
Научная статья

УДК 678.019.3

DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-3-141-156

ИЗМЕНЕНИЯ СТРУКТУРЫ, СВОЙСТВ И ДОЛГОВЕЧНОСТИ УГЛЕПЛАСТИКА НА РАННЕМ ЭТАПЕ КЛИМАТИЧЕСКОГО СТАРЕНИЯ

О.В. Старцев¹, Е.В. Двирная¹, Г.В. Корниенко¹

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

Аннотация. Исследовано изменение свойств углепластика ВКУ-39/ВТкУ-2.200 после 6 мес. экспозиции в умеренно теплом климате (г. Геленджик). Для этого использованы такие методы анализа, как профилометрия, гравиметрия, термомеханический анализ и динамический механический анализ. Проведены также испытания на межслойный сдвиг методом короткой балки и продольный изгиб при разных скоростях нагружения. По результатам испытаний проведен термоактивационный анализ, который показал высокую чувствительность к определению долговечности на ранней стадии климатического воздействия.

Ключевые слова: углепластик, старение, долговечность, механические и термомеханические свойства, изменение структуры

Для цитирования: Старцев О.В., Двирная Е.В., Корниенко Г.В. Изменения структуры, свойств и долговечности углепластика на раннем этапе климатического старения // Труды ВИАМ. 2026. № 3 (157). С. 141–156. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-3-141-156.

Scientific article

CHANGES IN THE STRUCTURE, PROPERTIES AND DURABILITY OF CARBON FIBER AT AN EARLY STAGE OF CLIMATIC AGING

O.V. Startsev¹, E.V. Dvirnaya¹, G.V. Kornienko¹

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

Abstract. The study aimed to investigate changes in the properties of carbon-fiber reinforced plastic VKU-39/VTkU-2.200 after six months of exposure in the temperate and warm climate of Gelendzhik. Various analysis methods, such as profilometry, gravimetry, thermomechanical analysis, and dynamic mechanical analysis, were used for this purpose. Additionally, interlayer shear tests using the short beam method and longitudinal bending at different loading speeds were conducted. Based on the results of these tests, a thermal activation analysis was performed, which showed high sensitivity in determining durability at an early stage of weathering.

Keywords: carbon fiber, aging, durability, mechanical and thermomechanical properties, structural changes

For citation: Startsev O.V., Dvirnaya E.V., Kornienko G.V. Changes in the structure, properties and durability of carbon fiber at an early stage of climatic aging. *Trudy VIAM*, 2026, no. 3 (157), pp. 141–156. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-3-141-156.

Введение

Современные углепластики отечественного производства на основе расплавных эпоксидных матриц [1, 2] обладают превосходными механическими свойствами, благодаря чему считаются наиболее перспективными конструкционными материалами в авиастроении. Эти материалы проявляют высокую стойкость к внешним воздействиям. Например, по данным работ [3–5], их пределы прочности при растяжении, сжатии, изгибе, сдвиге и другие механические показатели R изменяются в пределах 10–20 % в течение первого десятилетия эксплуатации в открытых климатических условиях. Такое медленное изменение прочности затрудняет достоверную оценку долговечности углепластика при эксплуатационных нагрузках [6], что осложняет обоснование их срока службы в ответственных элементах конструкций.

В обзоре [7] рассмотрены закономерности старения эпоксидных углепластиков под действием температуры, влажности, ультрафиолетового (УФ) облучения и других факторов окружающей среды. Старение начинается с образования микротрещин и приводит к расслоению, которое еще больше обнажает внутреннюю поверхность композитов. При воздействии окружающей среды образуются свободные радикалы, которые также разрушают внутреннюю структуру эпоксидной матрицы. Они увеличивают свободный объем полимерной матрицы, облегчают доступ кислорода, тем самым снижая механические характеристики материала.

По данным работы [8], УФ-облучение преимущественно влияет на свойства поверхностного слоя смолы. При УФ-старении может произойти разрыв молекулярных цепей, что приводит к изменению массы смолы и цвета, образованию микротрещин, снижению уровня механических свойств и ухудшению эксплуатационных характеристик под совокупным воздействием многих факторов. С увеличением продолжительности старения скорость изменения массы и твердость смолы сначала увеличиваются, а затем уменьшаются, в то время как уровень механических свойств композита сначала быстро снижается, а затем имеет тенденцию к постоянству. Прочность при изгибе и ударная вязкость композита снизились на 6,0 и 12,8 % соответственно по сравнению с исходными значениями.

Подобный механизм микроскопического разрушения при экспозиции полимерных композиционных материалов (ПКМ) в семи различных типах климата рассмотрен в работе [9]. Проанализированы изменения механических показателей R при растяжении, изгибе, сдвиге после пребывания в тропиках и тропических лесах, Средиземноморье, пустыне, умеренно континентальном и приморском климате, а также при погружении в морскую воду. Рассмотрены различные модели прогнозирования изменения показателей R : модель Аррениуса; модели, основанные на остаточном модуле упругости и остаточной прочности; регрессионный анализ медианной прочности. Для повышения точности прогнозирования срока службы при естественном старении композитов важно учитывать влияние нагрузок в реальных условиях эксплуатации, включать различные климатические типы, использовать комплексные показатели механических свойств, устанавливать эквивалентное соотношение показателей, полученных при натурном и ускоренном старении, а также создавать базу данных с унифицированными стандартами испытаний.

Реакции ПКМ на комбинированное воздействие основных климатических факторов и механических нагрузок разобраны в обзорной статье [10]. На основе анализа данных научно-технической литературы предложены коэффициенты снижения прочности для учета воздействия окружающей среды на армированные волокнами полимеры.

Результаты экспериментального исследования гидротермического старения стержней из углепластика, выдержанных в дистиллированной воде в течение 360 дней, изложены в работе [11]. Получены данные о водопоглощении и диффузии, закономерности эволюции прочности при межслойном сдвиге и динамические термомеханические свойства. Результаты исследования показывают, что водопоглощение соответствует модели Фика. Проникновение молекул воды приводит к значительному снижению межслойной прочности и температуры стеклования полимерной матрицы. Это объяснено пластифицирующим действием влаги и нарушением сцепления на границе раздела. Для прогнозирования долгосрочного срока службы углепластика в реальных условиях эксплуатации использовано уравнение Аррениуса на основе теории эквивалентности времени и температуры, что позволило получить стабильное сохранение прочности при межслойном сдвиге на уровне 72,78 %.

В углепластике на основе эпоксидной матрицы EL2 после выдержки в воде при 60 °С предел прочности при изгибе снизился до ~(80–90) % от начального значения [12].

