

Научная статья

УДК 678.019.3

DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-4-68-84

ВЛИЯНИЕ СОРБИРОВАННОЙ ВЛАГИ НА ПРОЧНОСТЬ И ДОЛГОВЕЧНОСТЬ УГЛЕПЛАСТИКА

О.В. Старцев¹, Е.В. Двирная¹, Г.В. Корниенко¹, М.Г. Петров²

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

²Федеральное автономное учреждение «Сибирский научно-исследовательский институт авиации им. С. А. Чаплыгина», Новосибирск, Россия; sibnia@sibnia.ru

Аннотация. Исследовано изменение долговечности углепластика ВКУ-39/ВТКУ-2.200 в процессе сорбции влаги. Для этого для образцов в высушенном состоянии и на разных этапах увлажнения проведены испытания на межслойный сдвиг методом короткой балки при скоростях нагружения, отличающихся на 3–4 порядка, циклические испытания на растяжение-сжатие с нарастающей амплитудой нагружения, а также динамический механический анализ. В результате исследования показано, что прочностные свойства углепластика, содержащего разное количество влаги, подчиняются принципу температурно-влажностной аналогии и линейно снижаются с увеличением влагосодержания.

Ключевые слова: углепластик, долговечность, параметр прочности, влагосодержание, температура стеклования

Для цитирования: Старцев О.В., Двирная Е.В., Корниенко Г.В., Петров М.Г. Влияние сорбированной влаги на прочность и долговечность углепластика // Труды ВИАМ. 2026. № 4 (158). С. 68–84. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-4-68-84.

Scientific article

THE EFFECT OF MOISTURE ON THE STRENGTH AND DURABILITY OF CARBON FIBER REINFORCED PLASTIC

O.V. Startsev¹, E.V. Dvirnaya¹, G.V. Kornienko¹, M.G. Petrov²

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

²S.A. CHAPLYGIN SIBERIAN RESEARCH INSTITUTE OF AVIATION, Novosibirsk, Russia; sibnia@sibnia.ru

Abstract. This paper presents studies on the change in the durability of carbon fiber reinforced plastic during moisture sorption. For this purpose, at different stages of material moistening and in the dried state of it, short beam shear tests at loading rates differing by 3–4 orders of magnitude, cyclic tension-compression tests with increasing loading amplitude and a dynamic mechanical analysis were carried out. The study shows that the strength properties and the glass transition temperature of the carbon fiber reinforced polymer with different moisture content conform to the temperature-humidity analogy and ramp-down with the increase of moisture content.

Keywords: carbon fiber reinforced plastic, durability, strength parameter, moisture content, glass transition temperature

For citation: Startsev O.V., Dvirnaya E.V., Kornienko G.V., Petrov M.G. The effect of moisture on the strength and durability of carbon fiber reinforced plastic. *Trudy VIAM*, 2026, no. 4 (158), pp. 68–84. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-4-68-84.

Введение

В ряду полимерных композиционных материалов (ПКМ), разработанных в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, ведущее место занимают углепластики [1]. Эти материалы широко используются в различных элементах авиационной техники, обеспечивая им сочетание прочности и устойчивости к условиям эксплуатации [2]. Наиболее перспективными материалами этого класса являются углепластик ВКУ-39/ВТкУ-2.200 и его аналоги с использованием альтернативных наполнителей с полимерной матрицей на основе расплавленного эпоксидного связующего ВСЭ-1212 отечественной разработки [3].

Для расширенного использования углепластика ВКУ-39/ВТкУ-2.200 в авиационных элементах внешнего контура требуются детальные сведения о его долговечности и стойкости к старению. Некоторые результаты испытаний, полученные за последние 3–5 лет [4], представлены в табл. 1. На основе этих данных можно получить представление о коэффициентах сохранения механических показателей $k_R = R/R_0$, где R и R_0 – пределы прочности при растяжении (σ_t), сжатии (σ_c), изгибе (σ_b) и сдвиге (σ_s), измеренные после выдержки образцов в климатических условиях и в исходном состоянии соответственно.

