

Научная статья

УДК 620.1:678.8

DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-7-77-92

СРАВНЕНИЕ СВОЙСТВ УГЛЕПЛАСТИКОВ И СТЕКЛОПЛАСТИКОВ НА ОСНОВЕ СВЯЗУЮЩЕГО ВСЭ-1212 ПОСЛЕ ЭКСПОНИРОВАНИЯ В РАЗЛИЧНЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ЗОНАХ

О.В. Старцев¹, А.А. Скирта¹, В.О. Старцев¹, Е.О. Валевин¹, Е.В. Двирная¹

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

Аннотация. Проведены сравнительные испытания стеклопластика ВПС-48/7781 и углепластика ВКУ-39 на старение в умеренно теплом климате г. Геленджика и влажных тропиках г. Ваньнин. Обнаружено снижение прочности стеклопластика при изгибе и сдвиге. Снижение уровня механических показателей, измеренных при температуре 120 °С, оказалось значительнее, чем при комнатной температуре. Предел прочности при сжатии углепластика ВКУ-39 стабилен после 3 лет экспонирования в обеих климатических зонах. Для стеклопластика ВПС-48/7781 снижение предела прочности при сжатии после 3 лет старения составило 11% в г. Геленджике, 26% – г. Ваньнин.

Ключевые слова: стеклопластик, углепластик, старение, прочность, пластификация, термическое расширение, температура стеклования, деструкция

Для цитирования: Старцев О.В., Скирта А.А., Старцев В.О., Валевин Е.О., Двирная Е.В. Сравнение свойств углепластиков и стеклопластиков на основе связующего ВСЭ-1212 после экспонирования в различных климатических зонах // Труды ВИАМ. 2024. № 7 (137). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-7-77-92.

Scientific article

COMPARISON OF THE PROPERTIES OF CARBON FIBER REINFORCED PLASTICS AND GLASS FIBER REINFORCED PLASTICS BASED ON THE VSE-1212 BINDER AFTER EXPOSURE TO DIFFERENT CLIMATIC ZONES

O.V. Startsev¹, A.A. Skirta¹, V.O. Startsev¹, E.O. Valevin¹, E.V. Dvirnaya¹

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

Abstract. Comparative tests of fiberglass VPS-48/7781 and carbon fiber plastic VKU-39 for aging were carried out in the moderately warm climate of Gelendzhik and the humid tropics of Vanning. A decrease in the strength of fiberglass during bending and shear was discovered. The decrease in mechanical properties measured at 120 °C was greater than at room temperature. The compressive strength of VKU-39 carbon fiber plastic is stable after 3 years of exposure in both climatic zones. For fiberglass VPS-48/7781, the decrease in compressive strength was 11% after 3 years of aging in Gelendzhik and 26% after 3 years in Vanning.

Keywords: fiberglass, carbon fiber, aging, strength, plasticization, thermal expansion, glass transition temperature, destruction

For citation: Startsev O.V., Skirta A.A., Startsev V.O., Valevin E.O., Dvirnaya E.V. Comparison of the properties of carbon fiber reinforced plastics and glass fiber reinforced plastics based on the VSE-1212 binder after exposure to different climatic zones. *Trudy VIAM*, 2024, no. 7 (137), paper no. 08. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-7-77-92.

Введение

Общепризнанными причинами изменения механических свойств полимерных композиционных материалов (ПКМ) в открытых климатических условиях являются воздействия температуры, влажности и солнечного излучения [1, 2]. Широкое использование угле- и стеклопластиков в элементах внешнего контура авиационной техники [3, 4] требует новых исследований климатического старения ПКМ, в том числе определения коэффициентов сохранения

$$k_R = R/R_0,$$

где R_0 и R – пределы прочности при растяжении (σ_t), сжатии (σ_c), изгибе (σ_b) и сдвиге (σ_s) материалов в исходном состоянии и после климатических воздействий различной продолжительности соответственно [5].

Температура как фактор старения способствует доотверждению и релаксации исходной структурной неоднородности [2, 6] эпоксидных матриц ПКМ. Например, при нагреве полиэфирного стеклопластика в течение 1 ч при температурах 100, 150 и 200 °С показатель σ_t изменяется на 88–106 % [7]. После 3 мес. нагрева углепластика ВКУ-59 при температуре 60 °С и относительной влажности $\phi = 85$ % показатель σ_c уменьшается на 15 % [8]. При солнечном освещении в летние дни образцы нагреваются до температуры 40–60 °С [9], вызывая снижение относительной влажности воздуха на поверхности до 20 % [10, 11].

Если экспонировать ПКМ в сухом климате [12], то при несущественном влиянии атмосферной влаги прочность, рельеф поверхности и твердость материалов не изменяются. Поэтому для определения устойчивости к внешним воздействиям обычно изучают поведение ПКМ в термовлажностных условиях [13–16].

При повышении температуры активность воздействия влаги возрастает. По данным работы [13], квазиизотропный углепластик при комнатной температуре поглощает 1,2 % влаги, показатель σ_c уменьшается на 4 %. При температуре 70 °С количество сорбированной влаги w возрастает до 1,6 % с соответствующим уменьшением σ_c на 11 %. Аналогичным образом [14] пултрузионные углепластиковые стержни на основе эпоксидной матрицы и волокна Т700 после выдержки в воде при температурах 40, 60 и 80 °С в течение 1 года поглотили от 0,36 до 0,61 % воды. Вода оказала пластифицирующее воздействие, понизив температуру стеклования T_g (с 203 до 175 °С) и показатель σ_s (с 73 до 54 МПа).

Коэффициенты сохранения k_R зависят от показателя R при механических испытаниях ПКМ [5]. Так, в работе [15] эпоксидный стеклопластик выдерживали в воде при температурах 25, 40 и 70 °С в течение 60 сут. За это время сорбировалось 1,3–1,4 % воды, показатели σ_t , σ_c и σ_b снизились на 32, 13 и 27 % соответственно. Подобным образом показатели R углепластика Т300/Epicote RIMR 135 после 35 сут выдержки в морской воде при температуре 60 °С уменьшились на 17–38 % [16]. Аналогичные результаты получены в работах [17–20] при исследованиях термовлажностного старения ПКМ.

Термовлажностные испытания позволяют сравнить стабильность показателей R различных материалов. Однако наиболее достоверные выводы об эксплуатационной стойкости ПКМ можно получить только при проведении натуральных климатических испытаний [5, 21–23]. Экспериментально установлено, что коэффициенты сохранения после нескольких лет экспонирования в различных климатических зонах могут уменьшиться до $k_R = 0,6$ [5].

Перспективными материалами авиационного назначения признаны угле- и стеклопластики на основе расплавленного связующего ВСЭ-1212 [24]. Связующее состоит

из модифицированной дифункциональной эпоксидной смолы, полифункциональной смолы, аминного ароматического отвердителя, термопласта [25] и обеспечивает комплекс необходимых деформационно-прочностных показателей в материалах, предназначенных для обшивки и деталей внешнего контура самолетов и вертолетов. В работе [26] рассмотрено влияние углеродных и стеклянных наполнителей различных производителей на показатели R . В зависимости от свойств наполнителей показатели R для ПКМ различаются на 10–20 %, а для некоторых составов – даже на 30 %.

По данным работы [27], коэффициенты сохранения k_R углепластика ВКУ-39 и стеклопластика ВПС-48/7781 на основе связующего ВСЭ-1212 снижаются после термостарения на 25 и 19 % соответственно (табл. 1).