Известной и многократно проверенной закономерностью являются уменьшение механических показателей при увлажнении ПКМ и их полное или частичное восстановление при последующей сушке [3–6, 13]. Например, согласно работе [14], при содержании 3,6 % воды предел прочности при растяжении углепластика снизился с 1232 до 1035 МПа (на 18 %), но после удаления влаги этот показатель оказался на уровне 96 %. При тех же воздействиях модуль упругости снизился до 88 %, после чего возрос до 94 %.

Для определения границ применимости ПКМ авиационного назначения выполняются лабораторные и климатические испытания [3, 6, 15], в результате которых определяются значения относительных коэффициентов сохранения механических показателей $k_R = R/R_0$, где R_0 и R – показатели механических свойств образцов в исходном состоянии и после выдержки в агрессивных условиях. Характеризуя состояние ПКМ, многие авторы [7–10] используют термин «долговечность» как время, в течение которого материал достигает предельного значения k_R . После этого материал признается непригодным для дальнейшей эксплуатации. Однако правильно определить долговечность как время τ , в течение которого образец или элемент конструкции остается неразрушенным при выбранном способе механического нагружения и заданной температуре.

В работе [16] предложен перспективный метод прогнозирования долговечности углепластика при циклическом и статическом механическом нагружении (растяжение–сжатие, продольный изгиб, сдвиг). Основой рассмотренного подхода является кинетическая теория прочности, в рамках которой долговечность определяется по формуле Журкова:

$$\tau = \tau_0 \exp\left(\frac{U_0 - \gamma\sigma}{R_{mol}T}\right), \quad (1)$$

где τ_0 – период тепловых колебаний атомов в твердом теле, 10^{-13} с; U_0 – начальная энергия активации разрушения, кДж/моль; R_{mol} – универсальная газовая постоянная, кДж/(моль·К); γ – структурно-чувствительный коэффициент (активационный объем); σ – прочность материала при выбранной схеме деформирования, МПа; T – температура, °С.

Для углепластика формула (1) справедлива для нахождения τ в стеклообразном состоянии связующего при различных способах нагружения [16, 17]. Влияние температуры определяется законом Аррениуса и учитывается в виде знаменателя показателя

экспоненты в формуле (1). Температурный сдвиг вычисляется по уравнению Вильямса–Ландела–Ферри [18]:

$$\log a_T = -\frac{C_1(T-T_0)}{C_2+T-T_0}, \quad (2)$$

где a_T – температурный сдвиг (коэффициент, показывающий, на сколько нужно сдвинуть кривую зависимости свойства от времени/частоты, чтобы учесть влияние температуры); T – температура; T_0 – обычно температура стеклования (T_g); C_1 и C_2 – эмпирические константы, зависящие от материала.

В работе [19] показано, что при влагонасыщении температура стеклования T_g эпоксидных матриц ПКМ линейно уменьшается с увеличением количества сорбированной влаги w . Эта зависимость позволяет вычислять долговечность углепластика по формуле

$$\tau = \tau_0 \exp\left(\frac{U_0 - \gamma\sigma_s}{R(T + \Delta T_g)}\right), \quad (3)$$

где $\Delta T_g = T_{g0} - T_{gw}$; T_{g0} – температура стеклования сухого образца; T_{gw} – температура стеклования образца с содержанием влаги w ; σ_s – предел прочности при межслойном сдвиге.

Основываясь на рассмотренных данных научно-технической литературы, можно ожидать, что долговечность углепластика будет изменяться уже на ранней стадии климатического воздействия при наличии начальных необратимых физико-химических превращений (деструкция поверхности, релаксация внутренних напряжений, изменение свободного объема [3–5]) и будет зависеть от обратимого пластифицирующего воздействия влаги [6, 19], определяемого соотношением (3).

Цель данной работы – исследование долговечности углепластика ВКУ-39/ВТкУ-2.200 как результата изменений структурных, физических показателей и влагосодержания [20, 21] на ранней стадии климатического воздействия.

Материалы и методы

Объектом исследований выбран углепластик ВКУ-39/ВТкУ-2.200 на основе углеродного тканого наполнителя ВТкУ-2.200 и эпоксидного термореактивного связующего ВСЭ-1212. Состав и свойства этого углепластика подробно рассмотрены в работах [2–5, 20, 21].

Пластины углепластика экспонировали на открытом атмосферном стенде в условиях умеренно теплого климата (г. Геленджик), показатели которого подробно представлены в работе [20]. Продолжительность начального этапа климатического воздействия составила 6 мес.

Пластины углепластика в исходном состоянии и после экспонирования разрезали на образцы методом фрезерования. Для определения влагосодержания подготовленные образцы высушивали в течение 25 сут над прокаленным силикагелем при температуре 60 °С. Массу образцов измеряли с помощью аналитических весов с точностью 0,1 мг.

Для характеристики структуры поверхности углепластика использован метод профилометрии, соответствующий ГОСТ Р ИСО 4287–2014 [22]. С помощью конфокального лазерного сканирующего микроскопа по алгоритмам, использованным в работах [23, 24], на лицевой и обратной сторонах пластин углепластика ВКУ-39/ВТкУ-2.200 измерены показатели рельефа поверхности (максимальная P_p и минимальная P_v высота кривой профиля, размах P_c и стандартное отклонение P_q неоднородностей).

Температуру стеклования T_g углепластика измеряли с помощью прибора динамического механического анализа в рамках стандарта ISO 6721-11 [25]. Использовали образцы размером 50×10 мм, для которых измеряли динамический модуль упругости E' и динамический модуль потерь E'' в интервале температур от 25 до 250 °С в потоке аргона при частоте 1 Гц со скоростью нагрева 2 °С/мин. Значения T_g находили по положению максимума E'' при переходе эпоксидного связующего из стеклообразного в высокоэластическое состояние аналогично работам [3, 6].

Термическое расширение $\Delta L = L - L_0$, относительное термическое расширение $\Delta L/L_0$ и коэффициент линейного теплового расширения (КЛТР)

$$\alpha_L = \frac{1}{L} \cdot \frac{\partial L}{\partial T} \quad (4)$$

в направлении основы ткани ВТкУ-2.200 измеряли на термомеханическом анализаторе в интервале температур от –60 до +230 °С аналогично работе [21] в соответствии с рекомендациями стандарта ISO 11359-2 [26]. Здесь L – длина образца, измеренная в интервале температур от –60 до +230 °С; L_0 – длина образца в начале измерений. Для расчета КЛТР углепластика поперек основы ткани α_W и перпендикулярно плоскости армирования α_H в формуле (4) длину образца L заменяли на ширину W и толщину H образца.

Предел прочности при межслойном сдвиге σ_s определен нагружением коротких балок размером 40×20×4 мм на универсальной испытательной машине с автоматизированной записью нагрузки и деформации по ГОСТ 32659–2014 (ISO 14130:1997) [27]. Другой стандартный механический показатель – предел прочности при трехточечном изгибе σ_b , измеряли согласно ГОСТ Р 56810–2015 [28].