Таблица 1

Влияние условий климатических испытаний на изменение прочностных показателей углепластика ВКУ-39/ВТкУ-2.200

Условия испытаний	Показатель R	Значение показателя в исходном состоянии R_0 , МПа	Коэффициент сохранения показателя $k_R = R/R_0$	Источник литературы
3 года экспонирования в восьми климатических зонах России и в тропиках Кубы	σ_b	920	1,0–1,14	[4]
	σ_c	670	1,0–1,14	
3 года экспонирования в умеренно холодном климате (г. Москва)	σ_b	920/840	0,99/0,88	[5]
	σ_c	740/570	0,84/0,86	
3 года экспонирования в умеренно теплом климате (г. Геленджик)	σ_b	920/840	0,98/0,82	
	σ_c	740/570	0,83/9,80	
3 года экспонирования в умеренно теплом климате (г. Геленджик)	σ_b	742/646	0,92/0,85	[6]
	σ_c	682/518	0,94/0,97	
	σ_s	68/48	0,88/0,79	
3 года экспонирования в тропическом климате КНР	σ_b	735/690	0,86/0,84	
	σ_c	636/477	0,97/0,77	
	σ_s	62/45	0,98/0,76	
3 мес. выдержки при температуре 60 °С и относительной влажности 85 %	σ_b	884	0,99	[7]
	σ_c	427	0,85	

Примечание. Пределы прочности при сжатии (σ_c), изгибе (σ_b) и сдвиге (σ_s) измерены при комнатной температуре, в знаменателе указаны данные, полученные при температуре 120 °С.

По данным работы [4], после 3 лет пребывания пластин углепластика ВКУ-39/ВТкУ-2.200 в типовых климатических зонах России и тропиках Кубы показатели R остались на уровне исходных значений или даже незначительно превысили их. По-видимому, связующее ВСЭ-1212 этого углепластика было не полностью отверждено, и в климатических условиях происходила дополимеризация.

В открытых климатических условиях пределы прочности при изгибе и сжатии изменяются в большей степени, чем при растяжении [2]. Поэтому при аналогичном экспонировании в течение 3 лет в умеренно холодном и умеренно теплом климате [5] показатели σ_b и σ_c снизились на 10–20 % (табл. 1).

Для другой партии углепластика ВКУ-39/ВТкУ-2.200, экспонированной 3 года в умеренно теплом климате [6], снижение коэффициента k_R до 0,88 определено для прочностных показателей, измеренных при комнатной температуре. При температуре измерений 120 °С коэффициент k_R уменьшился до 0,79. Параллельные испытания в тропическом климате г. Ваньнинь привели к снижению k_R до 0,76 [6] (табл. 1).

Главной причиной снижения прочностных показателей углепластика является деструкция эпоксидной матрицы под действием сочетания температуры, относительной влажности и ультрафиолетовой компоненты солнечной радиации. Вторая причина заключается в проникновении воды во внутренние слои композита. Сорбированная влага пластифицирует эпоксидную матрицу и способствует ее деструкции. При сушке влага удаляется, и механические показатели частично восстанавливаются. Указанный механизм физико-химических превращений в ПКМ подробно проанализирован и обоснован в работах [5, 6].

По данным работы [7], после 3 мес. пребывания углепластика ВКУ-39/ВТкУ-2.200 при температуре 60 °С и относительной влажности 85 % предел прочности при сжатии снижается на 15 % (табл. 1).

Чувствительность углепластика ВКУ-39/ВТкУ-2.200 к влагосодержанию после 7 лет старения в умеренно теплом климате исследована по изменению модуля сдвига G в плоскости листа [8]. После сорбции 0,9 % воды показатель G снижается с 7,5 до 5,7 ГПа.