Таблица 1

Влияние климатического старения при температуре 120 °С на прочностные показатели углепластика ВКУ-39 и стеклопластика ВПС-48/7781 [27]

Наполнитель	Продолжительность старения, лет	σ_c , МПа	σ_c/σ_{c0}	σ_b , МПа	σ_b/σ_{b0}	σ_s , МПа	σ_s/σ_{s0}
Углеродная ткань арт. 3692	0	810/710	1,00/1,00	1130/920	1,00/1,00	96/67	1,00/1,00
	0,23	865/755	1,07/1,06	1130/920	1,00/1,00	100/67	1,04/1,00
	0,46	840/640	1,04/0,90	1180/955	1,04/1,04	76/55	0,79/0,82
	0,68	930/740	1,15/1,04	1125/855	1,00/0,93	73/50	0,76/0,75
	0,91	845/630	1,04/0,89	1160/935	1,03/1,02	73/56	0,76/0,84
	1,14	730/540	0,90/0,76	1150/985	1,02/1,07	80/58	0,83/0,87
Стеклоткань арт. 7781	0	640/460	1,00/1,00	640/540	1,00/1,00	95/59	1,00/1,00
	0,23	635/435	0,99/0,95	620/570	0,97/1,06	95/63	1,00/1,07
	0,46	520/415	0,81/0,90	610/560	0,95/1,04	71/53	0,74/0,90
	0,68	600/450	0,94/0,98	660/565	1,03/1,05	68/48	0,72/0,81
	0,91	575/425	0,90/0,92	670/545	1,05/1,01	75/59	0,79/1,00
	1,14	530/380	0,83/0,83	670/510	1,05/0,94	77/53	0,81/0,90

Примечание. В числителе указаны показатели R (пределы прочности при сжатии (σ_c), изгибе (σ_b) и сдвиге (σ_s)), измеренные при комнатной температуре, в знаменателе – при температуре 120 °С. Для сравнения указаны значения коэффициентов сохранения $k_R = R/R_0$.

Механические показатели углепластика ВКУ-39 на основе углеродной ткани арт. 3692 после 3 мес. теплового и термовлажностного старения, пребывания в камере солевого тумана не изменились. Однако показатели σ_b и σ_s уменьшились на 10–20 % после выдержки в воде [28].

Состав наполнителей также влияет на климатическую стойкость ПКМ на основе связующего ВСЭ-1212, что подтверждают результаты работ [29–32] (табл. 2).

После 1 года пребывания углепластика на основе ткани арт. 3692 в различных климатических зонах России значения σ_c и σ_b уменьшаются на 10–15 % [29]. Однако после 3 лет эти показатели снижаются на 20 % [30]. В другой серии испытаний [31] отмечено устойчивое возрастание этих показателей после экспонирования в восьми климатических зонах. Стеклопластик на основе ткани арт. 7781 также оказался стабильным [29], однако после 3 лет климатических испытаний отмечены случаи уменьшения показателей σ_c и σ_b на 40 % [30].

Отметим, что увеличение продолжительности экспонирования в г. Геленджике до 6,25 лет углепластика ВКУ-25, армированного однонаправленным жгутовым наполнителем марки 12к Е-23, вызвало уменьшение значений σ_b на 36–39 % [33].

**Влияние климатического старения на прочностные показатели углепластиков
и стеклопластиков на основе связующего ВСЭ-1212**

Место старения	Наполнитель	Продолжи- тельность старения, лет	σ_c , МПа	σ_c/σ_{c0}	σ_b , МПа	σ_b/σ_{b0}	Литератур- ный источ- ник
В исходном состоянии	Углеродная ткань арт. 3692	0	720/540	1,00/1,00	1000/760	1,00/1,00	[29]
Москва		1	648/502	0,90/0,93	830/707	0,83/0,93	
Геленджик			691/491	0,96/0,91	930/661	0,93/0,87	
Сочи			720/594	1,00/1,10	910/661	0,91/0,87	
Якутск			662/529	0,92/0,98	850/654	0,85/0,86	
В исходном состоянии	Стеклоткань арт. 7781	0	630/460	1,00/1,00	580/530	1,00/1,00	
Москва		1	580/451	0,92/0,98	568/530	0,98/1,00	
Геленджик			611/428	0,97/0,93	539/509	0,93/0,96	
Сочи			599/451	0,95/0,98	563/461	0,97/0,87	
Якутск			643/451	1,02/0,98	580/498	1,00/0,94	
В исходном состоянии	Углеродная ткань арт. 3692	0	740/570	1,00/1,00	920/840	1,00/1,00	[30]
Москва		1	651/536	0,88/0,94	984/823	1,07/0,98	
		3	622/490	0,84/0,86	911/739	0,99/0,88	
Геленджик		1	636/507	0,86/0,89	1003/840	1,09/1,00	
		3	614/456	0,83/0,80	902/689	0,98/0,82	
В исходном состоянии	Стеклоткань арт. 7781	0	590/480	1,00/1,00	680/480	1,00/1,00	
Москва		1	407/384	0,69/0,80	612/422	0,90/0,88	
		3	384/288	0,65/0,60	510/336	0,75/0,70	
Геленджик		1	401/379	0,68/0,79	612/403	0,90/0,84	
		3	384/278	0,65/0,58	469/302	0,69/0,63	
В исходном состоянии	Углеродная ткань арт. 3692	0	743/536	1,00/1,00	936/688	1,00/1,00	[31]
Геленджик		3	810/552	1,09/1,03	1095/798	1,17/1,16	
Поселок Даль- ние Зеленцы			780/574	1,05/1,07	1039/743	1,11/1,08	
Звенигород			788/574	1,06/1,07	1048/771	1,12/1,12	
Москва			840/552	1,13/1,03	1067/736	1,14/1,07	
Сочи			825/541	1,11/1,01	1048/743	1,12/1,08	
Якутск			802/574	1,08/1,07	1133/819	1,21/1,19	
Владивосток			765/515	1,03/0,96	1048/688	1,12/1,00	
Сьенфуэгос			780/584	1,05/1,09	1095/826	1,17/1,20	
В исходном состоянии	Стеклоткань арт. 7781	0	620/430	1,00/1,00	580/490	1,00/1,00	[32]
Геленджик		3	682/439	1,10/1,02	690/392	1,19/0,80	
Поселок Даль- ние Зеленцы			651/460	1,05/1,07	650/431	1,12/0,88	
Звенигород			651/460	1,05/1,07	708/392	1,22/0,80	
Москва			707/434	1,14/1,01	673/421	1,16/0,86	
Сочи			694/439	1,12/1,02	708/421	1,22/0,86	
Якутск			676/469	1,09/1,09	713/441	1,23/0,90	

Примечание. В числителе указаны показатели R (пределы прочности при сжатии (σ_c), изгибе (σ_b) и сдвиге (σ_s)), измеренные при комнатной температуре, в знаменателе – при температуре 120 °С. Для сравнения указаны значения коэффициентов сохранения $k_R = R/R_0$.

Таким образом, стабильность механических показателей ПКМ на основе связующего ВСЭ-1212 в климатических условиях зависит от типа и свойств наполнителей,

места и продолжительности испытаний, температуры измерения показателей R . Актуальной задачей остается сравнение стабильности ПКМ на основе связующего ВСЭ-1212 при экспонировании в типовой зоне России и при повышенной климатической агрессивности. Хорошим вариантом для такого сравнения являются испытания в умеренно теплом климате г. Геленджика и тропическом климате г. Ваньнин (КНР), как это проделано для серии авиационных герметиков в работе [34]. Такие сравнительные климатические испытания углепластика ВКУ-39 и стеклопластика ВПС-48/7781 на основе связующего ВСЭ-1212 являются целью данной работы.