Для определения долговечности использовали рекомендации работ [16, 17]. Для этого проведены испытания на межслойный сдвиг углепластика ВКУ-39/ВТкУ-2.200 в исходном состоянии и после 6 мес. экспозиции при скоростях нагружения 5; 1; 0,5; 0,05 и 0,005 мм/мин. Испытания на продольный изгиб проводили при скоростях нагружения 600; 60; 0,6 и 0,06 мм/мин.

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

Результаты и обсуждение

Влияние климатического воздействия на структуру и физические свойства углепластика ВКУ-39/ВТкУ-2.200

В работах [20, 21] установлено, что уже после одного года пребывания углепластика ВКУ-39/ВТкУ-2.200 в условиях умеренно теплого климата заметно разрушается поверхностный слой матрицы ВСЭ-1212 с размахом неоднородностей $P_c = 5,4$ мкм. Аналогичное увеличение шероховатости поверхности углепластика ВКУ-39/ВТкУ-2.200 наблюдали также в данном исследовании. Как видно из данных табл. 1, после 6 мес. экспонирования показатель P_c возрастает с 3,2 до 7,0 мкм на лицевой стороне пластин и с 2,5 до 5,3 мкм на обратной стороне. Оседающие морские соли заметно затушевывают эффект деструкции (табл. 1). Поэтому для достоверной количественной оценки показателей рельефа необходимо освобождать поверхность пластин от оседающих солей. Таким образом, солнечное УФ-облучение уже за 6 мес. заметно ухудшает структуру поверхности.

Изучено изменение свободного объема полимерной матрицы с учетом результатов измерения термического расширения, полученных методом термомеханического анализа. На рис. 1 представлены зависимости относительного термического расширения исходных образцов углепластика ВКУ-39/ВТкУ-2.200 вдоль основы ткани $\Delta L/L_0$, поперек основы ткани $\Delta W/W_0$ и перпендикулярно плоскости армирования $\Delta H/H_0$.

Результаты профилометрии углепластика ВКУ-39/ВТкУ-2.200 в исходном состоянии и после 6 мес. натурной экспозиции

Состояние	Сторона	Показатель профиля поверхности, мкм				
		P_p	P_v	P_z	P_c	P_q
Исходное	Лицевая	13	19	32	3,2	1,9
	Обратная	11	15	26	2,5	1,6
После 6 мес. экспозиции с налетом морских солей	Лицевая	15	23	38	5,8	4,0
	Обратная	11	15	26	2,5	1,6
После 6 мес. экспозиции и удаления морских солей	Лицевая	17	20	36	7,0	4,1
	Обратная	13	14	27	5,3	2,9

Примечание. P_p – максимальная высота пика кривой профиля; P_v – максимальная глубина впадины кривой профиля; P_z – максимальная высота кривой профиля; P_c – средняя высота элементов кривой профиля (размах); P_q – среднеквадратичная высота кривой профиля.

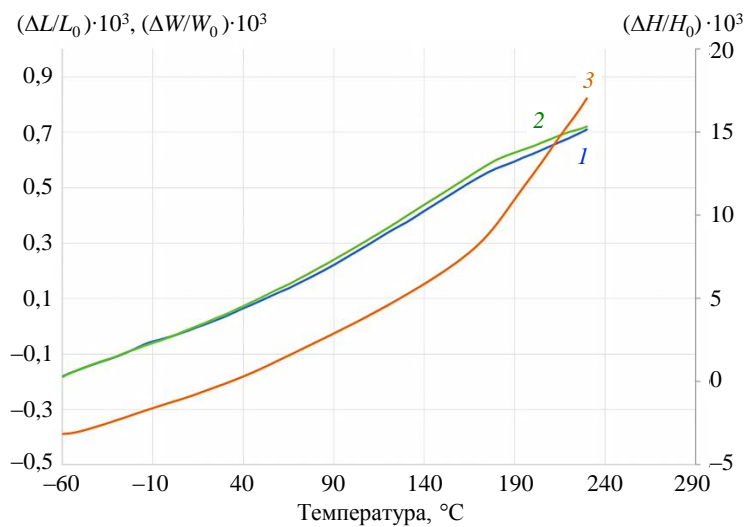


Рис. 1. Температурные зависимости относительного термического расширения углепластика ВКУ-39/ВТкУ-2.200 в исходном состоянии вдоль основы ткани $\Delta L/L_0$ (1), поперек основы ткани $\Delta W/W_0$ (2) и перпендикулярно плоскости армирования $\Delta H/H_0$ (3)

Согласно работе [29], углеродные волокна характеризуются отрицательным значением КЛТР на уровне $-0,3 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. Эпоксидная матрица ВСЭ-1212 препятствует усадке волокон. Поэтому в направлении основы ткани относительное термическое расширение $\Delta L/L_0$ несущественно и не превышает $0,9 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$, а показатель α_L незначительно возрастает с $2,5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ при $-60 \text{ }^\circ\text{C}$ до $3,0 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ при $150 \text{ }^\circ\text{C}$. При температуре $>150 \text{ }^\circ\text{C}$ полимерная матрица переходит в высокоэластическое состояние, ее жесткость снижается, что приводит к закономерному уменьшению наклона кривой 1 на рис. 1 и снижению α_L до $2,5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ при $230 \text{ }^\circ\text{C}$.

Из рис. 1 следует, что термическое расширение поперек основы ткани $\Delta W/W_0$ не отличается от $\Delta L/L_0$, тогда как термическое расширение перпендикулярно плоскости армирования $\Delta H/H_0$ возрастает более чем на порядок. Поэтому КЛТР α_H в стеклообразном состоянии эпоксидной матрицы изменяется с $35 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ при $-60 \text{ }^\circ\text{C}$ до $51 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ при $150 \text{ }^\circ\text{C}$. При переходе в высокоэластическое состояние связующего α_H достигает значения $69 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ при $230 \text{ }^\circ\text{C}$, что соответствует данным работ [21, 30]. Более подробные результаты вычислений α_L , α_W и α_H для широкого интервала температур представлены в табл. 2.

Для сравнения на рис. 2 показаны температурные зависимости относительного термического расширения $\Delta L/L_0$ после 6 мес. экспонирования углепластика ВКУ-39/ВТкУ-2.200.