Установлено [4, 5], что в открытых климатических условиях пластины углепластика ВКУ-39/ВТкУ-2.200 накапливают 0,3–0,7 % воды. Такая умеренная гидрофильность показывает преимущество данного материала перед другими ПКМ, которые в открытых климатических условиях присоединяют 0,7–1,3 [9], 1,2–1,5 [10] и даже 2,7 % [11] влаги. Поэтому нахождение количественных соотношений между величинами прочности ПКМ и количеством содержащейся в них воды представляет большой научный и практический интерес.

Известны примеры линейного снижения механических показателей в зависимости от влагосодержания w [8, 12–14]:

$$R = R_0 - \psi_R w, \quad (1)$$

где R_0 и R – механический показатель ПКМ в исходном состоянии и при содержании влаги w ; ψ_R – коэффициент пластифицирующего воздействия влаги по показателю R .

Соотношение (1) в большинстве случаев справедливо при малом значении w , при котором молекулы воды посредством водородных связей взаимодействуют с активными группами полимерной матрицы, ослабляют межмолекулярное взаимодействие, но не активируют реакции гидролиза или дополимеризации. При дальнейшем увеличении влагосодержания, особенно при повышенных температурах, зависимость $R(w)$ становится нелинейной из-за химических и структурных превращений в терморезистивных матрицах. Для таких случаев вместо соотношения (1) используют нелинейное уравнение [15]

$$R = a(1 - e^{-b \exp(-cw)}) + d, \quad (2)$$

где a , b , c , d – эмпирические константы, значения которых не зависят от температуры влагонасыщения.

Другим вариантом представления зависимости $R(w)$, учитывающей пластификацию и гидролиз, является нелинейная модель, изложенная в работе [16].

Во всех приведенных примерах рассмотрены частные случаи изменения показателей при выбранных квазистатических схемах нагружения. Такой ограниченный набор данных не позволяет моделировать долговечность ПКМ, зависящую от влагосодержания, скорости нагружения и температуры испытаний. Перспективный подход, основанный на использовании принципа температурно-временной аналогии, проанализирован в обзоре [17]. Согласно этому принципу, существует подобие в изменении свойств полимеров и ПКМ в зависимости от температуры и скорости/частоты нагружения. Это подобие выражено эмпирическим уравнением Вильямса–Ландела–Ферри [17]:

$$\log a_T = -\frac{C_1(T-T_0)}{C_2+T-T_0}, \quad (3)$$

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 – референтная температура (обычно температура стеклования T_g); C_1 и C_2 – эмпирические константы, зависящие от конкретного материала.

Например, если при циклическом нагружении при частоте ω_1 механический показатель R при переходе от температуры T_1 до температуры T_2 изменился на ΔR , то с помощью уравнения (3) можно определить частоту нагружения ω_2 , при которой будет достигнуто то же изменение ΔR при неизменной температуре T_1 . Современный подход к нахождению констант C_1 и C_2 для эпоксидного углепластика рассмотрен в работе [18].

Результаты работ [17, 19–21] доказали, что в общем случае температурный сдвиг a_T в уравнении (3) можно заменить на температурно-влажностный сдвиг $a_{T, w}$, т. е. воздействие тепла на полимерный композит аналогично воздействию влаги и наоборот. Методика построения обобщенной кривой ползучести углепластика ИМ7/977-2 при трехточечном изгибе образцов с различным содержанием влаги в широком интервале температур обоснована в работе [22].

Принцип температурно-временной [17, 18] и температурно-влажностной [19–22] аналогии можно учитывать при исследовании влияния влаги на прочность и долговечность углепластика ВКУ-39/ВТкУ-2.200.

Для этого в данной работе выполнен обширный эксперимент на основе методического подхода, представленного в работе [23]. Цель исследования – сравнение и анализ результатов испытаний углепластика ВКУ-39/ВТкУ-2.200 с различным содержанием влаги на циклическое растяжение-сжатие с нарастающей амплитудой и межслойный сдвиг.

