

Научная статья

УДК 539.32:620.179.7

DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-3-132-144

## ВЛИЯНИЕ ВНЕШНИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА КОЭФФИЦИЕНТ ЛИНЕЙНОГО ТЕПЛООВОГО РАСШИРЕНИЯ УГЛЕПЛАСТИКОВ Часть 2. Сравнение результатов натуральных и лабораторных испытаний

В.О. Старцев<sup>1</sup>, А.М. Варданын<sup>1</sup>

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

**Аннотация.** Во втором разделе статьи представлены результаты исследований коэффициента линейного теплового расширения (КЛТР) углепластика на основе цианэфирного связующего ВСЦ-14, экспонированного 24 мес в условиях умеренно холодного климата и в лабораторных имитационных условиях. Изучены два варианта натуральных климатических испытаний: стандартное экспонирование на открытом атмосферном стенде и экспонирование с сочетанием термоциклов, имитирующих режим взлета и посадки самолета. Для выяснения причин изменения КЛТР анализируются результаты измерений пределов прочности при сжатии и растяжении, а также температуры стеклования связующего ВСЦ-14.

**Ключевые слова:** углеродное волокно, цианэфирное связующее, углепластик, коэффициент линейного теплового расширения, прочность, климатическое старение, термоциклы, доотверждение, деструкция, микротрещины

**Для цитирования:** Старцев В.О., Варданын А.М. Влияние внешних воздействий на коэффициент линейного теплового расширения углепластиков. Часть 2. Сравнение результатов натуральных и лабораторных испытаний // Труды ВИАМ. 2023. № 3 (121). Ст. 12. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-3-132-144.

Scientific article

## INFLUENCE OF EXTERNAL INFLUENCES ON THE COEFFICIENT OF LINEAR THERMAL EXPANSION OF CARBON FIBER PLASTICS Part 2. Comparison of the results of full-scale and laboratory climatic tests

V.O. Startsev<sup>1</sup>, A.M. Vardanyan<sup>1</sup>

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

**Abstract.** The second section of the article presents the results of studies of the coefficient of linear thermal expansion (CLTE) of carbon fiber reinforced plastic based on the cyanoether binder VSC-14, exposed for 24 months in a moderately cold climate and laboratory simulation conditions. Two variants of full-scale climatic tests were studied: standard exposure on an open atmospheric stand and exposure with a combination of thermal cycles simulating the mode of takeoff and landing of an aircraft. To find out the reasons for the change in the CLTE, the results of measurements of the compressive and tensile strengths, as well as the glass transition temperature of the binder VSC-14, are analyzed.

**Keywords:** carbon fiber, cyanoether binder, carbon plastic, coefficient of linear thermal expansion, strength, climatic aging, thermal cycles, post-curing, destruction, microcracks

**For citation:** Startsev V.O., Vardanyan A.M. Influence of external influences on the coefficient linear thermal expansion of carbon fiber plastics. Part 2. Comparison of the results of full-scale and laboratory climatic tests. *Trudy VIAM*, 2023, no. 3 (121), paper no. 12. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-3-132-144.

---

\* Часть 1 – см. «Труды ВИАМ», № 2 (120), 2023.

## Введение

Самым распространенным и сложным по разнообразию внешних воздействий на материалы является сочетание суточных и сезонных температурно-влажностных циклов, ультрафиолетовой радиации Солнца, осадков в открытых климатических условиях. Пребывание полимерных композиционных материалов (ПКМ) на земной поверхности вызывает их старение, которое характеризуется изменениями их механических показателей  $R$ : пределов прочности и модулей упругости при растяжении ( $\sigma_t$ ,  $E_t$ ), сжатии ( $\sigma_c$ ,  $E_c$ ), изгибе ( $\sigma_b$ ,  $E_b$ ) и межслойном сдвиге ( $\tau$ ,  $G$ ) [1].

Среди разнообразных ПКМ особое внимание уделяется изучению свойств углепластиков авиационного и космического назначения [2]. В научно-технической литературе представлена обширная информация об изменении показателей  $R$  углепластиков при влагонасыщении [3, 4], термоциклировании [5–7], действии ультрафиолетовой радиации [8], экспонировании в условиях открытого космоса [9, 10] и в натуральных климатических условиях [11–13], а также при комплексном воздействии внешней среды и механических нагрузок [14–16]. Анализ кинетических зависимостей показателей  $R$  является надежной основой для выявления значимости воздействия агрессивных факторов и прогнозирования безопасной эксплуатации ПКМ [17]. При выборе параметров  $R$  следует отдавать предпочтение показателям, измеряемым с наименьшими коэффициентами вариации, как это было использовано при исследовании твердости [18].

В настоящее время создано большое количество полимерных связующих, используемых для получения углепластиков [19]. Среди них большой интерес вызывают связующие на основе циановых эфиров марок ВСТ-1208, ВСЦ-14, ВСТ-1210 и др. [20]. Цианэфирные углепластики обладают преимуществами перед другими ПКМ по высокой теплостойкости, низкому влагопоглощению, возможности получения конструкционных материалов при использовании однонаправленных углеродных лент, двунаправленных и мультиаксиальных тканей с хорошим комплексом показателей  $R$  для размеростабильных конструктивных элементов, пригодных для работы в широком интервале температур.

Например, углепластик марки ВКУ-27л на основе полициануратного расплавно-го связующего ВСТ-1208, отвержденный при температуре 180 °С, характеризуется низким влагопоглощением [21]. Однако сорбция даже небольшого количества влаги (0,6 %) вызывает значительное пластифицирующее воздействие – уменьшение значения  $\sigma_c$  на 12 % [21]. При натуральных климатических испытаниях в умеренно теплом климате плит из углепластика ВКУ-27л с исходной величиной  $\sigma_b = 1570$  МПа после 3 мес экспонирования определено возрастание значений  $\sigma_b$  на 15 % [22], объясненное потерей сорбированной влаги при экспонировании в летний период. Поэтому для выявления роли пластифицирующего воздействия влаги, накопленной во время климатических испытаний, показатели свойств ПКМ на цианэфирных связующих определяют методами динамического механического анализа (ДМА) и термомеханического анализа (ТМА) на образцах, вырезанных из пластин после съема с испытаний без дополнительной обработки (в «мгновенном» состоянии) и после высушивания при температуре 60 °С до стабилизации массы [23, 24]. Для определения необратимых изменений механических свойств углепластиков (прочностных показателей  $\sigma_c$  и  $\sigma_b$ ) на различных этапах климатического старения необходимо использовать полностью высушенные образцы.