Таблица 2

Коэффициент линейного теплового расширения углепластика ВКУ-39/ВТкУ-2.200 в исходном состоянии в продольном, поперечном и трансверсальном направлениях

Температура, °С	КЛТР: $\alpha \cdot 10^6, \text{K}^{-1}$		
	вдоль основы ткани α_L	поперек основы ткани α_W	перпендикулярно плоскости армирования α_H
-60	2,5	2,4	35
0	2,7	2,7	38
50	2,8	2,9	41
100	2,9	3,0	47
150	3,0	3,0	51
200	2,6	2,6	63
230	2,5	2,6	69

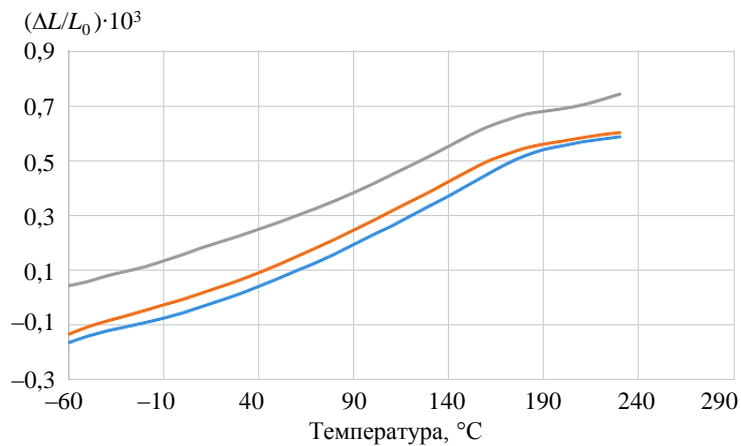


Рис. 2. Температурные зависимости относительного термического расширения $\Delta L/L_0$ трех параллельных образцов углепластика ВКУ-39/ВТкУ-2.200 после 6 мес. экспозиции

Сравнение рис. 1 и 2 показывает неизменность температурных зависимостей $\Delta L/L_0$ образцов углепластика в исходном состоянии и после климатического воздействия. Это подтверждают результаты расчета α_L по формуле (4) во всем исследованном интервале температур (табл. 3).

Таблица 3

Коэффициент линейного теплового расширения вдоль основы ткани углепластика ВКУ-39/ВТкУ-2.200 в исходном состоянии и после 6 мес. экспонирования

Температура, °С	КЛТР: $\alpha_L \cdot 10^6, \text{K}^{-1}$, для углепластика			
	в исходном состоянии			после 6 мес. экспонирования
	без сушки	после сушки	после увлажнения	
-60	2,5	2,6	2,4	2,1
0	2,7	2,6	2,5	2,3
50	2,8	2,7	2,6	2,5
100	2,9	2,8	2,9	2,8
150	3,0	3,0	3,1	3,2
200	2,6	2,8	2,7	2,8
230	2,5	2,4	2,6	2,7

Как следует из данных табл. 3, сушка и увлажнение образцов также не изменяют КЛТР углепластика в направлении основы ткани. Эти результаты позволяют сделать вывод, что после сушки, увлажнения и 6 мес. экспонирования не выявлено различий в характере термического расширения и структуре углепластика ВКУ-39/ВТкУ-2.200 в широком интервале температур.

Изучены характеристики влагопереноса углепластика после климатического воздействия. Рис. 3 иллюстрирует кинетику сушки при 60 °С набора образцов углепластика ВКУ-39/ВТкУ-2.200 в исходном состоянии и после 6 мес. экспонирования. Общей закономерностью влагопереноса в ПКМ является существенное увеличение количества десорбированной влаги при сушке в образцах малых размеров [6]. Например, для исходных образцов углепластика ВКУ-39/ВТкУ-2.200 размером 100×100 мм количество десорбированной влаги w составило 0,12 %, а в образцах размером 10×10 мм повысилось до 0,17 %.

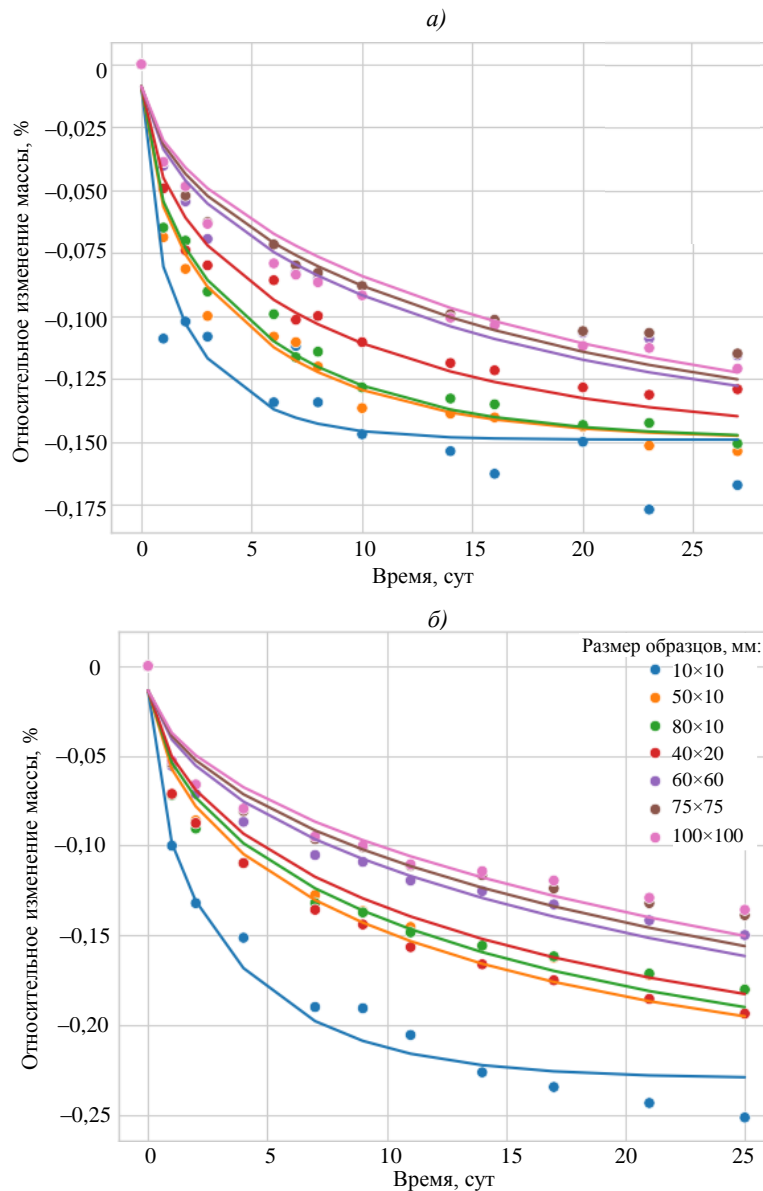


Рис. 3. Кинетика сушки набора образцов углепластика ВКУ-39/ВТкУ-2.200 разных размеров в исходном состоянии (а) и после 6 мес. экспозиции (б). Точки – экспериментальные данные, линии – данные, рассчитанные по модели диффузии Фика

По данным работ [3, 6], кинетика сушки достоверно моделируется вторым законом Фика в трехмерном приближении. Результаты расчетов содержания влаги w и коэффициентов диффузии влаги вдоль основы ткани D_L , поперек основы D_W и перпендикулярно плоскости армирования D_H , проведенных согласно работе [31], представлены в табл. 4. Указанные ошибки расчетов показывают хорошее соответствие между экспериментальными и расчетными значениями относительного изменения массы w с коэффициентами детерминации, близкими к единице ($R^2 = 0,956 \pm 0,002$).