Материалы и методы

Для реализации запланированной программы исследований изготовлены пластины углепластика ВКУ-39/ВТкУ-2.200 на основе углеродного тканого наполнителя ВТкУ-2.200 и эпоксидного термореактивного связующего ВСЭ-1212. Свойства этого углепластика подробно охарактеризованы в работе [24].

Для проведения испытаний углепластика с разным содержанием влаги образцы выдерживали в камере с относительной влажностью $95 \pm 5\%$ при 60°C в течение 103 сут. Промежуточные съемы образцов для испытаний на межслойный сдвиг осуществляли после 3, 7, 14, 28 и 70 сут, для испытаний на растяжение-сжатие – после 3, 7, 14, 28, 56 и 100 сут, для выполнения динамического механического анализа (ДМА) –

после 1, 3, 7, 14, 28, 56 и 103 сут увлажнения. Для оценки количества влаги, содержащейся в исходных образцах, проведена сушка при 60 °С до достижения постоянной массы углепластика. Массу образцов измеряли с помощью аналитических весов с погрешностью 0,1 мг.

Предел прочности при межслойном сдвиге определяли методом короткой балки в соответствии с ГОСТ 32659–2014 (ISO 14130:1997) [25]. Для этих испытаний вырезали образцы размером 40×20×4 мм. Образец помещали на две параллельные горизонтальные опоры. Усилие прикладывали по всей ширине образца. Испытания проводили со скоростями нагружения 0,005–5 мм/мин. По аналогичной программе нагружения проведены испытания образцов в исходном состоянии при температурах 25, 60, 100 и 150 °С. Для этого предварительно образцы выдерживали 80 мин при заданной температуре испытаний (20 мин на 1 мм толщины образца). Максимальные значения касательных напряжений σ_s определены по формуле

$$\sigma_s = 3F/4bh, \quad (4)$$

где F – разрушающая или максимальная нагрузка, Н; b и h – ширина и толщина испытуемого образца, мм.

Испытания на растяжение-сжатие проводили со ступенчатым увеличением амплитуды нагружения. Образцы имели форму лопатки длиной 150 мм и шириной 25 мм с радиусом скругления 40 мм (так называемые корсетные образцы), обеспечивающим ширину рабочей части 10 мм. Частота нагружения составила 0,5 Гц при нулевом значении средних напряжений. Начиная с нагрузки, равной 12,5 МПа, на каждой ступени выполняли по четыре цикла, после чего амплитуду нагрузки увеличивали с шагом 12,5 МПа до полного разрушения образца. После достижения максимальной нагрузки при растяжении и сжатии в каждом цикле образец выдерживали в течение 0,35 с для циклов с нагрузкой <200 МПа, а затем продолжительность выдержки увеличивали на 0,25 с на каждой последующей ступени.

Мерой пластифицирующего действия влаги на углепластик ВКУ-39/ВТкУ-2.200 выбрано изменение температуры стеклования эпоксидной матрицы углепластика. С помощью термоанализатора измерен динамический модуль упругости E' и динамический модуль потерь E'' при изгибных колебаниях полосок размером 50×10 мм, вырезанных из пластин углепластика. В каждом цикле измерений использовали по три параллельных образца. Измерения проводили в интервале температур от 25 до 250 °С в потоке аргона при скорости потока 70 мл/мин, частоте 1 Гц и скорости нагрева 2 °С/мин. Измеренные зависимости $E''(T)$ позволили определить температуру стеклования T_g (по положению максимума E''), нижнюю T_{g1} и верхнюю T_{g2} границы перехода эпоксидной матрицы композита из стеклообразного в высокоэластическое состояние с точностью 0,5 °С [18]. Для этого использовали рекомендации стандарта ISO 6721-11 [26] и численные методы динамической механической спектроскопии полимеров [27].

