P. Larionov Institute of the Physical-Technical Problems of the North, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences Federal state Budgetary Institution of Science, Yakutsk, Russia; administration@iptpn.ysn.ru

Abstract. Carbon fiber reinforced plastic (CFRP) KMKU-2m.120, protected by fluoroepoxide VE-46 and acrylic AC-1115 coatings, was exposed to natural weathering conditions in the moderately warm climate of Gelendzhik for 8 and 13 years of exposure. The moisture transfer kinetics in aged CFRP is studied. Fick and Langmuir one-dimensional and three-dimensional models were used to fit the experimental data: the relative change in the mass of samples of different shapes and sizes. The influence of the coating type and color, duration of natural weathering on moisture content and moisture diffusion coefficients (in-plane and transverse directions) was studied.

Keywords: carbon fiber reinforced plastic, fluoroepoxide coating, acrylic coating, natural weathering, drying, moistening, moisture diffusion, anisotropy

For citation: Startsev O.V., Koval T.V., Krotov A.S., Dvirnaya E.V., Veligodsky I.M. Investigation of the properties of carbon fiber reinforced plastic with coatings after 8 and 13 years of weathering in moderately warm climate. Part 1. Moisture content and diffusion coefficients. Trudy VIAM, 2024, no. 10 (140), paper no. 09. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-10-94-108.

Введение

В современном авиастроении углепластики на основе эпоксидных матриц относятся к наиболее востребованным полимерным композиционным материалам (ПКМ) [1, 2]. Они наиболее устойчивы к воздействию агрессивных факторов внешней среды [3]. Однако углепластики подвержены старению, в результате которого их свойства необратимо ухудшаются [4–6].

В инженерной практике нередко возникает необходимость определения состояния длительно работающих элементов авиационной техники, изготовленных из ПКМ, для установления возможности продолжения дальнейшей безопасной эксплуатации. В этом случае выполняются следующие действия:

- в соответствии с рекомендациями работ [3, 6–9] измеряются необходимые механические и физические показатели материала R_t из состава конструктивного элемента после периода эксплуатации продолжительностью t ;
- подтверждается, что показатели R_t находятся в области значений, допустимых для эксплуатации;
- назначается дополнительный период эксплуатации конструктивного элемента τ ;
- после достижения периода τ измеряются аналогичные показатели материала $R_{t+\tau}$;
- сравниваются значения R_t и $R_{t+\tau}$, проверяется справедливость общей закономерности, согласно которой на поздних этапах старения показатели R линейно снижаются [10];
- в зависимости от полученных результатов принимается решение о возможности и продолжительности дальнейшей эксплуатации материала.

Целесообразность такого подхода применительно к углепластикам подтверждена результатами многочисленных исследований [3–6]. Например, предел прочности при изгибе σ_b эпоксидного углепластика после 12 лет климатического воздействия изменялся в 6,9 раза медленнее, чем на начальном этапе [11]. Моделирование долговечности углепластиков в работах [12, 13] также основано на квазилинейном изменении показателей R на поздних этапах климатического старения.

Обычно для оценки старения ПКМ выбирают пределы прочности и модули упругости при растяжении (σ_b , E_t), сжатии (σ_c , E_c), изгибе (σ_b , E_b) и сдвиге (σ_s , G) [3–6, 14]. Однако для композитов с умеренно гидрофильными термореактивными матрицами при контроле стойкости к влаге часто исследуется кинетика влагопереноса в режимах сушки или в стационарных термовлажностных условиях [15–17]. Для вычисления коэффициента диффузии влаги D и относительного влагосодержания w применяют второй закон Фика [18]. Если влагоперенос имеет нелинейный характер, связанный с подвижностью молекул мобильной и связанной воды, то используют модель Ленгмюра [19].

Показатели влагопереноса в углепластиках изменяются в широких пределах [20]. Приведенные в табл. 1 примеры показывают зависимость D и w углепластиков от состава и пористости полимерной матрицы [15], состояния и обработки поверхности углеродного волокна, схемы армирования, режимов прессования [10], температуры и относительной влажности воздуха, продолжительности пребывания в воде или влажной среде и других факторов.

Таблица 1

Относительное влагосодержание (w) и коэффициенты диффузии влаги (D) углепластиков после термовлажностных и климатических воздействий

Углепластик	Условия испытаний	w , %	D , мм ² /сут	Литературный источник
Purofil TR50S/K51	100 сут в воде, 90 °С	1,3	0,36	[21]
Квазиизотропный эпоксидный	365 сут в морской воде, 30 °С	0,83	0,0028	[22]
	365 сут, 30 °С, $\phi = 70$ %	0,64	0,0012	
CF EL2 pultruded	112 сут в воде, 60 °С	1,2	0,026	[23]
CF Elium150/CY50	365 сут в морской воде, 60 °С	0,80	0,18	[24]
TG800/E207 [0] ₁₆	8 сут, 80 °С, $\phi = 90$ %	0,25	0,0018	[25]
TG800/E207 [90] ₁₆		0,20	0,0014	
T300/Epicoate 135	35 сут в морской воде, 60 °С	1,1	0,041	[26]
Однонаправленный эпоксидный	500 сут, 70 °С, $\phi = 85$ %	1,1	0,14; 0,060; 0,020*	[27]
Ероху IN2 [0, 90]	120 сут в воде, 20 °С	0,8	0,00076	[28]
T300/5208	196 сут, 49 °С, $\phi = 100$ %	1,3	0,056	[29]
	500 сут, 70 °С, $\phi = 100$ %	1,4	0,14	
Ероху molded prepreg	60 сут в воде, 30 °С	0,67	0,0048	[30]
	60 сут в воде, 55 °С	1,3	0,0062	
	40 сут в воде, 80 °С	3,3	0,0091	
Tenax UTS 5631/EPR 4434 tendonse	1710 сут в воде, 20 °С	1,1	0,79	[31]
	1710 сут в воде, 60 °С		2,2	
Ероху UD pultruded 977-2 UD	60 сут в воде, 60 °С	0,50	0,059	[32]
	144 сут, 70 °С, $\phi = 85$ %	0,60	0,058	[33]
IM7/8552 [0] ₁₆	135 сут, 70 °С, $\phi = 85$ %	0,39	0,035	[34]
IM7/8552 [± 45 , 0, 90] _{2s}		0,35	0,030	
UD134/AS-4/HexPly 8552	120 сут, 60 °С, $\phi = 85$ %	1,2	0,15	[35]
	180 сут климатического старения		0,24	
ВКУ-39	60 сут, 60 °С, $\phi = 100$ %	1,2	0,024; 0,044; 0,0016*	[36]
	60 сут, 60 °С, $\phi = 100$ % после 3 лет экспонирования на открытом стенде в г. Геленджике	1,1	0,017; 0,022; 0,0021*	

* Коэффициенты диффузии влаги в направлении длины (D_L), ширины (D_W) и толщины (D_H) образца.

Лишь в единичных исследованиях [27, 36] выявлены значения коэффициента диффузии влаги в трансверсальном направлении D_z , которые в разы или даже на порядок ниже соответствующих значений D_x , D_y в плоскости армирования пластин и наиболее важны для характеристики эксплуатационной стойкости крупногабаритных деталей из ПКМ.