Материалы и методы

Для сравнительных испытаний состояния связующего ВСЭ-1212 в ПКМ использованы разработанные в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ углепластик ВКУ-39 и стеклопластик ВПС-48/7781, предназначенные для изготовления силовых элементов авиационной техники, которые подвергаются внешним климатическим и эксплуатационным воздействиям. Наполнителями выбраны равнопрочная углеродная ткань ВТКУ-2.200 и стеклоткань арт. 7781, свойства которых рассмотрены в работах [26, 35]. Предварительные исследования этих материалов показали высокий уровень деформационно-прочностных показателей [26–28] и способность противостоять открытому климатическому воздействию [29–32].

Пластины из углепластика ВКУ-39 и стеклопластика ВПС-48/7781 экспонировали в течение 1 года и 3 лет на открытых стендах в г. Геленджике и г. Ваньнин (КНР) аналогично испытаниям герметиков [34]. Среднегодовые климатические показатели мест испытаний хорошо охарактеризованы и представлены в работах [36–38]. При выборе мест испытаний учтено, что значения годовой суммарной солнечной радиации на побережье Черного [36] и Южно-Китайского морей [37, 38] соизмеримы (4826 и 4960 МДж/м²), но г. Ваньнин превосходит г. Геленджик по среднегодовой температуре (26,4 и 15,5 °С), а также относительной влажности воздуха (78 и 69 %).

Прочностные показатели ПКМ определены стандартными методами при комнатной и повышенной (120 °С) температурах: при сжатии – по ГОСТ 25.602–80, сдвиге – ГОСТ 32659–2014, изгибе – ГОСТ 25.604–82. Рельеф поверхности композитов исследовали с помощью конфокального сканирующего микроскопа при увеличениях $\times 50$ и $\times 500$ с площадью полей зрения 1920×2560 и 192×256 мкм соответственно. С целью удаления шумов компьютерную обработку профилей проводили с применением программы по требованиям ГОСТ Р ИСО 4287–2014 [39] аналогично работе [40]. Содержание влаги в образцах определяли титрованием по методу Фишера в соответствии с ГОСТ 11736–78. Для исследования кинетики влагопереноса использовали образцы размером 50×50 мм. Предварительно высушенные исходные и экспонированные образцы выдерживали при относительной влажности воздуха 98 ± 2 % и температуре 60 °С в течение 30–40 сут. В течение этого времени измеряли массу образцов на аналитических весах с чувствительностью 10^{-4} г. Термическое расширение $\Delta H = H - H_0$, относительное термическое расширение $\Delta H/H_0$ и коэффициент линейного теплового расширения (КЛТР) α измеряли в направлении, перпендикулярном плоскости армирования, на термомеханическом анализаторе в интервале температур от 20 до 220 °С [27]. Здесь H – толщина образца, измеренная в интервале температур от 20 до 220 °С, H_0 – толщина образца в начале измерений. Температуру стеклования T_g полимерной матрицы определяли по излому температурной зависимости $\Delta H/H_0$ при переходе связующего ВСЭ-1212 из стеклообразного в высокоэластическое состояние аналогично работам [27, 41].

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

Результаты и обсуждение

В табл. 3 представлены результаты измерения прочностных показателей R стекло- и углепластика в исходном состоянии, а также после 1 года и 3 лет испытаний в г. Геленджике и г. Ваньнин.

Подтверждается выявленная ранее закономерность, согласно которой старение ПКМ в наибольшей степени проявляется в снижении прочности при изгибе и сдвиге, особенно в тропическом климате [5]. Например, после 3 лет экспозиции в г. Геленджике показатель σ_s стеклопластика, измеренный при комнатной температуре, уменьшился на 13 %, а после аналогичного воздействия в г. Ваньнин – на 24 %. Для всех вариантов снижение показателей R , измеренных при температуре 120 °С, оказалось значительнее, чем при комнатной температуре.

Таблица 3

Изменение свойств полимерных композиционных материалов после натурной экспозиции в г. Геленджике и г. Ваньнин

Материал	Показатели	Значения показателей при экспонировании					
		в г. Геленджике			в г. Ваньнин		
		в исходном состоянии	в течение 1 года	в течение 3 лет	в исходном состоянии	в течение 1 года	в течение 3 лет
Стеклопластик ВПС-48/7781	σ_c , МПа	570/397	523/438	508/378	578/425	450/340	429/317
	σ_b , МПа	583/503	580/461	548/418	615/538	513/433	466/398
	σ_s , МПа	84/51	81/47	73/41	87/53	70/39	66/34
	r , мкм	1,0	11,0	25,0	1,4	18,0	32,9
	w , %	0,31	0,50	0,53	0,32	0,59	0,60
Углепластик ВКУ-39/ВТКУ-2.200	σ_c , МПа	682/518	678/534	642/501	636/477	586/470	616/369
	σ_b , МПа	742/646	722/584	680/550	736/690	698/478	634/578
	σ_s , МПа	68/48	64/46	67/38	62/45	66/40	61/34
	r , мкм	3,9	5,4	7,9	1,1	17,0	23,4
	w , %	0,36	0,52	0,42	0,53	0,90	0,95

Примечание. В числителе указаны показатели R (пределы прочности при сжатии (σ_c), изгибе (σ_b) и сдвиге (σ_s)), измеренные при комнатной температуре, в знаменателе – при температуре 120 °С. r – средний размах неоднородностей поверхности, w – количество сорбированной воды.

Показатель σ_c углепластика ВКУ-39 стабилен после 3 лет экспонирования в обеих климатических зонах. Для стеклопластика ВПС-48/7781 снижение показателя σ_c после 3 лет старения составило 11 % в г. Геленджике, 26 % – в г. Ваньнин.

В предыдущих работах [30–32] выявлена чувствительность показателей рельефа поверхности ПКМ к климатическому старению. Результаты исследования рельефа поверхности, полученные в данной работе, дают новые сведения о влиянии условий климатических испытаний на деструкцию связующего в поверхностном слое. На рис. 1 показано сравнение рельефа поверхности стеклопластика ВПС-48/7781 в зоне комплексной нити в исходном состоянии и после 3 лет экспонирования в г. Геленджике и г. Ваньнин.

Размах неоднородностей поверхности r в стеклопластике возрастает с 1 до 25 мкм после 3 лет старения в умеренно теплом климате, до 32,9 мкм – в тропическом климате и оказывается значительнее, чем в углепластике (табл. 3). В работе [30] показано, что при увеличении значений r показатели R стеклопластика ВПС-48/7781 линейно уменьшаются. Таким образом, для климатически состаренных ПКМ справедливо соотношение

$$k_R = 1 - A_R r, \tag{1}$$

где k_R – коэффициент сохранения прочностного показателя R ; r – средний размах неоднородностей поверхности ПКМ; A_R – коэффициент пропорциональности, зависящий от показателя R .