Цель второй части данной статьи – получение обоснованных заключений о влиянии климатического старения на коэффициент линейного теплового расширения (КЛТР) углепластика на основе цианэфирного связующего марки ВСЦ-14 [20] и углеродной ткани саржевого плетения марки ВТкУ-2.200 [22]. Необходимо принять во внимание, что молекулярная подвижность и релаксационные процессы в полимерных матрицах ПКМ зависят от типа армирующего наполнителя [25]. Для того чтобы

повысить чувствительность показателей термического расширения к физическому старению, деструкции, пластификации, доотверждению и другим физико-химическим превращениям при климатических воздействиях, целесообразно измерить значения КЛТР ( $\alpha_3$ ) в направлении, перпендикулярном плоскости армирования. Причина такого предпочтения очевидна: углеродная ткань саржевого плетения ВТкУ-2.200 [26] с одинаковым количеством нитей по основе и утку углеродного волокна обеспечивает значения КЛТР в направлении, совпадающем с направлением волокон в плоскости армирования ( $\alpha_1$ ), и в трансверсальном направлении ( $\alpha_2$ ), т. е. перпендикулярно направлению волокон в плоскости армирования, на уровне  $\pm 1 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  [22]. По данным работы [26] значения  $\alpha_3$  в стеклообразном состоянии связующего ВСЦ-14 составляют  $(35 \pm 5) \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ , аналогично результатам измерений КЛТР углепластика КМУ-4л на основе углеродной ленты ЛУ-П со схемой армирования [0; 90] и модифицированного эпоксидного связующего ЭНФБ-2 [27].

### Материалы и методы

Одной из причин выбора для исследований углепластика на основе цианэфирного связующего ВСЦ-14 и углеродной ткани саржевого плетения ВТкУ-2.200 [22] являлась высокая температура отверждения  $230 \text{ }^\circ\text{C}$  [20, 22]. В полученных плитах углепластика даже при комнатной температуре сохранялся высокий уровень внутренних напряжений, которые могут оказаться важной причиной необратимых изменений механических показателей  $R$  и значений КЛТР композиционного материала в климатических условиях [28].

В полученном углепластике уровень растягивающих внутренних напряжений полимерной матрицы в направлении армирования  $\sigma_{mL}$  можно оценить по упрощенному соотношению [28]

$$\sigma_{mL} = -E_m \alpha_m (T - T_0), \quad (1)$$

где  $E_m$  – модуль упругости связующего;  $\alpha_m$  – КЛТР связующего;  $T$  – температура измерений;  $T_0$  – температура отверждения. Для исследуемого углепластика  $E_m = 3,5 \text{ МПа}$ ,  $\alpha_m = 65 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ,  $T_0 = 230 \text{ }^\circ\text{C}$ . Следовательно, даже при комнатной температуре  $\sigma_{mL}$  достигает  $27 \text{ МПа}$ , что составляет  $\sim 40\%$  от величины  $\tau$  для углепластика системы «углеродная ткань ВТкУ-2.200–цианэфирное связующее» [29].

Климатическое старение углепластика осуществляли по трем вариантам. Во-первых, плиты материала экспонировали на открытом стенде в условиях умеренно холодного климата в течение 24 мес. Среднегодовые показатели условий экспонирования представлены в работе [23]. Во-вторых, экспонирование на стендах сопровождалось дополнительным термоциклированием, имитирующим режим взлета и посадки самолета: 5 раз в неделю плиты снимали с атмосферного стенда и выдерживали 1 ч в камере холода при температуре  $-60 \text{ }^\circ\text{C}$ , а затем переносили на 1 ч в камеру тепла, нагретую до температуры  $65 \text{ }^\circ\text{C}$ , по аналогии с работой [30]. В-третьих, материал подвергали лабораторным имитационным испытаниям. Для имитации 12 мес пребывания в условиях умеренно холодного климата углепластик последовательно подвергали: выдержке при температуре  $55 \text{ }^\circ\text{C}$  и относительной влажности воздуха  $93\%$  в течение 7 сут (ГОСТ Р 51369–99); выдержке при температуре  $-60 \text{ }^\circ\text{C}$  в течение 6 ч (ГОСТ 9.707–81); перепадам температуры с переходом через  $0 \text{ }^\circ\text{C}$  (ГОСТ 9.707–81) в количестве 56 циклов (в течение 112 ч); ультрафиолетовому облучению (ГОСТ Р 51370–99) в течение 37 сут при интегральной плотности потока излучения  $1120 \text{ Вт/м}^2$  и плотности потока излучения  $65 \text{ Вт/м}^2$  в интервале длин волн  $300\text{--}400 \text{ нм}$  при температуре черного тела  $70 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Второй вариант испытаний представлял особый интерес для выявления возможных изменений значений КЛТР при старении углепластика, так как при минимальной

температуре термоцикла скачки внутренних напряжений, рассчитанные по формуле (1), достигают 67 МПа и увеличивают вероятность накопления микротрещин. По данным работы [31] при термоциклировании увлажненного углепластика марки Т300/5209 по режиму от  $-54$  до  $+70$  и  $+93$  °С значение показателя  $\tau$  уменьшилось на 39 % из-за набухания и образования поперечных микротрещин. Представляло интерес проследить, насколько при этом изменится КЛТР аналогичного материала. За 24 мес испытаний проведено 480 термоциклов, что в 5 раз превосходит аналогичное число в работах [31, 32] и совпадает с числом термоциклов в работах [33, 34].

Измерения значений КЛТР в направлении, перпендикулярном плоскости армирования ( $\alpha_3$ ), проводили на термомеханическом анализаторе в интервале температур от 20 до 220 °С. Для повышения достоверности результатов все измерения выполняли на пяти параллельных образцах углепластика каждой модификации в исходном состоянии и после каждого срока выдержки в климатических условиях. Методика измерений рассмотрена в работе [26]. Теоретическое значение показателя  $\alpha_3$  рассчитано по формуле [35]

$$\alpha_3 = \alpha_{fH} \sqrt{V_f} + \alpha_m (1 - \sqrt{V_f}) \left( 1 + V_f v_m \frac{E_{fH}}{E_m} \right), \quad (2)$$

где  $E$  – модуль упругости;  $V$  – относительное объемное содержание; индексы  $f$  и  $m$  относятся к наполнителю и полимерной матрице соответственно; индекс  $H$  показывает трансверсальное направление;  $v$  – коэффициент Пуассона.