Таблица 4

Влагосодержание и коэффициенты диффузии влаги образцов углепластика ВКУ-39/ВТкУ-2.200 в исходном состоянии и после 6 мес. экспонирования

Показатель	Значение показателя для образца		Ошибка для образца	
	в исходном состоянии	после 6 мес. экспонирования	в исходном состоянии	после 6 мес. экспонирования
$w, \%$	0,15	0,23	0,003	0,007
$D_L, \text{мм}^2/\text{сут}$	1,8	1,6	0,5	0,3
$D_W, \text{мм}^2/\text{сут}$	0,95	0,20	0,2	0,04
$D_H, \text{мм}^2/\text{сут}$	0,079	0,045	0,007	0,004

Примечание. w – количество накопленной влаги; D_L , D_W и D_H – коэффициенты диффузии влаги вдоль основы ткани, поперек основы ткани и перпендикулярно плоскости армирования соответственно.

Результаты исследования кинетики сушки, представленные на рис. 3 и в табл. 4, позволяют сделать следующие выводы о физических свойствах углепластика ВКУ-39/ВТкУ-2.200. Во-первых, выявлена существенная анизотропия влагопереноса в углепластике как в исходном состоянии, так и после 6 мес. экспонирования. Наиболее важный для характеристики качества композита коэффициент диффузии влаги в трансверсальном направлении (перпендикулярно плоскости пластины) D_H на порядок меньше, чем компоненты коэффициента диффузии влаги в плоскости армирования D_L и D_W . Во-вторых, все коэффициенты диффузии после климатического воздействия уменьшаются. В-третьих, углепластик ВКУ-39/ВТкУ-2.200 за 6 мес. натуральных испытаний накапливает в 1,5 раза больше влаги, чем в исходном состоянии.

Свойства связующего ВСЭ-1212 в углепластике исследованы методом динамического механического анализа аналогично работам [3, 4]. На рис. 4 показаны температурные зависимости динамического модуля потерь $E''(T)$ углепластика ВКУ-39/ВТкУ-2.200.

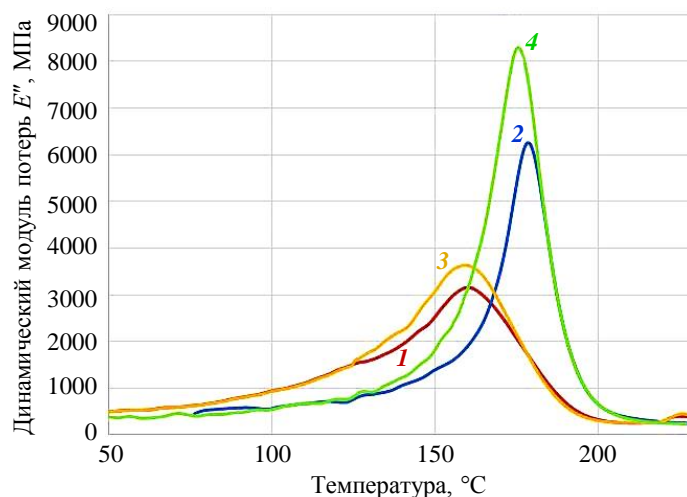


Рис. 4. Температурные зависимости динамического модуля потерь в области размягчения связующего углепластика ВКУ-39/ВТкУ-2.200 в исходном состоянии (1, 2) и через 6 мес. экспозиции (3, 4) без (1, 3) и после сушки (2, 4)

Температура стеклования T_g , определенная по положению максимума E'' на температурной шкале, после сушки исходных образцов углепластика повысилась со 162 до 179 °С, а после 6 мес. экспозиции – со 159 до 175 °С. Аналогичные эффекты наблюдали ранее в работе [3]. Таким образом, присутствие влаги как в исходных, так и в экспонированных образцах углепластика ВКУ-39/ВТкУ-2.200 снижает температуру стеклования его эпоксидной матрицы, изменяя тем самым физические свойства материала. Этот вывод соответствует результатам работ [6, 19, 21].

Влияние климатического воздействия на прочность и долговечность углепластика ВКУ-39/ВТкУ-2.200

Результаты измеренных значений пределов прочности при изгибе σ_b и межслойном сдвиге σ_s углепластика ВКУ-39/ВТкУ-2.200 в исходном состоянии и после 6 мес. натурной экспозиции представлены в табл. 5. Дополнительно образцы высушили при 60 °С до стабилизации массы и подвергли испытаниям на межслойный сдвиг и изгиб.

Таблица 5

Прочность углепластика ВКУ-39/ВТкУ-2.200 в исходном состоянии и после 6 мес. натурной экспозиции в двух состояниях

Условный номер образца	Предел прочности, МПа, для образца			
	без сушки		после сушки	
	в исходном состоянии	после 6 мес. экспонирования	в исходном состоянии	после 6 мес. экспонирования
При межслойном сдвиге				
1	67	72	71	67
2	75	70	72	69
3	79	73	73	65
4	76	72	67	68
5	75	73	71	72
Среднее значение	74±6	72±2	71±3	68±4
При трехточечном изгибе				
1	925	985	1103	1032
2	980	1098	943	974
3	1072	1002	1032	1071
4	879	1040	1035	1095
5	971	1050	1112	1007
Среднее значение	965±97	1035±33	1045±85	1036±61

Как видно из данных табл. 5, разбросы показателей σ_b и σ_s незначительны. Это подтверждает стабильность свойств изученного углепластика. После 6 мес. климатического воздействия предел прочности при изгибе возрос на 7 %, а предел прочности при межслойном сдвиге снизился на 3 %. Эти изменения незначительны и с учетом погрешности измерений позволяют считать, что прочность углепластика ВКУ-39/ВТкУ-2.200 на начальном этапе климатического старения осталась на исходном уровне.

Завершающей частью данной работы было исследование влияния 6 мес. экспонирования на долговечность углепластика ВКУ-39/ВТкУ-2.200 по алгоритмам

кинетической теории прочности [16]. На рис. 5 представлены силовые зависимости энергии активации разрушения при испытаниях на межслойный сдвиг и продольный изгиб углепластика ВКУ-39/ВТкУ-2.200 в исходном состоянии и после 6 мес. экспозиции.