Сорбция влаги сопровождается набуханием [6], пластификацией [17], гидролизом [11] и структурной релаксацией [37] полимерных матриц. Особый интерес представляют выявленные изменения показателей D и w при климатическом старении углепластиков [25, 36].

В работах [38–40] доказана эффективность лакокрасочных покрытий (ЛКП) для сохранения показателей R ПКМ при экспозиции в открытых климатических условиях. По данным работы [38], предел прочности при изгибе стеклопластика, защищенного акриловым покрытием, после 270 сут экспонирования в открытых климатических условиях Канады оказался на 19 % выше, чем показатель σ_b стеклопластика без покрытия.

Пластины стеклопластика на основе винилэфирного связующего испытаны на старение в климатических условиях Японии [39]. Показатели σ_t , σ_b и σ_s после 6 лет

экспозиции снизились на ~26 %. Для тех же пластин, защищенных акрилуретановым покрытием, среднее уменьшение R составило только 6 %. Авторы работы [40] в течение 11 лет выдерживали пултрузионный полиэфирный углепластик на открытом атмосферном стенде в морском климате. Оказалось, что показатель σ_s незащищенных пластин уменьшился на 32 %, а при защите фторсодержащим покрытием – сохранился на исходном уровне.

Несмотря на очевидную актуальность получения новых сведений о старении ПКМ при продолжительном пребывании в открытых климатических условиях [3, 4, 6], в научно-технической литературе отсутствуют сведения о кинетике влагопереноса в состаренных углепластиках, защищенных ЛКП. В связи с этим целью данного исследования является сравнение свойств углепластика на основе клеевого препрега КМКУ-2м.120, защищенного фторэпоксидным (ВЭ-46) и акрилстирольным (АС-1115) покрытиями разного цвета, после 8 и 13 лет экспозиции на открытом стенде в условиях умеренно теплого климата. В первой части работы анализируется влияние ЛКП и продолжительности старения на влагосодержание и коэффициенты диффузии влаги.

Материалы и методы

Для исследований использованы пластины углепластика из клеевого препрега КМКУ-2м.120 (наполнитель – углеродная лента ЭЛУР-П, матрица – эпоксидное связующее ВКС-14-2м), свойства которого рассмотрены в работе [41]. Пластины толщиной 3,3 мм состояли из 23 слоев с укладкой [0, 90]. Показатели R этого материала после 5 лет выдержки в условиях экстремально холодного климата [14] изменились незначительно. Например, значения σ_b , измеренные при температурах 20 и 120 °С, уменьшились всего на 6–9 %.

На поверхность пластин углепластика нанесена эпоксидная грунтовка ЭП-0104 толщиной 25 мкм, а поверх нее – два слоя фторэпоксидной эмали ВЭ-46 [42] или акрилстирольной эмали АС-1115 [43] общей толщиной 95±5 мкм. Результаты изучения атмосферостойкости данных ЛКП представлены в работах [44, 45].

Пластины углепластика экспонировали 8 и 13 лет на открытых стендах в умеренно теплом климате г. Геленджика, метеорологические показатели которого представлены в работе [46]. Исследовано состояние 10 пластин углепластика КМКУ-2м.120 (табл. 2). Внешний вид и цветовые характеристики ЛКП после климатического воздействия будут подробно проанализированы во второй части статьи.

Таблица 2

Характеристики пластин углепластика КМКУ-2м.120

Марка лакокрасочного покрытия	Цвет лакокрасочного покрытия	Обозначение пластины углепластика	Продолжительность экспозиции, лет
Без покрытия	–	Г0	8
ВЭ-46	Светло-серый	Г1	13
	Серо-голубой	Г2	
	Изумрудный	Г3	8
	Голубой	Г4	
	Темно-зеленый	Г5	
	Красный	Г6	
АС-1115	Оранжевый	Г7	13
	Желтый	Г8	8
	Синий	Г9	

Для исследования влагопереноса с повышенной достоверностью из каждой пластины углепластика вырезали с помощью фрезерного станка по 25 образцов длиной 100; 50; 25; 10 мм и шириной 100; 50; 25; 10 мм. Используя эти наборы, исследовали два режима влагопереноса. Сначала образцы сушили при температуре 60 °С в течение

175 сут в емкостях над прокаленным силикагелем. Затем просушенные образцы выдержали в закрытых эксикаторах над поверхностью воды при относительной влажности воздуха $\varphi = 98 \pm 2\%$ в течение 65 сут. Массу образцов измерили на аналитических весах с погрешностью 0,1 мг. По результатам этих измерений определили величину относительного влагосодержания $w(t) = (m_t - m_0)/m_0$, где m_t – масса материала в момент времени t ; m_0 – масса материала в начальный момент времени.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

Результаты, моделирование и обсуждение

Накопленный массив данных об изменении массы 225 образцов углепластика КМКУ-2м.120 с ЛКП и 16 контрольных образцов этого композита без защитного покрытия (85458 значений) использован для выявления особенностей влагопереноса. Характерные примеры стадий сушки и увлажнения образцов представлены на рис. 1.

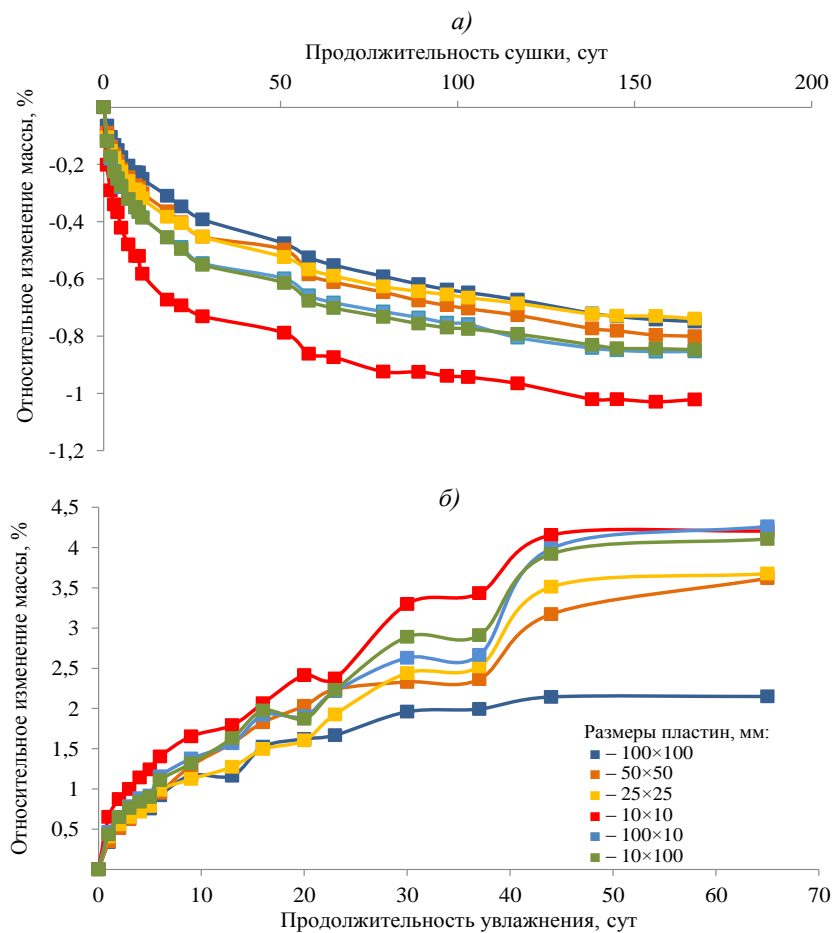


Рис. 1. Кинетика сушки (а) и увлажнения (б) образцов пластины Г4 с покрытием ВЭ-46 после 13 лет экспозиции

Прослеживаются хорошо выраженные различия зависимостей $w(t)$ от формы и размеров образцов, что является признаком анизотропии влагопереноса. На стадии сорбции поглощается существенно больше влаги, чем при сушке. Подобные кинетические кривые выявлены и для образцов углепластика, вырезанных из пластины Г0 без защитного покрытия после 8 лет натуральных испытаний (рис. 2).