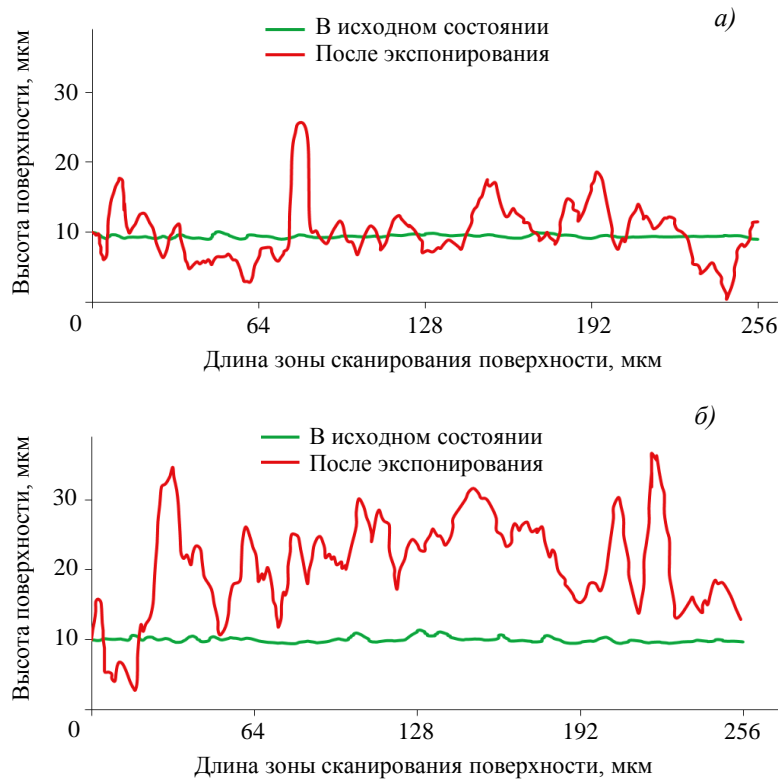


Рис. 1. Рельеф поверхности стеклопластика ВПС-48/7781 в зоне комплексной нити в исходном состоянии и после 3 лет экспонирования в г. Геленджике (а) и г. Ваньнин (б)

Используя результаты измерений показателя r , указанные в табл. 3, по соотношению (1) вычислены коэффициенты A_R для исследованных ПКМ. Результаты приведены в табл. 4.

Таблица 4

Влияние условий экспонирования на коэффициенты пропорциональности A_R в соотношении (1) для пределов прочности при сжатии, изгибе и сдвиге, измеренных при комнатной и повышенной температурах, для стеклопластика ВПС-48/7781 и углепластика ВКУ-39

Материал	Место экспонирования	Температура измерения, °С	$A_R \cdot 10^{-3}$, мкм ⁻¹ , для пределов прочности при			
			сжатии	изгибе	сдвиге	среднее
Стеклопластик ВПС-48/7781	г. Геленджик	20	4,4	5,4	5,2	5,0
		120	4,6	6,8	8,0	6,5
	г. Ваньнин	20	7,9	7,3	7,3	7,5
		120	8,6	7,9	11,0	9,2
Углепластик ВКУ-39	г. Геленджик	20	5,0	10,0	12,5	9,2
		120	6,8	19,0	26,1	17,3
	г. Ваньнин	20	5,0	6,4	13,3	8,2
		120	10,5	10,3	21,7	14,2

Для углепластика ВКУ-39 также выполняется соотношение (1). Средние значения A_R для стеклопластика ВПС-48/7781 увеличиваются в 1,5–2 раза при переходе от умеренно теплого к тропическому климату. При этом чувствительность показателей R к деструкции поверхности возрастает при повышении температуры измерений. Это следует из сравнения значений A_R , измеренных при температурах 20 и 120 °С.

Количество влаги w , сорбированной стекло- и углепластиком при экспонировании, изменяется в пределах от 0,31 до 0,95 % (табл. 3) и зависит от количества дождей, относительной влажности воздуха и перегрева поверхности при солнечном облучении пластин [11].

В работах [28–32] описано влияние влаги как пластификатора связующего ВСЭ-1212 в авиационных ПКМ. В данной работе роль влаги как значимого фактора старения стеклопластика ВПС-48/7781 и углепластика ВКУ-39 исследована методом термомеханического анализа.

Температурные зависимости относительного термического расширения $\Delta H/H_0$ высушенных образцов стеклопластика ВПС-48/7781 в исходном состоянии и после 3 лет экспонирования в г. Геленджике и г. Ваньнин представлены на рис. 2.

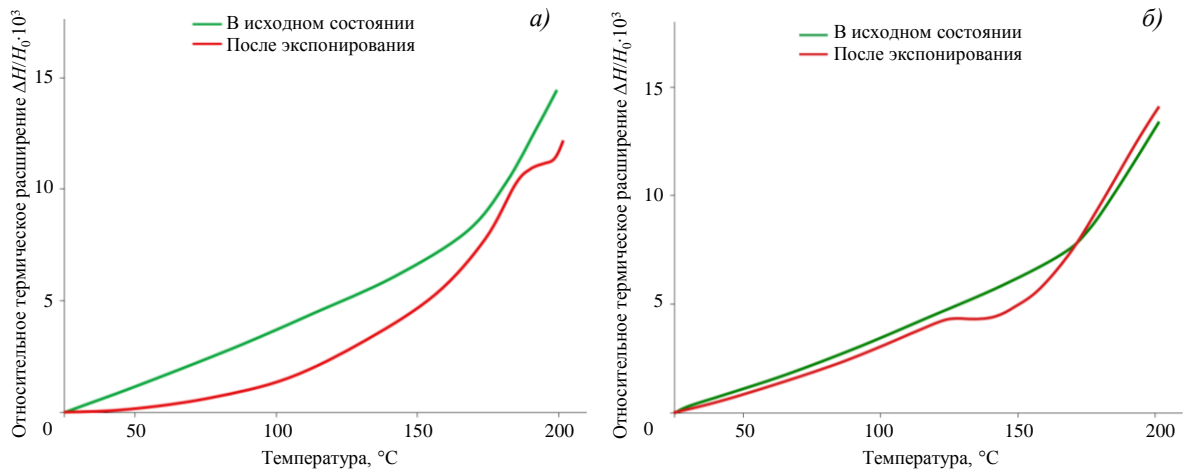


Рис. 2. Температурные зависимости относительного термического расширения высушенных образцов стеклопластика ВПС-48/7781 в исходном состоянии и после 3 лет экспонирования в г. Геленджике (а) и г. Ваньнин (б)

На зависимостях отчетливо выражены две области термического расширения связующего ВСЭ-1212. Для высушенных исходных образцов стеклопластика области стеклообразного состояния связующего соответствует монотонное (близкое к линейному) возрастание значений $\Delta H/H_0$ до температуры стеклования $T_g = 169\text{ °C}$ (рис. 2, а). Выше этой температуры наклон дилатометрической кривой возрастает из-за перехода эпоксидной матрицы в высокоэластическое состояние. С учетом зависимости $\Delta H/H_0$ от температуры вычислен КЛТР, величина которого при $T < T_g$ составила $58 \cdot 10^{-6}\text{ °C}^{-1}$, при $T > T_g$ скачкообразно возросла до $145 \cdot 10^{-6}\text{ °C}^{-1}$. Полученные результаты соответствуют данным работ [27, 41].

Сравнение дилатометрических кривых на рис. 2, а показало, что в высушенных образцах стеклопластика после 3 лет климатического старения в г. Геленджике характер термического расширения перпендикулярно плоскости армирования остался практически неизменным. Подобные зависимости $\Delta H/H_0$ от температуры получены и для высушенных образцов, экспонированных в г. Ваньнин (рис. 2, б).

Примеры сопоставления дилатометрических кривых влагонасыщенных образцов стеклопластика ВПС-48/7781 показаны на рис. 3.

Характер зависимостей $\Delta H/H_0$ от температуры сохранился. Однако вследствие пластифицирующего воздействия влаги температура излома в исходных образцах снизилась до $T_g = 133 \pm 2\text{ °C}$, после 3 лет экспонирования – до $115 \pm 2\text{ °C}$. Для влагонасыщенных образцов выявилась еще одна особенность. В состаренных образцах переход связующего в высокоэластическое состояние изменился, стал протяженным, его начало соответствует температуре $95 \pm 2\text{ °C}$.