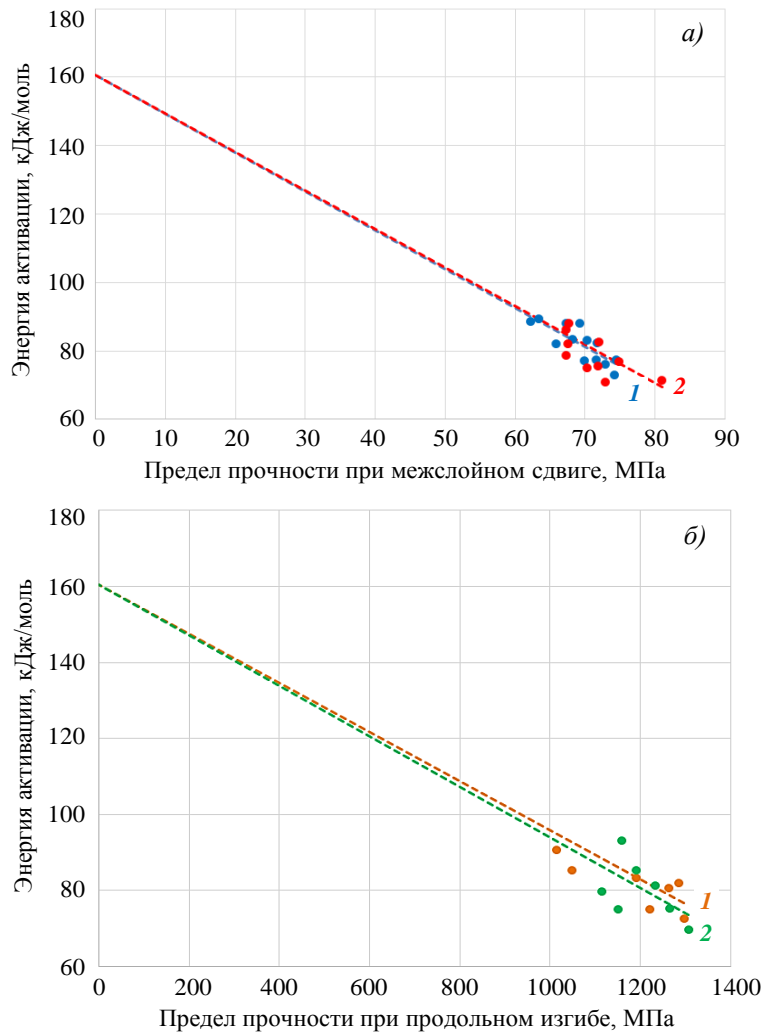


Рис. 5. Силовые зависимости энергии активации разрушения при испытаниях на межслойный сдвиг (а) и продольный изгиб (б) углепластика ВКУ-39/ВТкУ-2.200 в исходном состоянии (1) и после 6 мес. экспозиции (2)

С учетом силовых зависимостей энергии активации аналогично работе [16] вычислены параметры прочности при межслойном сдвиге P_s и продольном изгибе P_b , а по формуле (3) определена долговечность τ . Выборочные значения этих показателей представлены в табл. 6.

Показано, что долговечность при межслойном сдвиге при температуре 25 °С и постоянно действующей нагрузке $\sigma_s = 32$ МПа в исходном состоянии составляет 18 лет. После 6 мес. экспозиции долговечность образцов, хоть и повысилась до 21 года, но увеличившийся разброс данных, полученных для экспонированных образцов, не позволяет однозначно утверждать, что произошло улучшение свойств.

Долговечность при продольном изгибе при температуре 25 °С и постоянно действующей нагрузке $\sigma_b = 600$ МПа в исходном состоянии составила 25 лет. Однако в случае этого вида нагрузки деструкция поверхности и снижение температуры

стеклования коррелируют с изменением долговечности после 6 мес. экспозиции, что выражается в снижении этого показателя до 17 лет (табл. 6).

Таблица 6

**Параметры прочности и долговечность углепластика ВКУ-39/ВТкУ-2.200
в исходном состоянии и после 6 мес. натурной экспозиции
по результатам испытаний с разной скоростью нагружения**

Способ испытаний при различных скоростях нагружения	Показатель	Значение показателя для образца	
		в исходном состоянии без сушки	после 6 мес. экспозиции без сушки
Межслойный сдвиг	Параметр прочности при межслойном сдвиге P_s , МПа·моль/кДж	0,88±0,001	0,89±0,06
	Долговечность, годы, при 25 °С и $\sigma_s = 32$ МПа	18±0,3	21±7,8
Продольный изгиб	Параметр прочности при продольном изгибе P_b , МПа·моль/кДж	15,5±0,54	15,1±0,08
	Долговечность, годы, при 25 °С и $\sigma_b = 600$ МПа	25±8,9	17±1,2

Таким образом, долговечность углепластика ВКУ-39/ВТкУ-2.200 при межслойном сдвиге и продольном изгибе чувствительна к изменениям структуры и физических свойств под воздействием климатических факторов уже после 6 мес. экспозиции.

Заключения

Для выявления изменений структуры и физических свойств углепластика ВКУ-39/ВТкУ-2.200 после 6 мес. пребывания в натуральных условиях умеренно теплого климата использованы такие хорошо зарекомендовавшие себя методы, как профилометрия, гравиметрия, термомеханический анализ и динамический механический анализ.

Под воздействием температуры, влажности и солнечного УФ-облучения происходит деструкция поверхности и возрастает размах ее неоднородностей, снижается температура стеклования эпоксидной матрицы ВСЭ-1212, увеличивается влагосодержание и уменьшаются коэффициенты диффузии влаги в направлениях вдоль основы ткани, поперек основы ткани и перпендикулярно плоскости армирования.

После 6 мес. экспонирования стандартные механические показатели (пределы прочности при трехточечном изгибе и межслойном сдвиге) остаются на уровне исходных значений, демонстрируя стабильность материала и низкую чувствительность его прочностных показателей к начальным изменениям структуры и физических свойств.

Однако долговечность углепластика ВКУ-39/ВТкУ-2.200, определенная по силовым зависимостям энергии активации при межслойном сдвиге и продольном изгибе, оказалась чувствительной к начальным физико-химическим превращениям.

Полученную информацию можно использовать для достоверного прогнозирования долговечности ПКМ, подвергнутых разнообразным внешним воздействиям.