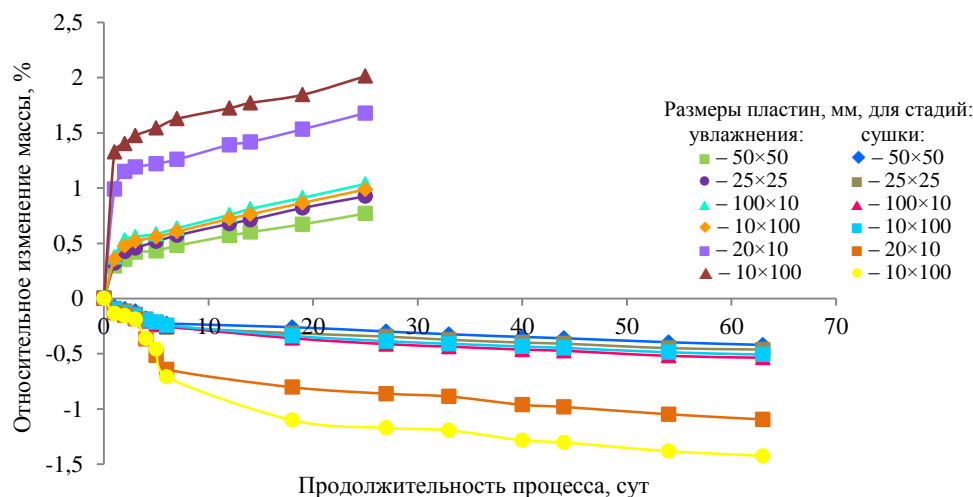


Рис. 2. Кинетика сушки и увлажнения образцов пластины Г0 без защитного покрытия после 8 лет экспозиции

Для аппроксимации кинетических кривых использовали модели Фика и Ленгмюра в одномерном и трехмерном приближениях (табл. 3). Математическая обработка результатов эксперимента проведена с помощью программного обеспечения FITTER [47].

Таблица 3

Модели для аппроксимации десорбции влаги из углепластика КМКУ-2м.120 с покрытиями ВЭ-46 и АС-1115

Условный номер	Обозначение	Формула	Описание
1	f1d	$w_{f1d}(t) = w_0(1 - 8SUM_r);$ $SUM_r = \sum_{r=0}^{\infty} \frac{\exp(-n_r^2 d_r t)}{n_r^2},$ $d_r = D_r / R_f^2, n_r = \pi(2r + 1), r = R; f = 1;$ $\frac{1}{R^2} = \frac{1}{L^2} + \frac{1}{W^2} + \frac{1}{H^2}$	Одномерный 2-й закон Фика с постоянными параметрами [18]
2	fl1d	$w_{fl1d}(t) = \frac{\beta}{\gamma + \beta} w_{f1d}(t) + w_0 \left(1 - \frac{\gamma}{\gamma + \beta} \exp(-\beta t) - \frac{\beta}{\gamma + \beta} \right);$ $w_{f1d}(t) = w_0(1 - 8SUM_r)$	Одномерная модель Ленгмюра с постоянными параметрами [19]
3	f3d	$w_{f3d}(t) = w_0(1 - 512SUM_x SUM_y SUM_z);$ $SUM_r = \sum_{r=0}^{\infty} \frac{\exp(-n_r^2 d_r t)}{n_r^2},$ $d_r = D_r / R_f^2, n_r = \pi(2r + 1), r = x, y, z, f = 1, 2, 3$	Трехмерный 2-й закон Фика с постоянными параметрами [18]
4	fl3d	$w_{fl3d}(t) = \frac{\beta}{\gamma + \beta} w_{f3d}(t) + w_0 \left(1 - \frac{\gamma}{\gamma + \beta} \exp(-\beta t) - \frac{\beta}{\gamma + \beta} \right);$ $w_{f3d}(t) = w_0(1 - 512SUM_x SUM_y SUM_z)$	Трехмерная модель Ленгмюра с постоянными параметрами [20, 46]

Примечание. D – коэффициент диффузии влаги; w – относительное влагосодержание; x, y, z – координаты, вдоль которых диффундирует влага; L, W, H – геометрические размеры образца; t – продолжительность процесса; D_i – компоненты коэффициента диффузии вдоль основных направлений $i = \{x, y, z\}$; β – вероятность в единицу времени превращения связанной воды в мобильную; γ – вероятность в единицу времени превращения мобильной воды в связанную.

На рис. 3 представлены примеры результатов моделирования кинетики влагопереноса образцов пластин Г1 (с покрытием ВЭ-46) и Г7 (с покрытием АС-1115) размером 100×100 мм после 13 лет старения с помощью одномерных моделей f1d и fl1d на стадиях сушки и увлажнения. Модели 1 и 2 с высокой точностью (коэффициент детерминации $R^2 \geq 0,98$) справедливы для пластин с покрытием ВЭ-46 на стадиях сушки и сорбции. Для углепластика КМКУ-2м.120 с акрилстирольным покрытием модели 1 и 2 также точно аппроксимируют зависимости $w(t)$, но на стадии увлажнения ошибки аппроксимации возрастают.

Показатели моделей 1–4, усредненные по видам покрытий, для стадий сушки и увлажнения представлены в табл. 4 и 5.