Используя значения модуля упругости углепластика в направлении армирования  $E_1 = 70$  ГПа [26] при  $\alpha_{fH} = 26 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  [36] и  $\alpha_m = 60 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  [37],  $V_f = 0,5$  и  $v_m = 0,33$ , из соотношения (2) получаем  $\alpha_3 = 36 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ . Это с точностью до 5 % совпадает со значением КЛТР, экспериментально измеренным в работе [26].

Измерение пределов прочности при сжатии  $\sigma_c$  и изгибе  $\sigma_b$  выполнено по ГОСТ 25.602–84 и ГОСТ 25.604–84. Для исключения обратимого воздействия влаги образцы углепластика перед измерениями прочностных показателей высушивали до стабилизации массы при температуре 60 °С. Температуру стеклования  $T_g$  связующего ВСЦ-14 в составе углепластика определяли методом ДМА по температуре максимума динамического модуля потерь  $E''$ , по аналогии с работой [38].

### Результаты и обсуждение

На рис. 1 изображена температурная зависимость динамического модуля потерь  $E''$  углепластика ВТкУ-2.200/ВСЦ-14 в исходном состоянии.

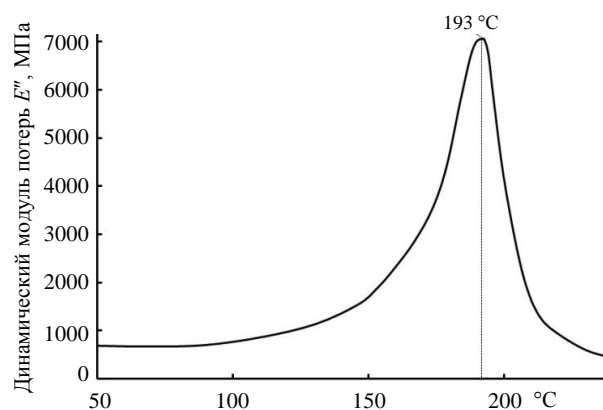


Рис. 1. Температурная зависимость динамического модуля потерь при переходе цианэфириной матрицы углепластика ВТкУ-2.200/ВСЦ-14 из стеклообразного в высокоэластическое состояние

Эта зависимость позволяет определить температуру стеклования  $T_g$  связующего ВСЦ-14 в составе углепластика по положению максимума параметра  $E''$  при переходе из стеклообразного в высокоэластическое состояние [38].

Для большей достоверности ДМА-измерения выполнены на пяти параллельных образцах как в исходном состоянии, так и после 3, 6, 9, 12, 18 и 24 мес натуральных испытаний, а также после имитации 12 и 24 мес старения в лабораторных условиях. Значения температуры  $T_g$  хорошо воспроизводятся – в исходном состоянии  $T_g = 192,8 \pm 1,2$  °С.

На рис. 2 показаны температурные зависимости относительного термического расширения  $dH/H_0$  пяти исходных образцов углепластика в направлении, перпендикулярном плоскости армирования, где  $H_0$  – толщина образца при комнатной температуре;  $H$  – толщина образца при произвольной температуре  $T$  в интервале от  $-20$  до  $+220$  °С;  $dH$  – изменение толщины образца при изменении температуры  $T$  на  $1$  °С. Линии данных зависимостей почти совпадают в интервале температур от  $-20$  до  $+100$  °С, но увеличивают разброс при температуре  $220$  °С – до  $\pm 3 \cdot 10^{-3}$ .

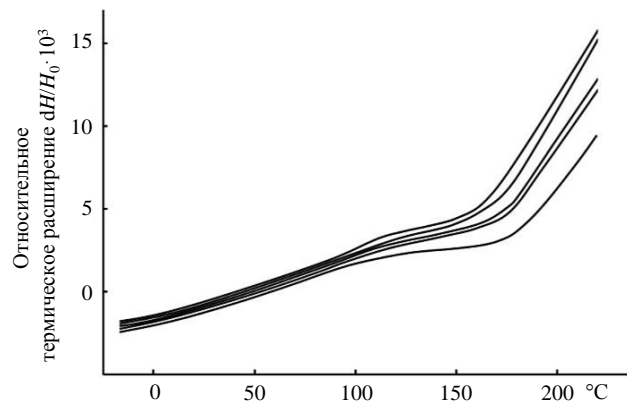


Рис. 2. Температурные зависимости относительного термического расширения пяти параллельных образцов углепластика ВТкУ-2.200/ВСЦ-14

Средние значения КЛТР пяти параллельных исходных образцов, вычисленные при постоянном давлении  $p$  как

$$\alpha_3 = \frac{1}{H} \left( \frac{dH}{dT} \right)_p, \quad (3)$$

сопоставлены в табл. 1. Стандартные отклонения не превышают 10 % от вычисленных показателей  $\alpha_3$ .

Таблица 1

Средние значения коэффициента линейного теплового расширения (КЛТР) исходных образцов углепластика ВТкУ-2.200/ВСЦ-14

Температура $T_i$ , °С	КЛТР: $\alpha_3 \cdot 10^6 \text{ K}^{-1}$ в интервале температур от $-20$ °С до $T_i$ для образцов					Среднее арифметическое значение $\alpha_3 \cdot 10^6 \text{ K}^{-1}$	Стандартное отклонение, $S \cdot 10^6 \text{ K}^{-1}$
	1	2	3	4	5		
-20	28,3	25,2	29,0	32,2	25,6	28,1	2,8
0	30,7	32,3	33,0	33,8	27,2	31,4	2,6
50	32,7	35,3	37,0	35,3	32,1	34,5	2,0
100	36,1	40,0	41,4	40,0	36,5	37,8	3,2

Усредненные значения параметра  $\alpha_3$  для всей совокупности экспонированных образцов углепластика представлены в табл. 2, в которой помещены усредненные значения температуры  $T_g$  с отклонениями до  $1,5$  °С, а также пределы прочности при сжатии  $\sigma_c$  и изгибе  $\sigma_b$  для высушенных образцов.