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

Результаты и обсуждение

Определение пластифицирующего действия влаги по результатам динамического механического анализа

Пластификацию влагой углепластика ВКУ-39/ВТкУ-2.200 исследовали методом ДМА аналогично работам [4, 5]. Образцы размером 50×10 мм увлажняли при температуре 60 °С в камере с относительной влажностью 95 % в течение 103 сут. За это время

они присоединили $0,94 \pm 0,01$ % влаги. Часть образцов подвергли предварительной сушке при той же температуре. В процессе сушки удалено $0,16 \pm 0,01$ % влаги. Таким образом, максимальное содержание влаги составило $1,10 \pm 0,01$ %.

Температурные зависимости $E''(T)$ углепластика с различным содержанием влаги представлены на рис. 1. Температура стеклования T_g , определенная по положению максимума E'' , для высушенных образцов составила 195 ± 1 °С, для образцов в максимально увлажненном состоянии ($w = 1,1 \pm 0,01$ %) $T_g = 116 \pm 1$ °С, т. е. показатель снизился на 79 ± 1 °С.

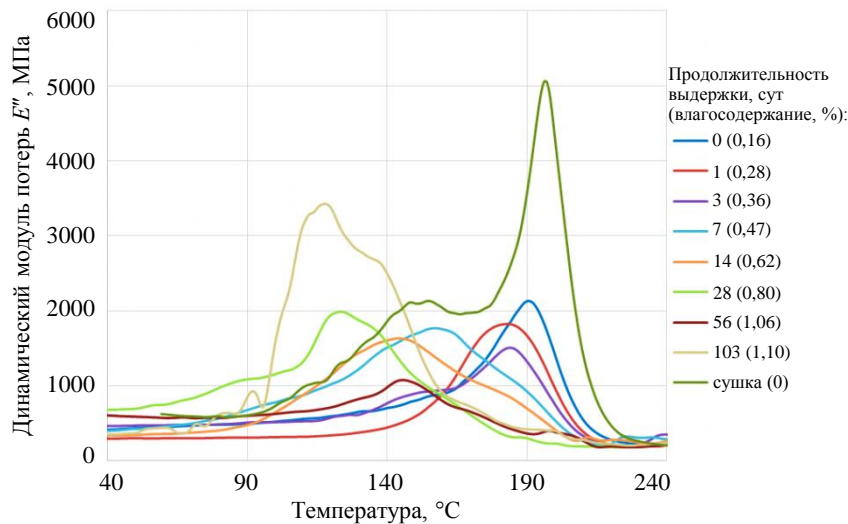


Рис. 1. Температурные зависимости динамического модуля потерь E'' углепластика ВКУ-39/ВТкУ-2.200 при различном влажностном содержании образцов

Зависимость T_g от w для всей серии выполненных ДМА-измерений представлена на рис. 2. Показано, что эта зависимость линейна и полностью соответствует уравнению (1) с коэффициентом пластифицирующего воздействия $\psi_{T_g} = 71,8 \pm 2$ °С. Влага существенно пластифицирует связующее ВСЭ-1212, что соответствует данным, полученным ранее [4, 5].

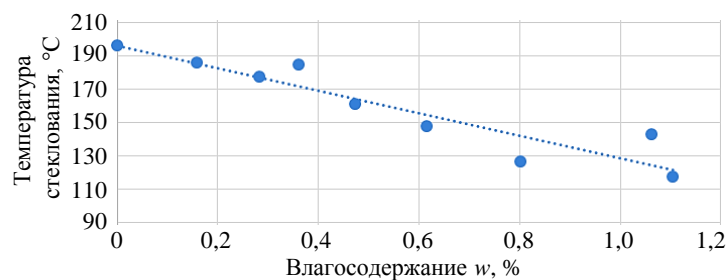


Рис. 2. Зависимость температуры стеклования T_g углепластика ВКУ-39/ВТкУ-2.200 от влажностного содержания w