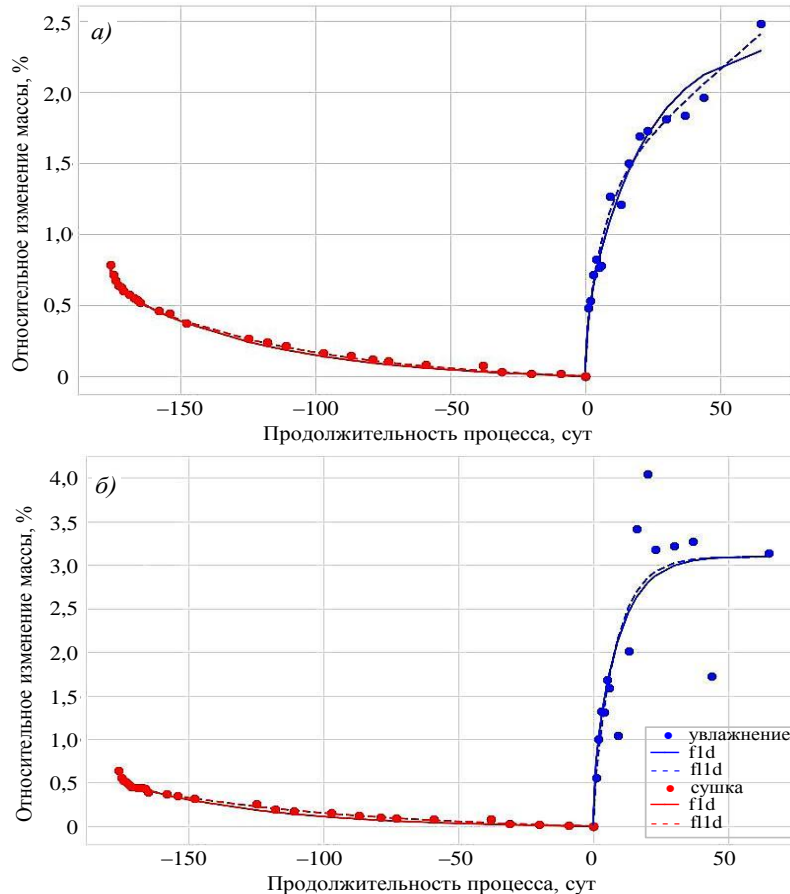


Рис. 3. Моделирование кинетики влагопереноса образцов пластин Г1 (а) и Г7 (б) размером 100×100 мм после 13 лет старения с помощью одномерных моделей f1d и fl1d на стадиях сушки и увлажнения

Если не учитывать анизотропию влагопереноса, то одномерные модели 1 и 2 показывают 2–3-кратное снижение коэффициента диффузии влаги на стадии сушки для образцов, защищенных фторэпоксидным покрытием. При этом показатель $D = 0,038 \text{ мм}^2/\text{сут}$ при защите покрытием ВЭ-46 одинаков после 8 и 13 лет старения, что является признаком высокой климатической стойкости и эффективности защиты фторэпоксидного покрытия при длительных сроках климатического воздействия. Аналогичную стабильность показателя D для акрилстирольного ЛКП демонстрирует табл. 4. Однако, по данным модели Ленгмюра, покрытие АС-1115 вызывает увеличение показателя D в 2–2,5 раза. Вычисления по модели 2 показывают, что незащищенный углепластик после 8 лет пребывания в открытых климатических условиях накапливает во внутренних слоях в 2–3 раза больше влаги, чем при использовании ЛКП.

Таблица 4

Показатели моделей 1–4, использованных для аппроксимации десорбции влаги из углепластика КМКУ-2м.120 без покрытия и с покрытиями ВЭ-46, АС-1115

Условный номер (обозначение) модели	Показатели модели	Средние значения показателей модели для углепластика с покрытием				
		без покрытия	ВЭ-46		АС-1115	
		при экспозиции в течение, лет				
		8	8	13	8	13
1 (f1d)	$w_0, \%$	0,673	0,690	0,760	0,600	0,700
	$D, \text{мм}^2/\text{сут}$	0,132	0,038	0,038	0,043	0,050
	R^2	0,975	0,978	0,980	0,961	0,965
2 (f1d)	$w_0, \%$	2,03	1,00	0,83	0,67	0,78
	$D, \text{мм}^2/\text{сут}$	0,529	0,300	0,280	1,300	1,100
	$\beta, \text{сут}^{-1}$	0,025	0,016	0,016	0,018	0,015
	$\gamma, \text{сут}^{-1}$	>0,200	0,030	0,030	0,031	0,028
	R^2	0,990	0,997	0,996	0,991	0,993
3 (f3d)	$w_0, \%$	1,66	0,75	0,85	0,66	0,78
	$D_L, \text{мм}^2/\text{сут}$	0,039	0,120	0,160	0,180	0,120
	$D_W, \text{мм}^2/\text{сут}$	0,070	0,120	0,068	0,140	0,200
	$D_H, \text{мм}^2/\text{сут}$	<0,0010	0,0087	0,0095	0,0100	0,0081
	R^2	0,7820	0,9690	0,9380	0,9400	0,9020
4 (f13d)	$w_0, \%$	1,62	0,81	0,90	0,74	0,89
	$D_L, \text{мм}^2/\text{сут}$	0,039	0,072	0,180	0,062	0,052
	$D_W, \text{мм}^2/\text{сут}$	0,071	0,071	0,051	0,050	0,075
	$D_H, \text{мм}^2/\text{сут}$	<0,0010	0,0058	0,0072	0,0053	0,0036
	$\beta, \text{сут}^{-1}$	0,17	0,40	0,18	0,59	0,63
	$\gamma, \text{сут}^{-1}$	0,0024	0,0500	0,0230	0,1100	0,1100
	R^2	0,784	0,975	0,942	0,956	0,916

Таблица 5

Показатели моделей 1–4, использованных для аппроксимации сорбции влаги из углепластика КМКУ-2м.120 без покрытия и с покрытиями ВЭ-46, АС-1115

Условный номер (обозначение) модели	Показатели модели	Средние значения показателей модели для углепластика с покрытием				
		без покрытия	ВЭ-46		АС-1115	
		при экспозиции в течение, лет				
		8	8	13	8	13
1 (f1d)	$w_0, \%$	1,0	3,5	4,2	7,7	8,5
	$D, \text{мм}^2/\text{сут}$	0,710	0,044	0,035	0,043	0,017
	R^2	0,932	0,943	0,971	0,783	0,784
2 (f1d)	$w_0, \%$	4,5	5,1	7,1	8,5	9,0
	$D, \text{мм}^2/\text{сут}$	2,90	9,20	0,72	>9,00	>9,00
	$\beta, \text{сут}^{-1}$	0,037	0,037	0,017	0,029	0,020
	$\gamma, \text{сут}^{-1}$	0,028	0,310	0,099	>0,800	0,360
	R^2	0,997	0,953	0,982	0,812	0,821
3 (f3d)	$w_0, \%$	1,3	4,1	4,2	7,8	7,5
	$D_L, \text{мм}^2/\text{сут}$	0,5800	0,0360	0,0530	0,0160	0,0086
	$D_W, \text{мм}^2/\text{сут}$	2,1000	0,0590	0,0560	0,0150	0,0048
	$D_H, \text{мм}^2/\text{сут}$	0,0099	0,0160	0,0140	0,0070	0,0086
	R^2	0,695	0,911	0,948	0,728	0,712
4 (f13d)	$w_0, \%$	1,60	0,81	5,00	0,74	>10,00
	$D_L, \text{мм}^2/\text{сут}$	0,130	0,098	0,560	0,034	0,040
	$D_W, \text{мм}^2/\text{сут}$	0,220	0,170	0,290	0,110	0,017
	$D_H, \text{мм}^2/\text{сут}$	<0,0010	0,0090	0,0100	0,0043	0,0026
	$\beta, \text{сут}^{-1}$	>0,5000	0,0600	0,0530	0,0092	0,0120
	$\gamma, \text{сут}^{-1}$	>0,800	0,033	0,021	0,025	0,021
	R^2	0,751	0,917	0,954	0,745	0,731

Важные результаты получены при обработке данных на стадии сушки трехмерными моделями (табл. 4). Несмотря на достаточно высокую погрешность аппроксимации для образцов без защиты ($R^2 = 0,78$), выявлена очевидная анизотропия влагопереноса, подобная описанной в работах [27, 36]. Коэффициент диффузии влаги в трансверсальном направлении D_H для незащищенных образцов углепластика в 40–70 раз меньше, чем для компонентов тензора диффузии в плоскости армирования (D_L, D_W). Эта закономерность прослеживается и для пластин, защищенных ЛКП: отмечена разница в 12–25 раз.