Таблица 2

**Влияние условий и продолжительности климатических испытаний  
на коэффициент линейного теплового расширения (КЛТР),  
прочность и температуру стеклования углепластика ВТкУ-2.200/ВСЦ-14**

Продолжительность испытаний, мес	КЛТР: $\alpha_3 \cdot 10^6 \text{ K}^{-1}$ в интервале температур, °С		Пределы прочности образцов, высушенных после экспонирования, МПа		Температура стеклования $T_g$ , °С
	-20÷+100	170÷220	при сжатии $\sigma_c$	при изгибе $\sigma_b$	
0	38	140	645	1068	193
3	38/40	120/85	674/774	1080/1074	203/209
6	37 /42	170 /150	700/787	1100/1148	202/203
9	41/45	220/220	750/763	1100/1114	195/204
12	42/45	240/225	768/712	1050/1081	195/198
18	46/39	250/270	765/520	956/837	195/194
24	47/33	270/330	433/399	857/655	195/191
Имитация 12	38	170	631	1097	207
Имитация 24	46	230	598	898	201

Примечание. В числителе – при натурном экспонировании, в знаменателе – при натурном экспонировании + термоциклировании.

Результаты, суммированные в табл. 2, позволяют получить заключения об особенностях и причинах изменения значений КЛТР для углепластика ВТкУ-2.200/ВСЦ-14 при всех изученных вариантах климатического воздействия.

*Экспонирование в условиях умеренно холодного климата*

Проанализируем основные эффекты изменения значений КЛТР для углепластика в стеклообразном состоянии связующего ВСЦ-14 (в интервале температур: -20÷+100 °С) и при переходе в высокоэластическое состояние (в интервале температур: 170÷220 °С) при экспонировании в климатических условиях (табл. 2). В течение 6 мес натурального экспонирования показатель  $\alpha_3$  при температуре  $T < T_g$  сохраняет исходное значение  $38 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ , после чего монотонно возрастает до  $47 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  при достижении 24 мес испытаний. Отмеченное возрастание составляет 24 % и намного превосходит возможную погрешность определения  $\alpha_3$ . Подобное, но более существенное возрастание  $\alpha_3$  обнаружено при температуре  $T > T_g$  – в 1,9 раза. После экспонирования в течение 3 мес происходит снижение значений КЛТР – со  $140 \cdot 10^{-6}$  до  $120 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  (на 9 %).

Экспериментально установлено, что в условиях умеренно холодного климата в течение первых 3–12 мес экспонирования прочностные показатели возрастают ( $\sigma_b$  – незначительно, а  $\sigma_c$  – на 20 %), после чего необратимо уменьшаются – соответственно на 20 и 33 % после 24 мес экспозиции. Подобное экстремальное изменение показателей  $R$  углепластиков отмечалось в работах [22–24, 39]. Можно полагать, что в открытых климатических условиях в первые месяцы воздействия преобладают эффекты доотверждения связующего, а в течение 12–24 мес доминируют деструктивные процессы. Это заключение подтверждается экстремальным изменением температуры стеклования связующего: увеличение на 9–10 °С из-за доотверждения и последующее снижение на 7 °С вследствие деструкции.

Вероятными причинами уменьшения значений КЛТР в стеклообразном состоянии связующего и при температуре  $T > T_g$  в первые месяцы экспонирования являются структурная релаксация [40] и доотверждение, сопровождающееся возрастанием температуры  $T_g$  и плотности сшивки [41–43]. Возрастание значений КЛТР при продолжении экспонирования вызвано деструкцией, преобладающей над сшивкой, которая снижает температуру стеклования, плотность пространственной сетки и позволяет достичь лучшей молекулярной упаковки сетчатого полимера в стеклообразном и высокоэластическом состояниях, как это показано в работе [44].

*Экспонирование в условиях умеренно холодного климата с наложением термоциклов*

Сочетание натурального экспонирования и термоциклов, имитирующих взлет и посадку самолета, существенно изменило старение углепластика. В стеклообразном состоянии связующего значения КЛТР возрастали до 12 мес выдержки, после чего стали уменьшаться и оказались на 13 % меньше исходного значения (табл. 2). При температуре  $T > T_g$  также выявлено снижение параметра  $\alpha_3$  со  $140 \cdot 10^{-6}$  до  $85 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  (на 39 %) с последующим увеличением в 2,4 раза после 24 мес испытаний.

Прочностные показатели изменялись экстремально – увеличиваясь до 9–12 мес старения. После 24 мес выдержки показатели  $R$  уменьшились значительно:  $\sigma_b$  – на 39 %, а  $\sigma_c$  – на 38 %.

За первые 3 мес совместного воздействия климата и термоциклов достигнуто самое высокое значение температуры  $T_g = 209 \text{ }^\circ\text{C}$ . После этого температура стеклования стала снижаться и оказалась на  $2 \text{ }^\circ\text{C}$  меньше своего исходного состояния.

Указанные изменения перечисленных показателей отражают более существенный уровень старения углепластика. В дополнение к причинам, вызывающим рассмотренное ранее изменение значений КЛТР при простом экспонировании, необходимо отметить действие скачков внутренних напряжений, вызванных термоциклами [28]. Многократно повторяющиеся скачки внутренних напряжений вызывают образование микротрещин и снижение значений КЛТР в стеклообразном состоянии термореактивных связующих [45–47]. Этому способствует солнечное ультрафиолетовое облучение, которое активизирует возникновение микротрещин и снижение механических показателей  $R$  [48, 49].

*Лабораторные имитационные климатические испытания*

После имитационных испытаний, моделирующих 12 мес пребывания углепластика в умеренно холодном климате, значения КЛТР для углепластика ВТкУ-2.200/ВСЦ-14 в стеклообразном состоянии остались на уровне исходного значения. Имитационные испытания 24 мес натурального климатического воздействия повысили значения КЛТР до  $47 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ , что соответствует величине этого показателя после 24 мес натуральных испытаний. При температуре  $T > T_g$  также сохранилась тенденция возрастания показателя  $\alpha_3$ .

В результате имитационных испытаний выявилась тенденция к уменьшению показателей  $R$  (табл. 2). Это доказывает доминирование процессов деструкции, характерных для углепластика при натурном экспонировании. Однако показатель  $\sigma_c$  после имитации 24 мес старения уменьшился только на 8 %, тогда как после реального натурального экспонирования – на 33 %. После имитационных испытаний показатель  $\sigma_b$  также уменьшается, но в меньшей пропорции, чем при реальном климатическом воздействии.