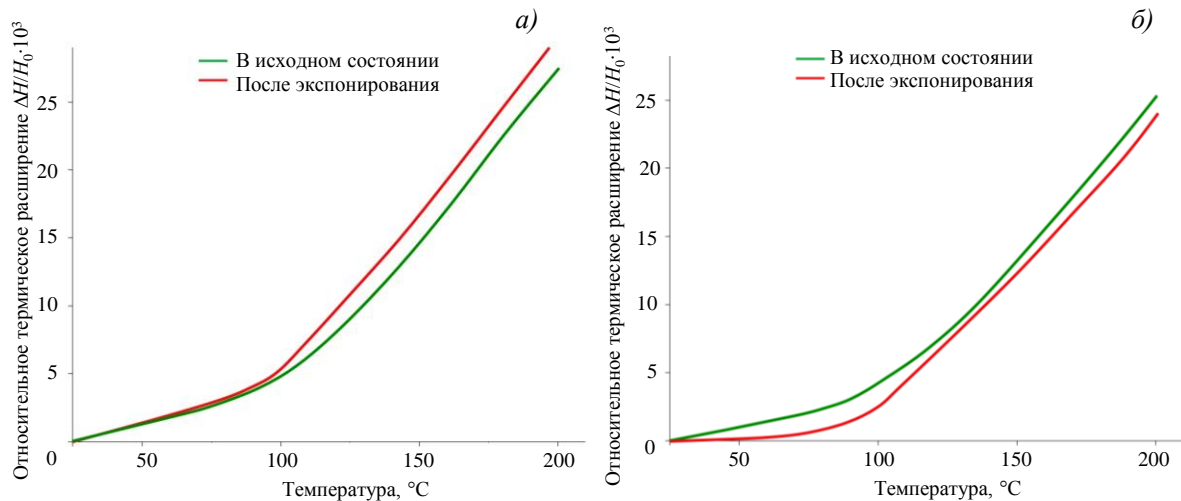


Рис. 3. Температурные зависимости относительного термического расширения влагонасыщенных образцов стеклопластика ВПС-48/7781 в исходном состоянии и после 3 лет экспонирования в г. Геленджике (а) и г. Ваньнин (б)

Результаты обработки совокупности проведенных dilatометрических измерений представлены в табл. 5. Итогом трехлетнего климатического старения в г. Геленджике оказалось снижение T_g связующего ВСЭ-1212 на 6°C в сухих образцах и на 17°C во влагонасыщенных. Старение в г. Ваньнин усилило эффект: T_g сухих образцов снизилась на 14°C , влагонасыщенных – на 20°C . Эти сведения можно считать признаками деструкции эпоксидной матрицы. Можно предположить, что под воздействием климатических факторов образовались кинетические элементы, которые при взаимодействии с влагой приобрели способность к началу сегментальной подвижности при более низкой температуре $95 \pm 2^\circ\text{C}$.

Неизменность высокотемпературной границы перехода из стеклообразного в высокоэластическое состояние ($185 \pm 5^\circ\text{C}$) можно считать косвенным признаком того, что климатические факторы за 3 года воздействия не повлияли на подвижность наиболее массивных или более упорядоченных сегментов эпоксидной матрицы.

Условия и продолжительность климатического воздействия не повлияли на величину КЛТР стеклопластика в стеклообразном состоянии связующего (табл. 5). Можно отметить тенденцию к уменьшению КЛТР при увеличении количества сорбированной влаги, объясняемую менее плотной молекулярной упаковкой элементов макроцепей, пластифицированных влагой. При переходе в высокоэластическое состояние влага десорбируется из объема образцов вследствие их нагрева, КЛТР стеклопластика при $T > T_g$ стабилизируется на уровне $(200 \pm 40) \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$. Термическое расширение связующего ВСЭ-1212 в углепластике показало те же закономерности, что и в стеклопластике. Наиболее важные результаты проведенного анализа показаны в табл. 6.

Температура стеклования T_g связующего ВСЭ-1212 высушенных исходных образцов в углепластике оказалась на $14\text{--}17^\circ\text{C}$ ниже, чем в стеклопластике. В таком недостаточно отвержденном связующем в условиях умеренно теплого климата процессы доотверждения преобладают над процессами деструкции, в результате чего после 3 лет экспонирования T_g сухих образцов возрастает на 5°C (табл. 6). В тропическом климате в г. Ваньнин при той же продолжительности испытаний T_g уменьшается на 13°C из-за преобладания деструкции.

Пластифицирующее действие влаги определяется разностью значений температуры стеклования в сухом и увлажненном состояниях ΔT_g . В исходном состоянии углепластика после предельного влагонасыщения ΔT_g связующего ВСЭ-1212 составила 63 °С (табл. 6). После 3 лет экспонирования в г. Геленджике ΔT_g достигла 56 °С, в г. Ваньнин: 38 °С. Таким образом, вследствие климатического старения пластифицирующее действие влаги ослабилось.

Как следует из данных табл. 6, КЛТР увлажненных образцов в стеклообразном состоянии эпоксидной матрицы возрастает с $36 \cdot 10^{-6}$ до $69 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$. Аналогичное увеличение КЛТР происходит и при переходе связующего ВСЭ-1212 в высокоэластическое состояние (табл. 5). Можно сделать вывод, что сорбированная влага, снижая температуру стеклования, позволяет достичь лучшей молекулярной упаковки сетчатого полимера в стеклообразном и высокоэластическом состояниях. Эта закономерность проявляется как в случае преобладания процессов доотверждения в г. Геленджике, так и при доминировании процессов деструкции в г. Ваньнин.

Термомеханический анализ, проведенный аналогично работе [12], позволил выявить влияние старения на начало и окончание перехода из стеклообразного в высокоэластическое состояние эпоксидной матрицы (табл. 4). В зависимости от условий и продолжительности экспонирования ширина данного релаксационного перехода изменяется от 25 до 40 °С.

Таблица 5

Температура стеклования и коэффициент линейного теплового расширения (КЛТР) в стеклообразном состоянии и при переходе в высокоэластическое состояние эпоксидной матрицы ВСЭ-1212 углепластика ВПС-48/7781 в исходном состоянии и после натурной экспозиции в г. Геленджике и г. Ваньнин

Место экспонирования	Продолжительность экспонирования, лет	Состояние углепластика	Температура стеклования T_g , °С			КЛТР: $\alpha \cdot 10^6$, °С ⁻¹	
			начало	по излому	окончание	$T < T_g$	$T > T_g$
г. Геленджик	В исходном состоянии	После сушки	157	169	182	58	145
		Без сушки	151	160	180	49	140
		После увлажнения	88	132	185	48	250
г. Ваньнин		После сушки	164	170	186	50	138
		Без сушки	155	162	183	48	220
		После увлажнения	89	135	190	45	232
г. Геленджик	1	После сушки	143	155	190	36	182
		Без сушки	138	145	188	35	232
		После увлажнения	75	85/136	194	47	200
г. Ваньнин		После сушки	140	165	190	60	170
		Без сушки	115	128	189	53	217
		После увлажнения	70	87/140	191	47	200
г. Геленджик	3	После сушки	134	163	190	58	241
		Без сушки	116	132	190	53	236
		После увлажнения	85	97/115	190	58	243
г. Ваньнин		После сушки	143	156	185	49	200
		Без сушки	105	126	190	35	204
		После увлажнения	80	93/115	188	29	203

Таблица 6

Температура стеклования и коэффициент линейного теплового расширения (КЛТР) в стеклообразном состоянии и при переходе в высокоэластическое состояние эпоксидной матрицы ВСЭ-1212 углепластика ВКУ-39 в исходном состоянии и после натурной экспозиции в г. Геленджике и г. Ваньнин