Если использовать максимальное влагосодержание и коэффициент диффузии влаги при сушке как критерии старения углепластика КМКУ-2м.120 с защитными ЛКП, то можно сделать вывод об очевидной стабильности этих показателей за пятилетний период между 8 и 13 годами климатического воздействия.

Результаты моделирования диффузии влаги на стадии увлажнения (табл. 5) также дали ценную информацию о поведении защитных покрытий при старении углепластика. Влажный воздух ($\varphi = 98 \pm 2 \%$) при температуре $60 \text{ }^\circ\text{C}$ оказался чрезвычайно активной средой, вызвавшей ускоренное старение ЛКП. Вода в жидком состоянии накопилась в пространстве между грунтовкой и эмалями в пузырьках, легко разрушающихся при слабом механическом воздействии. На рис. 4 показаны поверхности покрытия АС-1115 после 65 сут увлажнения.



Рис. 4. Внешний вид покрытия АС-1115 на поверхности образцов пластин Г7 (а), Г8 (б) и Г9 (в) после 65 сут увлажнения

При моделировании влагопереноса на стадии увлажнения все четыре модели показали увеличение показателя w_0 до 7,5–10 %. Очевидно, что такое количество влаги не проникло в объем углепластика, а осталось в слое ЛКП. По этой причине для углепластика с акрилстирольным покрытием модели Фика и Ленгмюра продемонстрировали большие погрешности ($R^2 = 0,74 \pm 0,04$). Фторэпоксидное покрытие проявило более высокую стойкость к термовлажностному старению, особенно после 8 лет климатического воздействия (табл. 5).

Таким образом, стадию увлажнения при влажности $98 \pm 2 \%$ и температуре $60 \text{ }^\circ\text{C}$ можно использовать для оценки состояния ЛКП на поверхности конструктивных элементов, изготовленных из углепластика, после различных периодов пребывания в натуральных климатических условиях.

Заключения

Нанесенные на поверхность углепластиков ЛКП повышают их стойкость к климатическому старению как по механическим показателям, так и по характеристикам влагопереноса.

Для выявления эффективности защитных свойств ЛКП из состаренных пластин целесообразно вырезать образцы разных форм и размеров, измерить их массу при выдержке сначала в сухом, а потом во влажном воздухе при температуре 60 °С. Стадии сушки и увлажнения должны длиться ≥ 60 сут.

Результаты взвешивания необходимо аппроксимировать одномерными и трехмерными моделями Фика и Ленгмюра для всей совокупности образцов разных форм и размеров, чтобы с высокой достоверностью прогнозировать влагосодержание и коэффициенты диффузии в плоскости армирования и трансверсальном направлении.

Результаты моделирования показали, что для образцов углепластика без ЛКП коэффициент диффузии влаги в трансверсальном направлении в 40–70 раз меньше, чем для компонентов тензора диффузии в плоскости армирования. Эта закономерность сохраняется при использовании ЛКП.

Незащищенный углепластик после 8 и 13 лет пребывания в открытых климатических условиях накапливает во внутренних слоях в 2–3 раза больше влаги, чем при использовании ЛКП. При этом фторэпоксидное покрытие более стойко к атмосферному старению, чем акрилстирольное.

Термовлажностное воздействие при влажности 98 ± 2 % и температуре 60 °С на климатически состаренный углепластик можно использовать как эффективную методику оценки состояния ЛКП на поверхности композита после различных периодов климатического воздействия.

Во второй части данной статьи будут представлены результаты исследования пластифицирующего действия влаги на ЛКП состаренного углепластика, полученные методом динамического механического анализа.

Данная работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда № 24-19-00009, <https://rscf.ru/project/24-19-00009/>.

Список источников

1. Irving P., Soutis C. Polymer composites in the aerospace industry. 2nd ed. Cambridge: Woodhead Publishing, 2019. 688 p.
2. Старцев В.О., Антипов В.В., Славин А.В., Горбовец М.А. Современные отечественные полимерные композиционные материалы для авиастроения (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2023. № 2 (71). Ст. 10. URL: <https://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 14.03.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-122-144.
3. Каблов Е.Н., Старцев В.О. Системный анализ влияния климата на механические свойства полимерных композиционных материалов по данным отечественных и зарубежных источников (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2018. № 2 (51). С. 47–58. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-2-47-58.
4. Tomblin J., Salah L., Hoffman D. Durability and aging of composite aircraft structures // *Long-term durability of polymeric matrix composites*. Boston, MA: Springer US, 2011. P. 513–548.
5. *Авиационные материалы: справочник в 13 т. / под общ. ред. Е.Н. Каблова. М., 2015. Т. 13: Климатическая и микробиологическая стойкость неметаллических материалов. 270 с.*
6. Каблов Е.Н., Старцев В.О., Лаптев А.Б. Старение полимерных композиционных материалов. М.: НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, 2023. 520 с.
7. Шершак П.В., Яковлев Н.О., Сутубалов А.И. Стандарты по испытаниям полимерных композиционных материалов. Часть 1. Растяжение // *Авиационные материалы и технологии*. 2023. № 3 (72). Ст. 12. URL: <https://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 25.04.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-3-152-166.
8. Шершак П.В., Сутубалов А.И., Яковлев Н.О., Шерстюк Ф.А. Стандарты по испытаниям полимерных композиционных материалов. Часть 2. Сжатие // *Авиационные материалы и технологии*. 2024. № 2 (75). Ст. 12. URL: <https://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 25.04.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-2-149-166.