Вероятной причиной снижения эффекта старения углепластика при имитационных испытаниях является достижение более высокой степени отверждения цианэфирного связующего. Это предположение подтверждается более высоким значением температуры  $T_g = 207 \text{ }^\circ\text{C}$  после имитации 12 мес старения.

Можно утверждать, что имитационные испытания хорошо воспроизводят физико-химические превращения в полимерной матрице углепластика, выявленные при натуральных испытаниях, с тем отличием, что доотверждение в более высокой степени компенсирует деструктивные процессы.

Таким образом, при натуральных и имитационных испытаниях эффекты изменения значений КЛТР для углепластика ВТкУ-2.200/ВСЦ-14 практически одинаковы из-за воспроизведения механизма климатического старения. Деструкция, преобладающая над сшивкой при имитации 24 мес натурального климатического воздействия, снижает плотность сшивки и позволяет достичь лучшей молекулярной упаковки сетчатого полимера в стеклообразном и высокоэластическом состояниях, как это показано для углепластика в процессе экспонирования в условиях умеренно холодного климата.

### Заключения

На основании измерений температуры стеклования и пределов прочности при сжатии и изгибе углепластика на основе цианэфирного связующего ВТкУ-2.200/ВСЦ-14 получены доказательства доотверждения связующего при 3–12 мес экспонирования материала в условиях умеренно холодного климата. При продолжении экспонирования до 24 мес преобладающим эффектом является деструкция связующего.

Сочетание натурального экспонирования и термоциклов, имитирующих взлет и посадку самолета, существенно усиливает старение углепластика из-за скачков внутренних напряжений и образования микротрещин.

Климатические имитационные лабораторные испытания хорошо воспроизводят физико-химические превращения в полимерной матрице углепластика, выявленные при натуральных испытаниях, и обеспечивают более глубокое доотверждение связующего.

Коэффициент линейного теплового расширения исследованного углепластика в направлении, перпендикулярном плоскости армирования, чувствителен к физико-химическим и структурным превращениям, возникающим при климатических воздействиях на этот материал. Причинами уменьшения значений КЛТР в стеклообразном состоянии связующего и при температуре  $T > T_g$  в первые месяцы экспонирования являются структурная релаксация и доотверждение связующего, сопровождающееся возрастанием температуры стеклования и густоты шивки.

Возрастание значений КЛТР при продолжении экспонирования вызвано деструкцией, преобладающей над шивкой, которая снижает температуру стеклования, густоту пространственной сетки и позволяет достичь лучшей молекулярной упаковки сетчатого полимера в стеклообразном и высокоэластическом состояниях.

Снижение значений КЛТР в стеклообразном состоянии связующего при сочетании климатического экспонирования и термоциклов обусловлено образованием микротрещин под воздействием многократных скачков внутренних напряжений.

Анализ изменения значений КЛТР дает дополнительную информацию для выявления механизмов климатического старения углепластиков.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и ННФИ в рамках научного проекта № 20-53-56009.*

*Работа выполнена при поддержке ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.*

### Список источников

1. 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.
2. Irving P., Soutis C. *Polymer composites in the aerospace industry* // *Polymer Composites in the Aerospace Industry*. 2nd ed. Woodhead Publishing, 2019. 688 p.
3. Charitidis P.J. Criteria for the selection of carbon fiber composite materials for fighter aircraft // *Advances in Materials Science and Engineering: An International Journal (MSEJ)*. 2018. Vol. 5. No. 2/3/4. P. 1–13.
4. Shetty K., Bojja R., Srihari S. Effect of hygrothermal aging on the mechanical properties of IMA/M21E aircraft-grade CFRP composite // *Advanced Composites Letters*. 2020. Vol. 29. P. 1–9.
5. Iijima N., Katogi H., Takemura K. Effect of Thermal Cycling after Water Absorption on Flexural Property of CFRP // *Advanced Materials Research*. 2015. Vol. 1110. P. 19–22.
6. Cinquin J., Medda B. Influence of laminate thickness on composite durability for long term utilisation at intermediate temperature (100–150 °C) // *Composites Science and Technology*. 2009. Vol. 69. No. 9. P. 1432–1436.

7. Jedidi J., Jacquemin F., Vautrin A. Accelerated hydrothermal cyclical tests for carbon/epoxy laminates // *Composites. Part A*. 2006. Vol. 37. P. 636–645.
8. Kumar B.G., Singh R.P., Nakamura T. Degradation of Carbon Fiber-Reinforced Epoxy Composites by Ultraviolet Radiation and Condensation // *Journal of Composite Materials*. 2002. Vol. 36. No. 24. P. 2713–2733.
9. Каблов Е.Н., Старцев О.В., Деев И.С., Никишин Е.Ф. Свойства полимерных композиционных материалов после воздействия открытого космоса на околоземных орбитах // *Все материалы. Энциклопедический справочник*. 2012. № 10. С. 2–9.
10. Старцев О.В., Никишин Е.Ф. Старение полимерных композитных материалов в условиях открытого космоса // *Механика композитных материалов*. 1993. № 4. С. 457–467.
11. Dexter H.B. Long-term environmental effects and flight service evaluation of composite materials. NASA Technical Report TM-89067, 1987. 188 p.
12. Startsev O.V., Mashinskaya G.P., Yartsev V.A. Molecular mobility and relaxation processes in an epoxy matrix. 2. Effects of weathering in humid subtropical climate // *Mechanics of Composite Materials*. 1985. Vol. 20. No. 4. P. 406–409.
13. Tian W., Hodgkin J. Long-term aging in a commercial aerospace composite sample: Chemical and physical changes // *Journal of Applied Polymer Science*. 2010. Vol. 115. No. 5. P. 2981–2985.
14. Кириллов В.Н., Ефимов В.А., Шведкова А.К. Влияние климатических факторов и механического нагружения на свойства углепластика на эпоксидном связующем // *Пластические массы*. 2012. № 2. С. 3–7.
15. Kafodya I., Xian G., Li H. Durability study of pultruded CFRP plates immersed in water and seawater under sustained bending: Water uptake and effects on the mechanical properties // *Composites. Part B: Engineering*. 2015. Vol. 70. P. 138–148.
16. Старцев О.В., Лебедев М.П., Блазнов А.Н. Старение полимерных композиционных материалов в нагруженном состоянии (окончание) // *Все материалы. Энциклопедический справочник*. 2020. № 11. С. 2–12.
17. Kablov E.N., Startsev O.V., Krotov A.S., Kirillov V.N. Climatic aging of composite aviation materials: 3. Significant aging factors // *Russian Metallurgy (Metally)*. 2012. No. 4. P. 323–329.
18. Старцев О.В., Медведев И.М., Курс М.Г. Твердость как индикатор коррозии алюминиевых сплавов в морских условиях // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. № 3. С. 16–19.
19. Мухаметов Р.Р., Петрова А.П. Термореактивные связующие для полимерных композиционных материалов. М.: ВИАМ, 2021. 528 с.
20. Каблов Е.Н., Чурсова Л.В., Бабин А.Н., Мухаметов Р.Р., Панина Н.Н. Разработки ФГУП «ВИАМ» в области расплавных связующих для полимерных композиционных материалов // *Полимерные материалы и технологии*. 2016. Т. 2. № 2. С. 37–42.
21. Мишуров К.С., Павловский К.А., Имаметдинов Э.Ш. Влияние внешней среды на свойства углепластика ВКУ-27Л // *Труды ВИАМ*. 2018. № 3 (63). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 10.10.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-3-60-67.
22. Перов Н.С., Старцев В.О., Чуцкова Е.Ю., Гуляев А.И., Абрамов Д.В. Свойства углепластика на основе полициануратного связующего после экспозиции в различных естественных и искусственных средах // *Материаловедение*. 2017. № 2. С. 3–9.
23. Славин А.В., Старцев О.В. Свойства авиационных стеклопластиков и углепластиков на ранней стадии климатического воздействия // *Труды ВИАМ*. 2018. № 9 (69). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 10.10.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-9-71-82.
24. 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: 10.10.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-5-114-126.
25. Startsev O.V., Perepechko I.I. Molecular mobility and relaxation in an epoxy matrix. 1. Influence of the reinforcing filler // *Mechanics of Composite Materials*. 1984. Vol. 20. No. 3. P. 271–274.
26. Старцев В.О., Николаев Е.В., Варданян А.М., Нечаев А.А. Влияние климатических воздействий на внутренние напряжения наномодифицированного цианэфирного углепластика // *Труды ВИАМ*. 2021. № 8 (102). Ст. 12. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 10.10.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-8-104-112.