Место экспонирования	Продолжительность экспонирования, лет	Состояние углепластика	Температура стеклования T_g , °С			КЛТР: $\alpha \cdot 10^6$, °С ⁻¹	
			начало	по излому	окончание	$T < T_g$	$T > T_g$
г. Геленджик	В исходном состоянии	После сушки	145	155	183	36	110
		Без сушки	136	143	165	50	109
		После увлажнения	83	92	108	57	175
г. Ваньнин		После сушки	130	153	156	45	130
		Без сушки	115	134	151	53	136
		После увлажнения	85	90	102	69	157
г. Геленджик	1	После сушки	145	157	185	40	190
		Без сушки	131	137	160	45	190
		После увлажнения	85	93	110	55	193
г. Ваньнин		После сушки	133	146	160	41	162
		Без сушки	107	113	150	48	165
		После увлажнения	80	95	110	67	170
г. Геленджик	3	После сушки	143	160	183	44	195
		Без сушки	117	127	153	48	196
		После увлажнения	87	104	125	49	203
г. Ваньнин		После сушки	135	140	163	45	175
		Без сушки	124	125	145	49	210
		После увлажнения	75	102	115	56	220

Заключения

Выполненные исследования и сопоставление полученных результатов с данными аналогичных работ [27–32] позволяют сделать следующие выводы.

Изменения прочностных показателей после 1 года и 3 лет климатических испытаний характеризуют начальную стадию климатического старения эпоксидных стекло- и углепластиков. В течение этого времени основными причинами изменения прочностных показателей оказались необратимые процессы деструкции и доотверждения связующего, сочетающиеся с пластифицирующим влиянием влаги.

При высокой степени отверждения температура стеклования связующего ВСЭ-1212 составляет 190–220 °С. В этом состоянии связующего стекло- и углепластики в климатических условиях стабильны, а снижение их прочностных показателей зависит только от количества сорбированной влаги.

Температура стеклования связующего ВСЭ-1212 составила 170 °С в стеклопластике ВПС-48/7781 и 155 °С в углепластике ВКУ-39. Это указывает на неполное отверждение эпоксидной матрицы. В такой матрице при трехлетнем воздействии умеренно теплого климата преобладал процесс доотверждения, а в условиях влажных тропиков доминировала деструкция. Под воздействием этих превращений изменились прочностные показатели стекло- и углепластика, особенно при температуре измерений 120 °С. Полученные сведения о температуре стеклования эпоксидной матрицы можно использовать для оптимизации режима отверждения связующего ВСЭ-1212 аналогично подходу, представленному в работе [42].

Сорбированная влага уменьшила температуру стеклования связующего ВСЭ-1212 со 155–170 до 90 ± 5 °С и оказала влияние на величину КЛТР стекло- и углепластика в стеклообразном состоянии полимерной матрицы и при ее переходе в высокоэластическое состояние.

Полученные результаты расширяют возможности проведения комплексных оценок изменения свойств ПКМ при натурном экспонировании, выполненных ранее [43].

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

Список источников

1. Ageing of composites / ed. R. Martin. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2008. 544 p.
2. Kablov E.N., Kirillov V.N., Startsev O.V., Krotov A.S. Climatic aging of composite aviation materials: 3. Significant aging factors // Russian Metallurgy (Metally). 2012. No. 4. P. 323–329.
3. Irving P., Soutis C. Polymer Composites in the Aerospace Industry. 2nd ed. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2019. 688 p.
4. Постнов В.И., Вешкин Е.А., Макрушин К.В., Судьин Ю.И. Технологические особенности изготовления из полимерных композиционных материалов лопастей несущего винта для легкого вертолета // Авиационные материалы и технологии. 2023. № 1 (70). Ст. 06. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 30.05.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-1-82-92.
5. Kychkin A.K., Gavriliyeva A.A., Kychkin A.A., Lukachevskaya I.G., Lebedev M.P. The initial stage of climatic aging of basalt-reinforced and glass-reinforced plastics in extremely cold climates: regularities // Polymers. 2024. Vol. 16. Art. 866.
6. Odegard G.M., Bandyopadhyay A. Physical aging of epoxy polymers and their composites // Journal of Polymer Science, Part B: Polymer Physics. 2011. Vol. 49. No. 24. P. 1695–1716.
7. Wu J., Zhang C. Modified Constitutive Models and Mechanical Properties of GFRP after High-Temperature Cooling // Buildings. 2024. Vol. 14. No. 2. Art. 439.
8. Старков А.И., Исаев А.Ю., Куцевич К.Е. Комплексная оценка воздействия эксплуатационных и климатических испытаний на изменение прочностных свойств полимерных композиционных материалов на основе клеевых препрегов. Часть 1. Углепластик марки ВКУ-59 // Труды ВИАМ. 2024. № 3 (133). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 30.05.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-3-91-100.
9. Pickett J.E., Sargent J.R. Sample temperatures during outdoor and laboratory weathering exposures // Polymer Degradation and Stability. 2009. Vol. 94. P. 189–195.
10. Burch D., Martin J., VanLandingham M. Computer analysis of a polymer coating exposed to field weather conditions // Journal of Coatings. 2002. Vol. 74. No. 1. P. 75–86.
11. Сальников В.Г. Исследование влагопоглощения авиационных углепластиков в условиях теплого влажного климата // Monitoring Systems of Environment. 2021. № 2. С. 46–53.
12. Heinrick M., Crawford B., Milani A.S. Degradation of Fibreglass Composites under Natural Weathering Conditions // MOJ Polymer Science. 2017. Vol. 1. No. 1. P. 18–24.
13. Behera A., Vishwakarma A., Thawre M.M., Ballal A. Effect of hygrothermal aging on static behavior of quasi-isotropic CFRP composite laminate // Composites Communications. 2020. Vol. 17. P. 51–55.
14. Liu X., Su Q., Zhu J., Song X. The Aging Behavior and Life Prediction of CFRP Rods under a Hygrothermal Environment // Polymers. 2023. Vol. 15. No. 11. Art. 2490.
15. Cheng W., Cao Y. Strength degradation of GFRP cross-ply laminates in hydrothermal conditions // APL Materials. 2024. Vol. 12. No. 3. Art. 031113.
16. Attukur Nandagopal R., Gin Boay C., Narasimalu S. An empirical model to predict the strength degradation of the hygrothermal aged CFRP material // Composite Structures. 2020. Vol. 236. Art. 111876.
17. Uthaman A., Xian G., Thomas S. et al. Durability of an epoxy resin and its carbon fiber-reinforced polymer composite upon immersion in water, acidic, and alkaline solutions // Polymers. 2020. Vol. 12. No. 3. Art. 614.
18. Bone J.E., Sims G.D., Maxwell A.S. et al. On the relationship between moisture uptake and mechanical property changes in a carbon fibre/epoxy composite // Journal of Composite Materials. 2022. Vol. 56. No. 14. P. 2189–2199.