9. Startsev O.V., Vapirov Y.M., Lebedev M.P., Kychkin A.K. Comparison of glass-transition temperatures for epoxy polymers obtained by methods of thermal analysis // *Mechanics of Composite Materials*. 2020. Vol. 56. P. 227–240. DOI: 10.1007/s11029-020-09875-5.
10. Старцев О.В., Аниховская Л.И., Литвинов А.А., Кротов А.С. Повышение достоверности прогнозирования свойств полимерных композитных материалов при термовлажностном старении // *Доклады академии наук*. 2009. Т. 428. С. 56–60.
11. Kudo A., Ben G. Estimation of weatherability flexural properties for CFRP subjected to long-term outdoor exposure // *18th International Conference on Composite Materials*. Jeju, 2011. Art. W27–3.
12. Yi L., Peng X.Q., Wang Q.F., Yang Y.X. Time-dependent deterioration of carbon fiber reinforced polymer affected by climatic factors // *Advanced Materials Research*. 2012. Vol. 457–458. P. 320–324.
13. Tao L., Min W., Qi L. The hygrothermal aging process and mechanism of CFRP papered by prepreg that may be stored at room temperature // *Polymer Degradation and Stability*. 2020. Vol. 182. P. 109395. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2020.109395.
14. Shvedkova A.K., Petrova A.P., Buznik V.M. Climate resistance of composite materials based on adhesive prepregs under arctic conditions // *Polymer Science. Ser.: D*. 2016. Vol. 9. P. 165–171. DOI: 10.1134/S1995421216020210.
15. Startsev V.O., Il'ichev A.V. Effect of mechanical impact energy on the sorption and diffusion of moisture in reinforced polymer composite samples on variation of their sizes // *Mechanics of Composite Materials*. 2018. Vol. 54. P. 145–154. DOI: 10.1007/s11029-018-9727-7.
16. Cavasin M., Sangermano M., Thomson B., Giannis S. Exposure of glass fiber reinforced polymer composites in seawater and the effect on their physical performance // *Materials*. 2019. Vol. 12. Paper 807. DOI: 10.3390/ma12050807.
17. Старцев О.В., Старцев В.О., Коган А.М., Варданян А.М. Изменение пластифицирующего воздействия влаги при климатическом старении полимерных композиционных материалов // *Деформация и разрушение материалов*. 2024. № 1. С. 16–26. DOI: 10.31044/1814-4632-2024-1-16-26.
18. Crank J. *The mathematics of diffusion*. 2nd ed. Oxford: Clarendon press, 1975. 414 p.
19. Carter H.G., Kibler K.G. Langmuir-type model for anomalous moisture diffusion in composite resins // *Journal Composite Materials*. 1978. Vol. 12. P. 118–131. DOI: 10.1177/002199837801200201.
20. Korkees F. Moisture absorption behavior and diffusion characteristics of continuous carbon fiber reinforced epoxy composites: a review // *Polymer-Plastics Technology and Materials*. 2023. Vol. 62. P. 1789–1822. DOI: 10.1080/25740881.2023.2234461.
21. Almudaihesh F., Holford K., Pullin R., Eaton M.A. Comparison study of water diffusion in uni-directional and 2D woven carbon/epoxy composites // *Polymer Composites*. 2022. Vol. 43. P. 118–129. DOI: 10.1002/pc.26361.
22. Althal S., Hossagadde P.N., Kini M.V., Pai D. Durability study of quasi-isotropic carbon/epoxy composites under various environmental conditions // *Iranian Polymer Journal*. 2023. Vol. 32. P. 873–885. DOI: 10.1007/s13726-023-01172-x.
23. Bone J.E., Sims G.D., Maxwell A.S. On the relationship between moisture uptake and mechanical property changes in a carbon fibre/epoxy composite // *Journal of Composite Materials*. 2022. Vol. 65. P. 2189–2199. DOI: 10.1177/00219983221091465.
24. Davies P., Le Gac P.Y., Le Gall M. Influence of sea water aging on the mechanical behavior of acrylic matrix composites // *Applied Composite Materials*. 2017. Vol. 24. P. 97–111. DOI: 10.1007/s10443-016-9516-1.
25. Du Y., Yu'e M.A., Wenbo S.U.N., Zhenhai W.A.N.G. Effect of hygrothermal aging on moisture diffusion and tensile behavior of CFRP composite laminates // *Chinese Journal of Aeronautics*. 2023. Vol. 36. P. 382–392. DOI: 10.1016/j.cja.2022.11.022.
26. Nandagopal R.A., Boay C.G., Narasimalu S. An empirical model to predict the strength degradation of the hygrothermal aged CFRP material // *Composite Structures*. 2020. Vol. 236. Art. 111876. DOI: 10.1016/j.compstruct.2020.111876.
27. Arnold J.C., Alston S.M., Korkees F. An assessment of methods to determine the directional moisture diffusion coefficients of composite materials // *Composites: Part A*. 2013. Vol. 55. P. 120–128. DOI: 10.1016/j.compositesa.2013.08.012.
28. Korkees F., Morris E., Jarrett W., Swart R. Characterization of moisture absorption and flexural performance of functionalized graphene modified carbon fiber composites under low energy impact // *Polymer Composites*. 2023. Vol. 44. P. 3325–3340. DOI: 10.1002/pc.27324.

29. Loos A.C., Springer G.S. Moisture absorption of graphite-epoxy composites immersed in liquids and in humid air // *Journal of Composite Materials*. 1979. Vol. 13. P. 131–147. DOI: 10.1177/002199837901300205.
30. Mei J., Tan P.J., Liu J. Moisture absorption characteristics and mechanical degradation of composite lattice truss core sandwich panel in a hygrothermal environment // *Composites. Part A*. 2019. Vol. 127. Art. 105647. DOI: 10.1016/j.compositesa.2019.105647.
31. Scott P., Toumpanaki E., Lees J.M. Solution uptake in cylindrical carbon-fibre-reinforced polymer (CFRP) tendons // *Advances in Polymer Technology*. 2022. Vol. 2022. Art. 1981256. DOI: 10.17863/CAM.91288.
32. Gagani A., Krauklis A., Echtermeyer A.T. Anisotropic fluid diffusion in carbon fiber reinforced composite rods: Experimental, analytical and numerical study // *Marine Structures*. 2018. Vol. 59. P. 47–59. DOI: 10.1016/j.marstruct.2018.01.003.
33. Ryan J.M., Adams R., Brown S.G.R. Moisture ingress effect on properties of CFRP // *Proceedings of ICCM-17 – 17th International Conference on Composite Materials*. Edinburgh, United Kingdom. 2009. P. 1–10.
34. Revathi A., Sendil M.M., Shylaja S. et al. Effect of hot-wet conditioning on the mechanical and thermal properties of IM7/8552 carbon fiber composite // *Indian Journal of Advances in Chemical Science*. 2014. Vol. 2. P. 84–88.
35. Панин С.В., Старцев О.В., Кротов А.С. Диагностика начальной стадии климатического старения ПКМ по изменению коэффициента диффузии влаги // *Труды ВИАМ*. 2014. № 7. Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 11.06.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-7-9-9.
36. Старцев В.О., Славин А.В. Стойкость углепластиков и стеклопластиков на основе расплавных связующих к воздействию умеренно холодного и умеренно теплого климата // *Труды ВИАМ*. 2021. № 5 (99). Ст. 12. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 21.06.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-5-114-126.
37. Kablov E.N., Startsev O.V., Krotov A.S., Kirillov V.N. Climatic aging of composite aviation materials: III. Significant aging factors // *Russian Metallurgy (Metally)*. 2012. Vol. 2012. No. 4. P. 323–329. DOI: 10.1134/S0036029512040040.
38. Heinrick M., Crawford B., Milani A.S. Degradation of fibreglass composites under natural weathering conditions // *MOJ Polymer Science*. 2017. Vol. 1. P. 18–24. DOI: 10.15406/mojps.2017.01.00004.
39. Nishizaki I., Kishima T., Sasaki I. Deterioration of mechanical properties of pultruded FRP through exposure tests // *Third International Conference on Durability & Field Applications of FRP Composites for Construction*. Quebec City, 2007. P. 159–166.
40. Nishizaki I., Sasaki I., Tomiyama T. Outdoor exposure tests of pultruded CFRP plates // *Proceeding of the 6th International Conference on FRP Composites in Civil Engineering*. Calgary, Alberta, 2012. Art. 11-096.
41. Куцевич К.Е., Дементьева Л.А., Лукина Н.Ф. Свойства и назначение полимерных композиционных материалов на основе клеевых препрегов // *Труды ВИАМ*. 2016. № 8 (44). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 05.05.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-8-7-7.
42. Семенова Л.В., Нефедов Н.И., Белова М.В., Лаптев А.Б. Системы лакокрасочных покрытий для вертолетной техники // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. № 4 (49). С. 56–61. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-4-56-61.
43. Старцев О.В., Болонин А.Б., Вапиров Ю.М., Владимирский В.Н., Офицерова М.Г. Улучшение вязкоупругих свойств акриловой эмали АС-1115 // *Лакокрасочные материалы и их применение*. 1986. № 4. С. 16–18.
44. Старцев В.О., Фролов А.С. Влияние климатического воздействия на цветовые характеристики лакокрасочных покрытий // *Лакокрасочные материалы и их применение*. 2015. № 3. С. 16–18.
45. Павлов А.В., Андреева Н.П., Павлов М.Р., Меркулова Ю.И. Климатические испытания лакокрасочного покрытия на основе фторопласта и особенности его деструкции // *Труды ВИАМ*. 2019. № 5 (77). Ст. 12. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 01.07.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-5-103-110.
46. Yuan Z., Wang C., Jin L. A modified Langmuir model for moisture diffusion in UGFRE of composite insulator considering the composite degradation // *Polymers*. 2022. Vol. 14. Art. 2922. DOI: 10.3390/polym14142922.