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

Список источников

1. 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). С. 122–144. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 28.08.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-122-144.
2. Гуляев И.Н., Сафронов А.М., Сатдинов Р.А. Сравнение онлайн- и офлайн-технологий изготовления препрегов и свойств углепластиков // *Труды ВИАМ*. 2022. № 6 (112). С. 49–57. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 28.08.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-6-49-57.
3. 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). С. 114–126. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 28.08.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-5-114-126.
4. 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). С. 113–128. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 03.09.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-8-113-128.
5. Koval' T.V., Veligodskii I.M., Gromova A.A. Change in the properties of BSR-3m binder in VKU-46 carbon-fiber-reinforced polymer after prolonged climatic aging // *Polymer Science. Series D*. 2023. Vol. 16. P. 687–693. DOI: 10.1134/s1995421223030152.
6. Каблов Е.Н., Старцев В.О., Лаптев А.Б. Старение полимерных композиционных материалов. М.: НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, 2023. 520 с.
7. Afzal A., Bangash M.K., Hafeez A., Shake K. Aging effects on the mechanical performance of carbon fiber-reinforced composites // *International Journal of Polymer Science*. 2023. Vol. 2023. Art. 4379307. DOI: 10.1155/2023/4379307.
8. Ci S., Wang B., Di C. et al. Effect of ultraviolet aging on properties of epoxy resin and Its pultruded fiber-reinforced composite // *Polymers*. 2025. Vol. 17. Art. 294. DOI: 10.3390/polym17030294.
9. Qin G., Fan Q., Mi P. et al. Review of aging mechanisms, mechanical properties, and prediction models of fiber-reinforced composites in natural environments // *Polymer Composites*. 2024. Vol. 45. P. 14448–14474. DOI: 10.1002/pc.28799.
10. Wang J., Hota G., Liang R., Liu W. Durability and prediction models of fiber-reinforced polymer composites under various environmental conditions: A critical review // *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. 2015. Vol. 35. P. 179–211. DOI: 10.1177/0731684415610920.
11. 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. Art. 2490. DOI: 10.3390/polym15112490.
12. 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. DOI: 10.1177/00219983221091465.
13. Shreepannaga A., Vijaya Kini M., Pai D. The ageing effect on static and dynamic mechanical properties of fibre reinforced polymer composites under marine environment – A review // *Materials Today: Proceedings*. 2022. Vol. 52. Art. 689–696. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.10.084.
14. Zhong Y., Cheng M., Zhang X. et al. Hygrothermal durability of glass and carbon fiber reinforced composites – A comparative study // *Composite Structures*. 2019. Vol. 211. P. 134–143. DOI: 10.1016/j.compstruct.2018.12.034.
15. Karimi S., Anvari A. Predicting natural aging effects on fatigue life of CFRP–aluminum adhesive joints using machine learning and accelerated aging data // *Journal of Adhesion Science and Technology*. 2025. Vol. 39. P. 1602–1623. DOI: 10.1080/01694243.2025.2457372.
16. Петров М.Г., Старцев О.В., Лебедев М.П. Исследование прочности конструкционных углепластиков при растяжении, сжатии и межслойном сдвиге // *Деформация и разрушение материалов*. 2025. № 3. С. 19–27. DOI: 10.31044/1814-4632-2025-3-19-27.
17. Блазнов А.Н., Маркин В.Б., Савин В.Ф. и др. Метод исследования долговечности стеклопластиковой строительной арматуры // *Умные композиты в строительстве*. 2021. Т. 2. С. 32–45. DOI: 10.52957/27821919_2021_3_32.

18. Cha J.Y., Yoon S.B. Determination of shift factor for long-term life prediction of carbon/fiber epoxy composites using the time-temperature superposition principle // *Functional Composites and Structures*. 2022. Vol. 4. Art. 015003. DOI: 10.1088/2631-6331/ac529e.
19. Startsev O.V., Startsev V.O., Kogan A.M., Vardanyan A.M. Changes in the plasticizing effect of moisture during climatic aging of polymer composite materials // *Russian Metallurgy (Metally)*. 2024. Vol. 2024. P. 413–422. DOI: 10.1134/S0036029524700733.
20. Startsev O.V., Skirta A.A., Startsev V.O., Valevin E.O., Kogan A.M. Ageing of VKU-39 carbon plastic under moderately warm and tropical climate conditions. 1. Changes of strength indicators // *Science. Series D*. 2025. Vol. 178. P. 382–386. DOI: 10.1134/S1995421225700236.
21. Startsev O.V., Skirta A.A., Startsev V.O., Valevin E.O., Kogan A.M. Aging of the VKU-39 carbon plastic under moderately warm and tropical climate conditions. 2. Change in physical properties // *Polymer Science. Series D*. 2025. Vol. 18. P. 387–391. DOI: 10.1134/S1995421225700248.
22. ГОСТ Р ИСО 4287–2014. Геометрические характеристики изделий (GPS). Структура поверхности. Профильный метод. Термины, определения и параметры структуры поверхности. М.: Стандартинформ, 2019. 20 с.
23. Старцев В.О., Лебедев М.П., Фролов А.С. Измерение показателей рельефа поверхности при изучении старения и коррозии материалов. 1. Российские и зарубежные стандарты // *Все материалы. Энциклопедический справочник*. 2018. № 6. С. 32–38.
24. Старцев В.О., Валевин Е.О., Гуляев А.И. Влияние старения поверхности полимерных композиционных материалов на их механические свойства // *Труды ВИАМ*. 2020. № 8 (90). С. 64–76. <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 05.09.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-8-64-76.
25. ISO 6721-11. Plastics – Determination of dynamic mechanical properties – Part 11: Glass transition temperature. ISO, 2012. 22 p.
26. ISO 11359-2. Plastics – Thermomechanical analysis (TMA) – Part 2. Determination of coefficient of linear thermal expansion and glass transition temperature. ISO, 1999. 16 p.
27. ГОСТ 32659–2014 (ISO 14130:1997). Композиты полимерные. Методы испытаний. Определение кажущегося предела прочности при межслойном сдвиге методом испытания короткой балки. М.: Стандартинформ, 2014. 16 с.
28. ГОСТ Р 56810–2015. Композиты полимерные. Метод испытания на изгиб плоских образцов. М.: Стандартинформ, 2016. 20 с.
29. Ruiz-Iglesias R., Cappello R., Thomsen O.T., Dulieu-Barton J.M. Estimating the coefficients of thermal expansion of carbon fibre composite materials using infrared thermography // *Composites: Part A*. 2025. Vol. 198. Art. 109094. DOI: 10.1016/j.compositesa.2025.109094.
30. Dong C., Li K., Jiang Y. et al. Evaluation of thermal expansion coefficient of carbon fiber reinforced composites using electronic speckle interferometry // *Optics Express*. 2018. Vol. 26. P. 531–543. DOI: 10.1364/OE.26.000531.
31. Crank J. *The mathematics of diffusion*. Second ed. Oxford: Clarendon press, 1975. 414 p.