19. Tao L., Min W., Qi L. et al. 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. Art. 109395.
20. Zhu R., Li X., Wu C. et al. Effect of Hydrothermal Environment on Mechanical Properties and Electrical Response Behavior of Continuous Carbon Fiber/Epoxy Composite Plates // *Polymers*. 2022. Vol. 14. No. 19. Art. 4072.
21. *Авиационные материалы: справочник в 13 т. / под ред. Е.Н. Каблова. М.: ВИАМ, 2015. Т. 13: Климатическая и микробиологическая стойкость неметаллических материалов. 270 с.*
22. Кириллов В.Н., Ефимов В.А., Барботько С.Л., Николаев Е.В. Методические особенности проведения и обработки результатов климатических испытаний полимерных композиционных материалов // *Пластические массы*. 2013. № 1. С. 37–41.
23. Евдокимов А.А. Полимерный композиционный материал, изготавливаемый по технологии вакуумной инфузии с формообразованием при температурах до 40 °С: дис. ... канд. техн. наук. М.: ВИАМ, 2022. 116 с.
24. 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: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 30.05.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-122-144.
25. Мухаметов Р.Р., Петрова А.П. Термореактивные связующие для полимерных композиционных материалов. М.: ВИАМ, 2021. 528 с.
26. Гуняева А.Г., Сидорина А.И., Курносое А.О., Клименко О.Н. Полимерные композиционные материалы нового поколения на основе связующего ВСЭ-1212 и наполнителей, альтернативных наполнителям фирм Porcher Ind. и Toho Tenax // *Авиационные материалы и технологии*. 2018. № 3 (52). С. 18–26. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-3-18-26.
27. Николаев Е.В., Барботько С.Л., Андреева Н.П., Павлов М.Р., Гращенков Д.В. Комплексное исследование воздействия климатических и эксплуатационных факторов на новое поколение эпоксидного связующего и полимерных композиционных материалов на его основе. Часть 3. Расчет энергии активации и теплового ресурса полимерных композиционных материалов на основе эпоксидной матрицы // *Труды ВИАМ*. 2016. № 5 (41). Ст. 11. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 30.05.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-5-11-11.
28. Мишуров К.С., Мишкин С.И. Влияние внешней среды на свойства углепластика ВКУ-39 // *Труды ВИАМ*. 2016. № 12 (48). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 30.05.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-12-8-8.
29. Николаев Е.В. Сохраняемость служебных характеристик полимерных композиционных материалов для мотогондолы авиационных двигателей при воздействии климатических и эксплуатационных факторов: дис. ... канд. техн. наук. М.: ВИАМ, 2016. 123 с.
30. 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: 30.05.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-5-114-126.
31. Велигодский И.М., Коваль Т.В., Гуляев И.Н. Влияние климатических условий на углепластик ВКУ-39 после трех лет натурной экспозиции в восьми климатических зонах // *Труды ВИАМ*. 2023. № 8 (126). Ст. 10. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 30.05.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-8-113-128.
32. Велигодский И.М., Коваль Т.В., Курносое А.О., Мараховский П.С. Исследование климатической стойкости образцов стеклопластика после натурной экспозиции в различных климатических зонах // *Труды ВИАМ*. 2022. № 11 (117). Ст. 12. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 30.05.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-11-134-148.
33. 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: 23.05.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-8-64-76.
34. Старцев В.О., Валева Е.О., Павлов М.Р., Скирта А.А. Исследование климатической стойкости тиоколовых и силиконовых герметиков // *Клеи. Герметики. Технологии*. 2024. № 1. С. 24–31.
35. Сидорина А.И. Механические свойства полимерных композиционных материалов на основе российских высокопрочных углеродных наполнителей и полимерных матриц нового поколения // *Химические волокна*. 2018. № 2. С. 16–19.

36. Курс М.Г., Ветрова Е.Ю. Коррозионная агрессивность атмосферы и климатическая стойкость металлических материалов в различных регионах РФ // III Всерос. науч.-техн. конф. «Климат–2018. Вопросы прогнозирования коррозии, старения и биоповреждения материалов». Москва: ВИАМ, 2018. С. 128–143.
37. Zhang X., Liu M., Lu F. et al. Atmospheric Corrosion of 7B04 Aluminum Alloy in Marine Environments // *Corrosion Science and Technology*. 2018. Vol. 17. No. 1. P. 6–11.
38. Zhang T., Zhang T., He Y. et al. Long-term atmospheric aging and corrosion of epoxy primer-coated aluminum alloy in coastal environments // *Coatings*. 2021. Vol. 11. No. 2. Art. 237.
39. ГОСТ Р ИСО 4287–2014. Геометрические характеристики изделий (GPS). Структура поверхности. Профильный метод. Термины, определения и параметры структуры поверхности. М.: Стандартинформ, 2019. 20 с.
40. Kaplonek W., Nadolny K. Review of the advanced microscopy techniques used for diagnostics of grinding wheels with ceramic bond // *Journal of Machine Engineering*. 2012. Vol. 12. P. 81–98.
41. Startsev O.V., Lebedev M.P., Vapirov Y.M., Kychkin A.K. Comparison of Glass-Transition Temperatures for Epoxy Polymers Obtained by Methods of Thermal Analysis // *Mechanics of Composite Materials*. 2020. Vol. 56. No. 2. P. 227–240.
42. Малышева Г.В., Мараховский П.С., Баринов Д.Я., Николаев Е.В. Оптимизация режимов отверждения стеклопластиков на основе эпоксидного связующего // *Авиационные материалы и технологии*. 2023. № 2 (71). Ст. 08. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 30.05.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-94-103.
43. 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.

References

1. *Ageing of composites*. Ed. R. Martin. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2008, 544 p.
2. Kablov E.N., Kirillov V.N., Startsev O.V., Krotov A.S. Climatic aging of composite aviation materials: 3. Significant aging factors. *Russian Metallurgy (Metally)*, 2012, no. 4, pp. 323–329.
3. Irving P., Soutis C. *Polymer Composites in the Aerospace Industry*. 2nd ed. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2019, 688 p.
4. Postnov V.I., Veshkin E.A., Makrushin K.V., Sudin Yu.I. Technological features of manufacturing polymer composite materials of main rotor blades for a light helicopter. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 1 (70), paper no. 06. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: May 30, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-1-30-50.
5. Kychkin A.K., Gavrilieva A.A., Kychkin A.A., Lukachevskaya I.G., Lebedev M.P. The initial stage of climatic aging of basalt-reinforced and glass-reinforced plastics in extremely cold climates: regularities. *Polymers*, 2024, vol. 16, art. 866.
6. Odegard G.M., Bandyopadhyay A. Physical aging of epoxy polymers and their composites. *Journal of Polymer Science, Part B: Polymer Physics*, 2011, vol. 49, no. 24, pp. 1695–1716.
7. Wu J., Zhang C. Modified Constitutive Models and Mechanical Properties of GFRP after High-Temperature Cooling. *Buildings*, 2024, vol. 14, no. 2, art. 439.
8. Starkov A.I., Isaev A.Yu., Kutsevich K.E. Comprehensive assessment of the impact of operational and climatic tests on the change of strength properties of polymer composite materials based on adhesive prepregs. Part 1. Carbon fiber-reinforced plastic VKU-59. *Trudy VIAM*, 2024, no. 3 (133), paper no. 08. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: May 30, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-3-91-100.
9. Pickett J.E., Sargent J.R. Sample temperatures during outdoor and laboratory weathering exposures. *Polymer Degradation and Stability*, 2009, vol. 94, pp. 189–195.
10. Burch D., Martin J., VanLandingham M. Computer analysis of a polymer coating exposed to field weather conditions. *Journal of Coatings*, 2002, vol. 74, no. 1, pp. 75–86.
11. Сальников В.Г. Исследование влагопоглощения авиационных углепластиков в условиях теплого влажного климата. *Monitoring Systems of Environment*, 2021, no. 2, pp. 46–53.
12. Heinrick M., Crawford B., Milani A.S. Degradation of Fibreglass Composites under Natural Weathering Conditions. *MOJ Polymer Science*, 2017, vol. 1, no. 1, pp. 18–24.
13. Behera A., Vishwakarma A., Thawre M.M., Ballal A. Effect of hygrothermal aging on static behavior of quasi-isotropic CFRP composite laminate. *Composites Communications*, 2020, vol. 17, pp. 51–55.