47. Bystritskaya E.V., Pomerantsev A.L., Rodionova O.Y. Non-linear regression analysis: new approach to traditional implementations // *Journal of Chemometrics*. 2000. Vol. 14. P. 667–692.

References

1. Irving P., Soutis C. *Polymer composites in the aerospace industry*. Cambridge: 2nd ed. Woodhead Publishing, 2019, 688 p.
2. Startsev V.O., Antipov V.V., Slavin A.V., Gorbovets M.A. Modern domestic polymer composite materials for aviation industry (review). *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 2 (71), paper no. 10. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: March 14, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-122-144.
3. Kablov E.N., Startsev V.O. Systematical analysis of the climatic influence on mechanical properties of the polymer composite materials based on domestic and foreign sources (review). *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2018, no. 2 (51), pp. 47–58. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-2-47-58.
4. Tomblin J., Salah L., Hoffman D. Durability and aging of composite aircraft structures. *Long-term durability of polymeric matrix composites*. Boston, MA: Springer, 2011, pp. 513–548.
5. *Aviation materials: a reference book in 13 vols*. Ed. E.N. Kablov. Moscow, 2015, vol. 13: Climatic and microbiological resistance of non-metallic materials, 270 p.
6. Kablov E.N., Startsev V.O., Laptev A.B. *Aging of polymer composite materials*. Moscow: National Research Center «Kurchatov Institute» – VIAM, 2023, 520 p.
7. Shershak P.V., Yakovlev N.O., Sutubalov A.I. Standards for testing polymer composite materials. Part 1. Tensile properties. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 3 (72), paper no. 12. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: April 25, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-3-152-166.
8. Shershak P.V., Sutubalov A.I., Yakovlev N.O., Sherstyuk F.A. Standards test methods for polymer matrix composite materials. Part 2. Compression properties. *Aviation materials and technologies*, 2024, no. 1 (74), paper no. 00. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: April 25, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-2-149-166.
9. Startsev O.V., Vapirov Y.M., Lebedev M.P., Kychkin A.K. Comparison of glass-transition temperatures for epoxy polymers obtained by methods of thermal analysis. *Mechanics of Composite Materials*, 2020, vol. 56, pp. 227–240. DOI: 10.1007/s11029-020-09875-5.
10. Startsev O.V., Anikhovskaya L.I., Litvinov A.A., Krotov A.S. Increasing the reliability of predicting the properties of polymer composite materials during thermal and humidity aging. *Doklady akademii nauk*, 2009, vol. 428, p. 56–60.
11. Kudo A., Ben G. Estimation of weatherability flexural properties for CFRP subjected to long-term outdoor exposure. *18th International Conference on Composite Materials*. Jeju, 2011, art. W27–3.
12. Yi L., Peng X.Q., Wang Q.F., Yang Y.X. Time-dependent deterioration of carbon fiber reinforced polymer affected by climatic factors. *Advanced Materials Research*, 2012, vol. 457–458, pp. 320–324.
13. Tao L., Min W., Qi L. The hygrothermal aging process and mechanism of CFRP papered by prepreg that may be stored at room temperature. *Polymer Degradation and Stability*, 2020, vol. 182, pp. 109395. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2020.109395.
14. Shvedkova A.K., Petrova A.P., Buznik V.M. Climate resistance of composite materials based on adhesive prepregs under arctic conditions. *Polymer Science. Ser.: D*, 2016, vol. 9, pp. 165–171. DOI: 10.1134/S1995421216020210.
15. Startsev V.O., Il'ichev A.V. Effect of mechanical impact energy on the sorption and diffusion of moisture in reinforced polymer composite samples on variation of their sizes. *Mechanics of Composite Materials*, 2018, vol. 54, pp. 145–154. DOI: 10.1007/s11029-018-9727-7.
16. Cavasin M., Sangermano M., Thomson B., Giannis S. Exposure of glass fiber reinforced polymer composites in seawater and the effect on their physical performance. *Materials*, 2019, vol. 12, paper 807. DOI: 10.3390/ma12050807.
17. Startsev O.V., Startsev V.O., Kogan A.M., Vardanyan A.M. Change in the plasticizing effect of moisture during climatic aging of polymer composite materials. *Deformatsiya i razrusheniye materialov*, 2024, no. 1, p. 16–26. DOI: 10.31044/1814-4632-2024-1-16-26.
18. Crank J. *The mathematics of diffusion*. 2nd ed. Oxford: Clarendon press, 1975. 414 p.
19. Carter H.G., Kibler K.G. Langmuir-type model for anomalous moisture diffusion in composite resins. *Journal Composite Materials*, 1978, vol. 12, pp. 118–131. DOI: 10.1177/002199837801200201.