References

1. 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), pp. 122–144. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: August 28, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-122-144.
2. Gulyaev I.N., Safronov A.M., Satdinov R.A. Comparison online and offline of prepregs manufacturing technologies and properties of carbon fiber plastics. *Trudy VIAM*, 2022, no. 6 (112), pp. 49–57. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: August 28, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-6-49-57.
3. 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), pp. 114–126. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: August 28, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-5-114-126.

4. 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), pp. 113–128. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: September 03, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-8-113-128.
5. Koval' T.V., Veligodskii I.M., Gromova A.A. Change in the properties of BSR-3m binder in VKU-46 carbon-fiber-reinforced polymer after prolonged climatic aging. *Polymer Science. Series D*, 2023, vol. 16, pp. 687–693. DOI: 10.1134/s1995421223030152.
6. Kablov E.N., Startsev V.O., Laptev A.B. *Aging of polymer composite materials*. Moscow: NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, 2023, 520 p.
7. Afzal A., Bangash M.K., Hafeez A., Shake K. Aging effects on the mechanical performance of carbon fiber-reinforced composites. *International Journal of Polymer Science*, 2023, vol. 2023, art. 4379307. DOI: 10.1155/2023/4379307.
8. Ci S., Wang B., Di C. et al. Effect of ultraviolet aging on properties of epoxy resin and its pultruded fiber-reinforced composite. *Polymers*, 2025, vol. 17, art. 294. DOI: 10.3390/polym17030294.
9. Qin G., Fan Q., Mi P. et al. Review of aging mechanisms, mechanical properties, and prediction models of fiber-reinforced composites in natural environments. *Polymer Composites*, 2024, vol. 45, pp. 14448–14474. DOI: 10.1002/pc.28799.
10. Wang J., Hota G., Liang R., Liu W. Durability and prediction models of fiber-reinforced polymer composites under various environmental conditions: A critical review. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2015, vol. 35, pp. 179–211. DOI: 10.1177/0731684415610920.
11. 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, art. 2490. DOI: 10.3390/polym15112490.
12. 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. DOI: 10.1177/00219983221091465.
13. Shreepannaga A., Vijaya Kini M., Pai D. The ageing effect on static and dynamic mechanical properties of fibre reinforced polymer composites under marine environment – A review. *Materials Today: Proceedings*, 2022, vol. 52, art. 689–696. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.10.084.
14. Zhong Y., Cheng M., Zhang X. et al. Hygrothermal durability of glass and carbon fiber reinforced composites – A comparative study. *Composite Structures*, 2019, vol. 211, pp. 134–143. DOI: 10.1016/j.compstruct.2018.12.034.
15. Karimi S., Anvari A. Predicting natural aging effects on fatigue life of CFRP–aluminum adhesive joints using machine learning and accelerated aging data. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2025, vol. 39, pp. 1602–1623. DOI: 10.1080/01694243.2025.2457372.
16. Petrov M.G., Startsev O.V., Lebedev M.P. Study of the strength of structural carbon fiber reinforced plastics under tension, compression, and interlaminar shear. *Deformatsiya i razrushenie materialov*, 2025, no. 3, pp. 19–27. DOI: 10.31044/1814-4632-2025-3-19-27.
17. Blaznov A.N., Markin V.B., Savin V.F. et al. Method for studying the durability of fiberglass construction reinforcement. *Umnye kompozity v stroitelstve*, 2021, vol. 2, pp. 32–45. DOI: 10.52957/27821919_2021_3_32.
18. Cha J.Y., Yoon S.B. Determination of shift factor for long-term life prediction of carbon/fiber epoxy composites using the time-temperature superposition principle. *Functional Composites and Structures*, 2022, vol. 4, art. 015003. DOI: 10.1088/2631-6331/ac529e.
19. Startsev O.V., Startsev V.O., Kogan A.M., Vardanyan A.M. Changes in the plasticizing effect of moisture during climatic aging of polymer composite materials. *Russian Metallurgy (Metally)*, 2024, vol. 2024, pp. 413–422. DOI: 10.1134/S0036029524700733.
20. Startsev O.V., Skirta A.A., Startsev V.O., Valevin E.O., Kogan A.M. Ageing of VKU-39 carbon plastic under moderately warm and tropical climate conditions. 1. Changes of strength indicators. *Science. Series D*, 2025, vol. 178, pp. 382–386. DOI: 10.1134/S1995421225700236.
21. Startsev O.V., Skirta A.A., Startsev V.O., Valevin E.O., Kogan A.M. Aging of the VKU-39 carbon plastic under moderately warm and tropical climate conditions. 2. Change in physical properties. *Polymer Science. Series D*, 2025, vol. 18, pp. 387–391. DOI: 10.1134/S1995421225700248.

22. State Standard R ISO 4287–2014. *Geometrical product characteristics (GPS). Surface structure. Profile method. Terms, definitions, and parameters of surface structure*. Moscow: Standartinform, 2019, 20 p.
23. Startsev V.O., Lebedev M.P., Frolov A.S. Measurement of surface relief indicators in the study of aging and corrosion of materials. 1. Russian and foreign standards. *Vse materialy. Entsiklopedicheskiy spravochnik*, 2018, no. 6, pp. 32–38.
24. 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), pp. 64–76. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: September 05, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-8-64-76.
25. ISO 6721-11. *Plastics – Determination of dynamic mechanical properties – Part 11: Glass transition temperature*. ISO, 2012, 22 p.
26. ISO 11359-2. *Plastics – Thermomechanical analysis (TMA) – Part 2. Determination of coefficient of linear thermal expansion and glass transition temperature*. ISO, 1999, 16 p.
27. State Standard 32659–2014 (ISO 14130:1997). *Polymer Composites. Test Methods. Determination of Apparent Interlaminar Shear Strength by the Short Beam Test Method*. Moscow: Standartinform, 2014, 16 p.
28. State Standard R 56810–2015. *Polymer composites. Method of bending test of flat specimens*. Moscow: Standartinform, 2016, 20 p.
29. Ruiz-Iglesias R., Cappello R., Thomsen O.T., Dulieu-Barton J.M. Estimating the coefficients of thermal expansion of carbon fibre composite materials using infrared thermography. *Composites: Part A*, 2025, vol. 198, art. 109094. DOI: 10.1016/j.compositesa.2025.109094.
30. Dong C., Li K., Jiang Y. et al. Evaluation of thermal expansion coefficient of carbon fiber reinforced composites using electronic speckle interferometry. *Optics Express*, 2018, vol. 26, pp. 531–543. DOI: 10.1364/OE.26.000531.
31. Crank J. *The mathematics of diffusion*. Second ed. Oxford: Clarendon press, 1975, 414 p.

Информация об авторах

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

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

Корниенко Герман Викторович, инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

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

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

German V. Kornienko, Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 03.12.2025; одобрена и принята к публикации после рецензирования 15.12.2025.
The article was submitted 03.12.2025; approved and accepted for publication after reviewing 15.12.2025.