14. Liu X., Su Q., Zhu J., Song X. The Aging Behavior and Life Prediction of CFRP Rods under a Hygrothermal Environment. *Polymers*, 2023, vol. 15, no. 11, art. 2490.
15. Cheng W., Cao Y. Strength degradation of GFRP cross-ply laminates in hydrothermal conditions. *APL Materials*, 2024, vol. 12, no. 3, art. 031113.
16. Attukur Nandagopal R., Gin Boay C., Narasimalu S. An empirical model to predict the strength degradation of the hygrothermal aged CFRP material. *Composite Structures*, 2020, vol. 236, art. 111876.
17. Uthaman A., Xian G., Thomas S. et al. Durability of an epoxy resin and its carbon fiber-reinforced polymer composite upon immersion in water, acidic, and alkaline solutions. *Polymers*, 2020, vol. 12, no. 3, art. 614.
18. Bone J.E., Sims G.D., Maxwell A.S. et al. On the relationship between moisture uptake and mechanical property changes in a carbon fibre/epoxy composite. *Journal of Composite Materials*, 2022, vol. 56, no. 14, pp. 2189–2199.
19. Tao L., Min W., Qi L. et al. 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, art. 109395.
20. Zhu R., Li X., Wu C. et al. Effect of Hydrothermal Environment on Mechanical Properties and Electrical Response Behavior of Continuous Carbon Fiber/Epoxy Composite Plates. *Polymers*, 2022, vol. 14, no. 19, art. 4072.
21. *Aviation materials: a reference book in 13 vols.* Ed. E.N. Kablov. Moscow: VIAM, 2015, vol. 13: Climate and microbiological resistance of non-metallic materials, 270 p.
22. Kirillov V.N., Efimov V.A., Barbotko S.L., Nikolaev E.V. Methodological features of conducting and processing the results of climatic tests of polymer composite materials. *Plasticheskie massy*, 2013, no. 1, pp. 37–41.
23. Evdokimov A.A. *Polymer compositional material made using vacuum infusion technology with molding at temperatures up to 40 °C*: thesis, Cand. Sc. (Tech.). Moscow: VIAM, 2022, 116 p.
24. 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: May 30, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-122-144.
25. Mukhametov R.R., Petrova A.P. *Thermoreactive binders for polymer composite materials*: textbook. Moscow: VIAM, 2021, 528 p.
26. Gunyaeva A.G., Sidorina A.I., Kurnosov A.O., Klimenko O.N. Polymeric composite materials of new generation on the basis of binder VSE-1212 and the filling agents alternative to ones of Porcher Ind. and Toho Tenax. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2018, no. 3 (52), pp. 18–26. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-3-18-26.
27. Nikolaev E.V., Barbotko S.L., Andreeva N.P., Pavlov M.R., Grashchenkov D.V. Comprehensive research of the influence of climatic and operational factors on new generation epoxy binding and polymeric composite materials on its basis. Part 3. Calculation of activation energy and thermal resource of polymeric composite materials on the basis of epoxy matrix. *Trudy VIAM*, 2016, no. 5 (41), paper no. 11. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: May 30, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-5-11-11.
28. Mishurov K.S., Mishkin S.I. Environmental effect on properties of CFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastic) VKU-39. *Trudy VIAM*, 2016, no. 12 (48), paper no. 08. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: May 30, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-12-8-8.
29. Nikolaev E.V. *The preservation of the official characteristics of polymer composite materials for the motorized motor motion engines under the influence of climatic and operational factors*: thesis, Cand. Sc. (Tech.). Moscow: VIAM, 2016, 123 p.
30. 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: May 30, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-5-114-126.
31. Veligodskiy I.M., Koval T.V., Gulyaev I.N. Influence of climatic conditions on CFRP VKU-39 after three year outdoor exposition in eight climatic zones. *Trudy VIAM*, 2023, no. 8 (126), paper no. 10. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: May 30, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-8-113-128.

32. Veligodskiy I.M., Koval T.V., Kurnosov A.O., Marakhovskiy P.S. Study of resistance of glass fiber reinforced plastic to natural weathering in different climatic conditions. *Trudy VIAM*, 2022, no. 11 (117), paper no. 12. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: May 30, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-11-134-148.
33. Startsev V.O., Valevin E.O., Gulyaev A.I. The influence of polymer composite materials' surface weathering on its mechanical properties. *Trudy VIAM*, 2020, no. 8 (90), paper no. 07. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: May 23, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-8-64-76.
34. Startsev V.O., Valevin E.O., Pavlov M.R., Skirt A.A. The study of the climatic resistance of thio-col and sulovsan sealants. *Klei. Germetiki. Tekhnologii*, 2024, no. 1, pp. 24–31.
35. Sidorina A.I. The mechanical properties of polymer composite materials based on Russian high-strength carbon fillers and new generation polymer matrices. *Khimicheskie volokna*, 2018, no. 2, pp. 16–19.
36. Kurs M.G., Vetrova E.Yu. The corrosion aggressiveness of the atmosphere and the climatic resistance of metal materials in various regions of the Russian Federation. *III All-Rus. Sci-techn. Conf. «Climate–2018. Issues of predicting corrosion, aging and biopersion of materials»*. Moscow: VIAM, 2018, pp. 128–143.
37. Zhang X., Liu M., Lu F. et al. Atmospheric Corrosion of 7B04 Aluminum Alloy in Marine Environments. *Corrosion Science and Technology*, 2018, vol. 17, no. 1, pp. 6–11.
38. Zhang T., Zhang T., He Y. et al. Long-term atmospheric aging and corrosion of epoxy primer-coated aluminum alloy in coastal environments. *Coatings*, 2021, vol. 11, no. 2, art. 237.
39. State Standard R ISO 4287–2014. *Geometric characteristics of products (GPS). Surface structure. Profile method. Terms, definitions and parameters of surface structure*. Moscow: Standinform, 2019, 20 p.
40. Kaplonek W., Nadolny K. Review of the advanced microscopy techniques used for diagnostics of grinding wheels with ceramic bond. *Journal of Machine Engineering*, 2012, vol. 12, pp. 81–98.
41. Startsev O.V., Lebedev M.P., Vapirova Y.M., Kychkin A.K. Comparison of Glass-Transition Temperatures for Epoxy Polymers Obtained by Methods of Thermal Analysis. *Mechanics of Composite Materials*, 2020, vol. 56, no. 2, pp. 227–240.
42. Malysheva G.V., Marakhovskiy P.S., Barinov D.Ya., Nikolaev E.V. Optimization of the curing modes of fiber-glass based on epoxy binder. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 2 (71), paper no. 08. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: May 30, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-94-103.
43. 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.

Информация об авторах

Старцев Олег Владимирович, старший научный сотрудник, д.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Скирта Александра Андреевна, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Старцев Валерий Олегович, начальник лаборатории, д.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Валевин Евгений Олегович, заместитель начальника лаборатории, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Двирная Елена Вячеславовна, техник, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Oleg V. Startsev, Senior Researcher, Doctor of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Alexandra A. Skirta, Leading Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Valery O. Startsev, Head of Laboratory, Doctor of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Evgeny O. Valevin, Deputy Head of Laboratory, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

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

Статья поступила в редакцию 18.06.2024; одобрена и принята к публикации после рецензирования 28.06.2024.
The article was submitted 18.06.2024; approved and accepted for publication after reviewing 28.06.2024.