27. Старцев О.В., Курс И.С., Деев И.С., Никишин Е.Ф. Термическое расширение углепластика КМУ-4л после 12 лет экспонирования в условиях открытого космоса // Вопросы материаловедения. 2013. № 4 (76). С. 77–85.
28. Лебедев М.П., Старцев О.В., Петров М.Г., Копырин М.М. Образование микротрещин при климатическом старении полимерных композиционных материалов // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2022. № 4. С. 2–11.
29. Сидорина А.И., Сафронов А.М., Куцевич К.Е., Клименко О.Н. Углеродные ткани для изделий авиационной техники // Труды ВИАМ. 2020. № 12 (94). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 10.10.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-12-47-58.
30. Каблов Е.Н., Старцев В.О., Иноземцев А.А. Влагонасыщение конструктивно-подобных элементов из полимерных композиционных материалов в открытых климатических условиях с наложением термоциклов // Авиационные материалы и технологии. 2017. № 2 (47). С. 56–68. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-2-56-68.
31. Crossman F.W., Mauri R.E., Warren W.J. Hygrothermal damage mechanisms in graphite-epoxy composites // NASA Contractor Reports. 1979. No. 3189. 157 p.
32. Asai S., Goto K., Yoneyama S., Arikawa S., Kobayashi S. Effect of space environment on thermal and mechanical properties of CFRP // ICCM International Conferences on Composite Materials. 2015. Vol. 2015. Art. 43-16-2.
33. Herakovich C.T., Hyer M.W. Damage-induced property changes in composites subjected to cyclic thermal loading // Engineering Fracture Mechanics. 1986. Vol. 25. No. 5–6. P. 779–791.
34. Lafarie-Frenot M., Rouquie S. Influence of oxidative environments on damage in c/epoxy laminates subjected to thermal cycling // Composites Science and Technology. 2004. Vol. 64. No. 10–11. P. 1725–1735.
35. Bowles D.E., Tompkins S.S. Prediction of Coefficients of Thermal Expansion for Unidirectional Composites // Journal of Composite Materials. 1989. Vol. 23. No. 4. P. 370–388.
36. Rogers K.F., Kingston-Lee D.M., Phillips L.N. et al. The thermal expansion of carbon-fibre reinforced plastics // Journal of Materials Science. 1981. Vol. 16. No. 10. P. 2803–2818.
37. 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: 10.10.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-5-11-11.
38. Startsev O.V., Vapirov Y.M., Lebedev M.P., Kychkin A.K. Comparison of Glass-Transition Temperatures for Epoxy Polymers Obtained by Methods of Thermal Analysis // Mechanics of Composite Materials. 2020. Vol. 56. No. 2. P. 227–240.
39. Евдокимов А.А., Петрова А.П., Павловский К.А., Гуляев И.Н. Влияние климатического старения на свойства ПКМ на основе эпоксивинилэфирного связующего // Труды ВИАМ. 2021. № 3 (97). Ст. 12. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 10.10.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-3-128-136.
40. Kong E.S.-W. Physical aging in epoxy matrices and composites // Epoxy Resins and Composites. Berlin, 1986. P. 125–171.
41. Inamdar A., Yang Y.H., Prisacaru A. et al. High temperature aging of epoxy-based molding compound and its effect on mechanical behavior of molded electronic package // Polymer Degradation and Stability. 2021. Vol. 188. Art. 109572.
42. Ogata M., Kinjo N., Kawata T. Effects of crosslinking on physical properties of phenol-formaldehyde novolac cured epoxy resins // Journal of Applied Polymer Science. 1993. Vol. 48. No. 4. P. 583–601.
43. Хамидулин О.Л., Мадиярова Г.И., Резвых А.В. и др. Сравнительный анализ термического расширения и теплоемкости полимеров на основе ряда эпоксиноволачных смол в широком диапазоне температур // Вестник технологического университета. 2021. Т. 24. С. 40–44.
44. Startsev O.V., Krotov A.S., Golub P.D. Effect of climatic and radiation ageing on properties of VPS-7 glass fibre reinforced epoxy composite // Polymer Degradation and Stability. 1999. Vol. 63. No. 3. P. 353–358.