20. Korkees F. Moisture absorption behavior and diffusion characteristics of continuous carbon fiber reinforced epoxy composites: a review. *Polymer-Plastics Technology and Materials*, 2023, vol. 62, pp. 1789–1822. DOI: 10.1080/25740881.2023.2234461.
21. Almudaihesh F., Holford K., Pullin R., Eaton M.A. Comparison study of water diffusion in unidirectional and 2D woven carbon/epoxy composites. *Polymer Composites*, 2022, vol. 43, pp. 118–129. DOI: 10.1002/pc.26361.
22. Althal S., Hossagadde P.N., Kini M.V., Pai D. Durability study of quasi-isotropic carbon/epoxy composites under various environmental conditions. *Iranian Polymer Journal*, 2023, vol. 32, pp. 873–885. DOI: 10.1007/s13726-023-01172-x.
23. Bone J.E., Sims G.D., Maxwell A.S. On the relationship between moisture uptake and mechanical property changes in a carbon fibre/epoxy composite. *Journal of Composite Materials*, 2022, vol. 65, pp. 2189–2199. DOI: 10.1177/00219983221091465.
24. Davies P., Le Gac P.Y., Le Gall M. Influence of sea water aging on the mechanical behavior of acrylic matrix composites. *Applied Composite Materials*, 2017, vol. 24, pp. 97–111. DOI: 10.1007/s10443-016-9516-1.
25. Du Y., Yu'e M.A., Wenbo S.U.N., Zhenhai W.A.N.G. Effect of hygrothermal aging on moisture diffusion and tensile behavior of CFRP composite laminates. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2023, vol. 36, pp. 382–392. DOI: 10.1016/j.cja.2022.11.022.
26. Nandagopal R.A., Boay C.G., Narasimalu S. An empirical model to predict the strength degradation of the hygrothermal aged CFRP material. *Composite Structures*, 2020, vol. 236, art. 111876. DOI: 10.1016/j.compstruct.2020.111876.
27. Arnold J.C., Alston S.M., Korkees F. An assessment of methods to determine the directional moisture diffusion coefficients of composite materials. *Composites: Part A*, 2013, vol. 55, pp. 120–128. DOI: 10.1016/j.compositesa.2013.08.012.
28. Korkees F., Morris E., Jarrett W., Swart R. Characterization of moisture absorption and flexural performance of functionalized graphene modified carbon fiber composites under low energy impact. *Polymer Composites*, 2023, vol. 44, pp. 3325–3340. DOI: 10.1002/pc.27324.
29. Loos A.C., Springer G.S. Moisture absorption of graphite-epoxy composites immersed in liquids and in humid air. *Journal of Composite Materials*, 1979, vol. 13, pp. 131–147. DOI: 10.1177/002199837901300205.
30. Mei J., Tan P.J., Liu J. Moisture absorption characteristics and mechanical degradation of composite lattice truss core sandwich panel in a hygrothermal environment. *Composites. Part A*, 2019, vol. 127, art. 105647. DOI: 10.1016/j.compositesa.2019.105647.
31. Scott P., Toumpanaki E., Lees J.M. Solution uptake in cylindrical carbon-fibre-reinforced polymer (CFRP) tendons. *Advances in Polymer Technology*, 2022, vol. 2022, art. 1981256. DOI: 10.17863/CAM.91288.
32. Gagani A., Krauklis A., Echtermeyer A.T. Anisotropic fluid diffusion in carbon fiber reinforced composite rods: Experimental, analytical and numerical study. *Marine Structures*, 2018, vol. 59, pp. 47–59. DOI: 10.1016/j.marstruct.2018.01.003.
33. Ryan J.M., Adams R., Brown S.G.R. Moisture ingress effect on properties of CFRP. *Proceedings of ICCM-17 – 17th International Conference on Composite Materials*. Edinburgh, United Kingdom, 2009, pp. 1–10.
34. Revathi A., Sendil M.M., Shylaja S. et al. Effect of hot-wet conditioning on the mechanical and thermal properties of IM7/8552 carbon fiber composite. *Indian Journal of Advances in Chemical Science*, 2014, vol. 2, pp. 84–88.
35. Panin S.V., Startsev O.V., Krotov A.S. Initial stage environmental degradation of the polymer matrix composites evaluated by Water diffusion coefficient. *Trudy VIAM*, 2014, no. 7, paper no. 09. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: June 11, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-7-9-9.
36. Startsev V.O., Slavin A.V. Carbon and glass reinforced polymer based on solventfree binders resistance to the impact of a moderate cold and moderate warm climate. *Trudy VIAM*, 2021, no. 5 (99), paper no. 12. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: June 21, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-5-114-126.
37. Kablov E.N., Startsev O.V., Krotov A.S., Kirillov V.N. Climatic aging of composite aviation materials: III. Significant aging factors. *Russian Metallurgy (Metally)*, 2012, vol. 2012, no. 4, pp. 323–329. DOI: 10.1134/S0036029512040040.

38. Heinrick M., Crawford B., Milani A.S. Degradation of fibreglass composites under natural weathering conditions. *MOJ Polymer Science*, 2017, vol. 1, pp. 18–24. DOI: 10.15406/mojps.2017.01.00004.
39. Nishizaki I., Kishima T., Sasaki I. Deterioration of mechanical properties of pultruded FRP through exposure tests. *Third International Conference on Durability & Field Applications of FRP Composites for Construction*. Quebec City, 2007, pp. 159–166.
40. Nishizaki I., Sasaki I., Tomiyama T. Outdoor exposure tests of pultruded CFRP plates. *Proceeding of the 6th International Conference on FRP Composites in Civil Engineering*. Calgary, Alberta, 2012, art. 11-096.
41. Kutsevich K.E., Dementeva L.A., Lukina N.F. Properties and application of polymer composite materials based on glue prepregs. *Trudy VIAM*, 2016, no. 8, paper no. 7. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: May 05, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-8-7-7.
42. Semenova L.V., Nefedov N.I., Belova M.V., Laptev A.B. Systems of paint coatings for helicopter equipment. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2017, no. 4 (49), pp. 56–61. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-4-56-61.
43. Startsev O.V., Bolonin A.B., Vapirov Yu.M., Vladimirsky V.N., Ofitserova M.G. Improving the viscoelastic properties of acrylic enamel AC-1115. *Lakokrasochnyye materialy i ikh primeneniye*, 1986, no. 4, pp. 16–18.
44. Startsev V.O., Frolov A.S. Influence of climatic exposure on the color characteristics of paint and varnish coatings. *Lakokrasochnyye materialy i ikh primeneniye*, 2015, no. 3, pp. 16–18.
45. Pavlov A.V., Andreeva N.P., Pavlov M.R., Merkulova Yu.I. Climatic tests of paint coating based on fluoroplastic and features of its destruction. *Trudy VIAM*, 2019, no. 5, paper no. 12. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: July 01, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-5-103-110.
46. Yuan Z., Wang C., Jin L. A modified Langmuir model for moisture diffusion in UGFRE of composite insulator considering the composite degradation. *Polymers*, 2022, vol. 14, art. 2922. DOI: 10.3390/polym14142922.
47. Bystritskaya E.V., Pomerantsev A.L., Rodionova O.Y. Non-linear regression analysis: new approach to traditional implementations. *Journal of Chemometrics*, 2000, vol. 14, pp. 667–692.

Информация об авторах

Старцев Олег Владимирович, старший научный сотрудник, д.т.н., ВИАМ – НИЦ «Курчатовский институт», admin@viam.ru; и. о. директора ИФТПС СО РАН, administration@iptpn.ysn.ru

Коваль Татьяна Васильевна, начальник сектора, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Кротов Анатолий Сергеевич, старший научный сотрудник, к.ф.-м.н., ИФТПС СО РАН, e-mail: administration@iptpn.ysn.ru

Двирная Елена Вячеславовна, техник, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru
Велигодский Илья Михайлович, старший научный сотрудник, к.х.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Oleg V. Startsev, Senior Researcher, Doctor of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM; Acting Director, V.P. Larionov Institute of the Physical-Technical Problems of the North, SB RAS Federal state Budgetary Institution of Science, administration@iptpn.ysn.ru

Tatiana V. Koval, Head of Sector, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Anatoliy S. Krotov, Senior Researcher, Candidate of Sciences (Phys. & Math.), V.P. Larionov Institute of the Physical-Technical Problems of the North, SB RAS Federal state Budgetary Institution of Science, administration@iptpn.ysn.ru

Elena V. Dvirnaya, Technician, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Ilya M. Veligodsky, Senior Researcher, Candidate of Sciences (Chem.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 29.08.2024; одобрена и принята к публикации после рецензирования 11.09.2024.
The article was submitted 29.08.2024; approved and accepted for publication after reviewing 11.09.2024.