45. Мараховский П.С., Мальцева Е.Ю., Баринов Д.Я., Зуев А.В., Смирнов М.В. Опыт измерения температурного коэффициента линейного расширения комбинированных шнуров из органических и стеклянных нитей // *Авиационные материалы и технологии*. 2019. № 1 (54). С. 82–87. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-1-82-87.
46. Park S.Y., Choi W.J., Choi C.H., Choi H.S. An experimental study into aging unidirectional carbon fiber epoxy composite under thermal cycling and moisture absorption // *Composite Structures*. 2019. Vol. 207. P. 81–92.
47. Kablov E.N., Startsev V.O. The Influence of Internal Stresses on the Aging of Polymer Composite Materials: a Review // *Mechanics of Composite Materials*. 2021. Vol. 57. No. 5. P. 565–576.
48. Shi Z., Zou C., Zhou F., Zhao J. Analysis of the Mechanical Properties and Damage Mechanism of Carbon Fiber/Epoxy Composites under UV Aging // *Materials*. 2022. Vol. 15. No. 8. P. 2919.
49. Каблов Е.Н., Старцев В.О. Измерение и прогнозирование температуры образцов материалов при экспонировании в различных климатических зонах // *Авиационные материалы и технологии*. 2020. № 4 (61). С. 47–58. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-4-47-58.

### References

1. 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). *Авиационные материалы и технологии*, 2018, no. 2 (51), pp. 47–58. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-2-47-58.
2. Irving P., Soutis C. Polymer composites in the aerospace industry. *Polymer Composites in the Aerospace Industry*. 2nd ed. Woodhead Publishing, 2019, 688 p.
3. Charitidis P.J. Criteria for the selection of carbon fiber composite materials for fighter aircraft. *Advances in Materials Science and Engineering: An International Journal (MSEJ)*, 2018, vol. 5, no. 2/3/4, pp. 1–13.
4. Shetty K., Bojja R., Srihari S. Effect of hygrothermal aging on the mechanical properties of IMA/M21E aircraft-grade CFRP composite. *Advanced Composites Letters*, 2020, vol. 29, pp. 1–9.
5. Iijima N., Katogi H., Takemura K. Effect of Thermal Cycling after Water Absorption on Flexural Property of CFRP. *Advanced Materials Research*, 2015, vol. 1110, pp. 19–22.
6. Cinquin J., Medda B. Influence of laminate thickness on composite durability for long term utilisation at intermediate temperature (100–150 °C). *Composites Science and Technology*, 2009, vol. 69, no. 9, pp. 1432–1436.
7. Jedidi J., Jacquemin F., Vautrin A. Accelerated hydrothermal cyclical tests for carbon/epoxy laminates. *Composites. Part A*, 2006, vol. 37, pp. 636–645.
8. Kumar B.G., Singh R.P., Nakamura T. Degradation of Carbon Fiber-Reinforced Epoxy Composites by Ultraviolet Radiation and Condensation. *Journal of Composite Materials*, 2002, vol. 36, no. 24, pp. 2713–2733.
9. Kablov E.N., Startsev O.V., Deev I.S., Nikishin E.F. Properties of polymer composite materials after exposure to open space in near-Earth orbits. *Vse materialy. Entsiklopedicheskiy spravochnik*, 2012, no. 10, pp. 2–9.
10. Startsev O.V., Nikishin E.F. Aging of polymer composite materials in open space. *Mekhanika kompozitnykh materialov*, 1993, no. 4, pp. 457–467.
11. Dexter H.B. Long-term environmental effects and flight service evaluation of composite materials. *NASA Technical Report TM-89067*, 1987, 188 p.
12. Startsev O.V., Mashinskaya G.P., Yartsev V.A. Molecular mobility and relaxation processes in an epoxy matrix. 2. Effects of weathering in humid subtropical climate. *Mechanics of Composite Materials*, 1985, vol. 20, no. 4, pp. 406–409.
13. Tian W., Hodgkin J. Long-term aging in a commercial aerospace composite sample: Chemical and physical changes. *Journal of Applied Polymer Science*, 2010, vol. 115, no. 5, pp. 2981–2985.
14. Kirillov V.N., Efimov V.A., Shvedkova A.K. Influence of climatic factors and mechanical loading on the properties of carbon fiber reinforced plastic with epoxy binder. *Plasticheskiye massy*, 2012, no. 2, pp. 3–7.
15. Kafodya I., Xian G., Li H. Durability study of pultruded CFRP plates immersed in water and seawater under sustained bending: Water uptake and effects on the mechanical properties. *Composites. Part B: Engineering*, 2015, vol. 70, pp. 138–148.

16. Startsev O.V., Lebedev M.P., Blaznov A.N. Aging of polymer composite materials in a loaded state (end). *Vse materialy. Entsiklopedicheskiy spravochnik*, 2020, no. 11, pp. 2–12.
17. Kablov E.N., Startsev O.V., Krotov A.S., Kirillov V.N. Climatic aging of composite aviation materials: 3. Significant aging factors. *Russian Metallurgy (Metally)*, 2012, no. 4, pp. 323–329.
18. Startsev O.V., Medvedev I.M., Kurs M.G. Hardness as the indicator of corrosion of aluminum alloys in sea conditions. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2012, no. 3, pp. 16–19.
19. Mukhametov R.R., Petrova A.P. *Thermosetting binders for polymeric composite materials*. Moscow: VIAM, 2021, 528 p.
20. Kablov E.N., Chursova L.V., Babin A.N., Mukhametov R.R., Panina N.N. Developments of FSUE "VIAM" in the field of melt binders for polymer composite materials. *Polimernye materialy i tehnologii*, 2016, vol. 2, no. 2, pp. 37–42.
21. Mishurov K.S., Pavlovskiy K.A., Imametdinov E.Sh. fiber reinforced plastic) VKU-27L. *Trudy VIAM*, 2018, no. 3 (63), paper no. 07. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: October 10, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-3-60-67.
22. Perov N.S., Startsev V.O., Chutskova E.Yu., Gulyaev A.I., Abramov D.V. Properties of carbon plastic based on polycyanurate binder after exposure to various natural and artificial environments. *Materialovedenie*, 2017, no. 2, pp. 3–9.
23. Slavin A.V., Startsev O.V. Properties of aircraft glass- and carbonfibers reinforced plastics at the early stage of natural weathering. *Trudy VIAM*, 2018, no. 9 (69), paper no. 8. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: October 10, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-9-71-82.
24. Startsev V.O., Slavin A.V. Carbon and glass reinforced polymer based on solvent-free 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: October 10, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-5-114-126.
25. Startsev O.V., Perepechko I.I. Molecular mobility and relaxation in an epoxy matrix. 1. Influence of the reinforcing filler. *Mechanics of Composite Materials*, 1984, vol. 20, no. 3, pp. 271–274.
26. Startsev V.O., Nikolaev E.V., Vardanyan A.M., Nechaev A.A. The influence of climatic factors on residual stresses in nanomodified cyanate ester-based CFRP. *Trudy VIAM*, 2021, no.8 (102), paper no. 12. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: October 10, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-8-104-112.
27. Startsev O.V., Kurs I.S., Deev I.S., Nikishin E.F. Thermal expansion of KМУ-4L carbon fiber after 12 years of exposure in outer space. *Voprosy materialovedeniya*, 2013, no. 4 (76), pp. 77–85.
28. Lebedev M.P., Startsev O.V., Petrov M.G., Kopyrin M.M. Formation of microcracks during climatic aging of polymer composite materials. *Vse materialy. Entsiklopedicheskiy spravochnik*, 2022, no. 4, pp. 2–11.
29. Sidorina A.I., Safronov A.M., Kutsevich K.E., Klimenko O.N. Carbon fabrics for aircraft products. *Trudy VIAM*, 2020, no. 12 (94), paper no. 05. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: October 10, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-12-47-58.
30. Kablov E.N., Startsev V.O., Inozemtsev A.A. The moisture absorption of structurally similar samples from polymer composite materials in open climatic conditions with application of thermal spikes. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2017, no. 2 (47), pp. 56–68. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-2-56-68.
31. Crossman F.W., Mauri R.E., Warren W.J. Hygrothermal damage mechanisms in graphite-epoxy composites. *NASA Contractor Reports*, 1979, no. 3189. 157 p.
32. Asai S., Goto K., Yoneyama S., Arikawa S., Kobayashi S. Effect of space environment on thermal and mechanical properties of CFRP. *ICCM International Conferences on Composite Materials*, 2015, vol. 2015, art. 43-16-2.
33. Herakovich C.T., Hyer M.W. Damage-induced property changes in composites subjected to cyclic thermal loading. *Engineering Fracture Mechanics*, 1986, vol. 25, no. 5–6, pp. 779–791.
34. Lafarie-Frenot M., Rouquie S. Influence of oxidative environments on damage in c/epoxy laminates subjected to thermal cycling. *Composites Science and Technology*, 2004, vol. 64, no. 10–11, pp. 1725–1735.
35. Bowles D.E., Tompkins S.S. Prediction of Coefficients of Thermal Expansion for Unidirectional Composites. *Journal of Composite Materials*, 1989, vol. 23, no. 4, pp. 370–388.
36. Rogers K.F., Kingston-Lee D.M., Phillips L.N. et al. The thermal expansion of carbon-fibre reinforced plastics. *Journal of Materials Science*, 1981, vol. 16, no. 10, pp. 2803–2818.

37. 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: October 10, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-5-11-11.
38. Startsev O.V., Vapirov Y.M., Lebedev M.P., Kychkin A.K. Comparison of Glass-Transition Temperatures for Epoxy Polymers Obtained by Methods of Thermal Analysis. *Mechanics of Composite Materials*, 2020, vol. 56, no. 2, pp. 227–240.
39. Evdokimov A.A., Petrova A.P., Pavlovskiy K.A., Gulyaev I.N. The influence of climatic ageing on the properties of PCM-based epoxy resin systems. *Trudy VIAM*, 2021, no. 3 (97), paper no. 12. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: October 10, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-3-128-136.
40. Kong E.S.-W. Physical aging in epoxy matrices and composites. *Epoxy Resins and Composites*. Berlin, 1986, pp. 125–171.
41. Inamdar A., Yang Y.H., Prisacaru A. et al. High temperature aging of epoxy-based molding compound and its effect on mechanical behavior of molded electronic package. *Polymer Degradation and Stability*, 2021, vol. 188, art. 109572.
42. Ogata M., Kinjo N., Kawata T. Effects of crosslinking on physical properties of phenol-formaldehyde novolac cured epoxy resins. *Journal of Applied Polymer Science*, 1993, vol. 48, no. 4, pp. 583–601.
43. Khamidulin O.L., Madiyarova G.I., Rezvykh A.V. et al. Comparative analysis of thermal expansion and heat capacity of polymers based on a number of epoxy novolac resins in a wide temperature range. *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta*, 2021, vol. 24, pp. 40–44.
44. Startsev O.V., Krotov A.S., Golub P.D. Effect of climatic and radiation ageing on properties of VPS-7 glass fibre reinforced epoxy composite. *Polymer Degradation and Stability*, 1999, vol. 63, no. 3, pp. 353–358.
45. Marahovskiy P.S., Maltceva E.Yu., Barinov D.Ya., Zuev A.V., Smirnov M.V. Experience in measuring the thermal linear expansion coefficient of combined cords using organic and glass fibers. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2019, no. 1 (54), pp. 82–87. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-1-82-87.
46. Park S.Y., Choi W.J., Choi C.H., Choi H.S. An experimental study into aging unidirectional carbon fiber epoxy composite under thermal cycling and moisture absorption. *Composite Structures*, 2019, vol. 207, pp. 81–92.
47. Kablov E.N., Startsev V.O. The Influence of Internal Stresses on the Aging of Polymer Composite Materials: a Review. *Mechanics of Composite Materials*, 2021, vol. 57, no. 5, pp. 565–576.
48. Shi Z., Zou C., Zhou F., Zhao J. Analysis of the Mechanical Properties and Damage Mechanism of Carbon Fiber/Epoxy Composites under UV Aging. *Materials*, 2022, vol. 15, no. 8, p. 2919.
49. Kablov E.N., Startsev V.O. Measurement and forecasting of materials samples' temperature during weathering in different climatic zones. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 4 (61), pp. 47–58. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-4-47-58.

#### Информация об авторах

**Валерий Олегович Старцев**, начальник лаборатории, д.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Арутюн Мигранович Варданян**, инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

#### Information about the authors

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

**Arutyun M. Vardanyan**, Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

Статья поступила в редакцию 14.10.2022; одобрена и принята к публикации после рецензирования 18.10.2022.  
The article was submitted 14.10.2022; approved and accepted for publication after reviewing 14.10.2022.