Испытания на межслойный сдвиг углепластика ВКУ-39/ВТкУ-2.200 с различным влажностным содержанием

В данной статье разрушение углепластика рассмотрено с позиций кинетической концепции прочности, примененной ранее для ПКМ в работе [23]. Разрушение ПКМ зависит от напряжения при выбранной схеме нагрузки (растяжение, сжатие, сдвиг,

изгиб и др.), скорости приложения нагрузки и температуры измерений. Долговечность τ нагруженного ПКМ определяется по формуле Журкова:

$$\tau = \tau_0 \exp\left(\frac{U_0 - \gamma\sigma}{R_{mol}T}\right), \quad (5)$$

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 – действующие в материале напряжения при выбранной схеме нагружения, МПа; T – температура, °С.

При испытаниях на межслойный сдвиг в формуле (5) используются максимальные значения касательных напряжений σ_s , определенные по формуле (4).

После испытаний на межслойный сдвиг исходных образцов углепластика ВКУ-39/ВТкУ-2.200 со скоростями 0,005; 0,05; 0,5; 5 и 10 мм/мин при температурах 25, 60, 100 и 150 °С, исходя из формулы (5), вычислены значения энергии активации разрушения

$$U(\sigma_s) = U_0 - \gamma\sigma_s = R_{mol}T \ln(\tau/\tau_0). \quad (6)$$

График ее силовой зависимости (зависимости от напряжений) представлен на рис. 3.

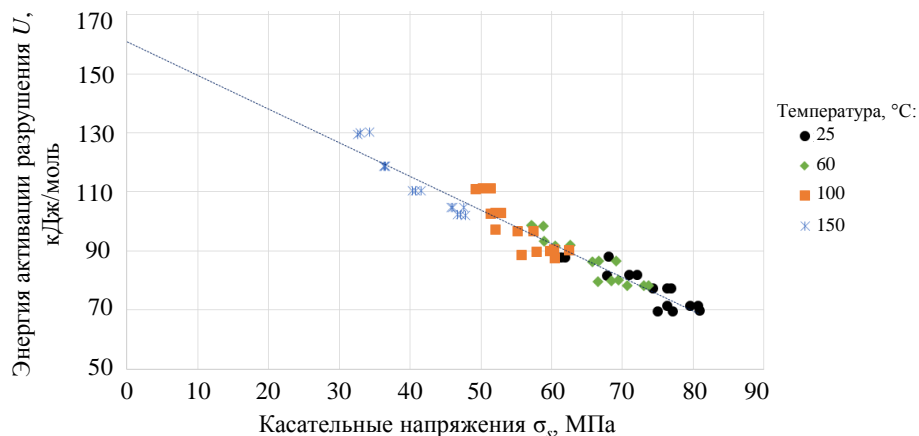


Рис. 3. Силовая зависимость энергии активации разрушения U образцов углепластика ВКУ-39/ВТкУ-2.200, испытанных на межслойный сдвиг, при различных температурах и скоростях нагружения

Линейность графика $U(\sigma_s)$ является надежным критерием применимости кинетической концепции прочности для определения долговечности при межслойном сдвиге углепластика ВКУ-39/ВТкУ-2.200 в интервале температур от 25 до 150 °С (в стеклообразном состоянии эпоксидной матрицы ВСЭ-1212, для которой $T_g = 195 \pm 1$ °С).

Следует отметить, что показатель экспоненты в уравнении Журкова (5) зависит от температуры испытаний, т. е. термоактивационный анализ по уравнению (6) является аналогом принципа температурно-временной эквивалентности, выраженного уравнением (3).

Аналогичные испытания на межслойный сдвиг выполнены для углепластика ВКУ-39/ВТкУ-2.200 после 3, 7, 14, 28 и 70 сут увлажнения. По результатам испытаний вычислены значения $U(\sigma_s)$ и построены силовые зависимости энергии активации разрушения (рис. 4).

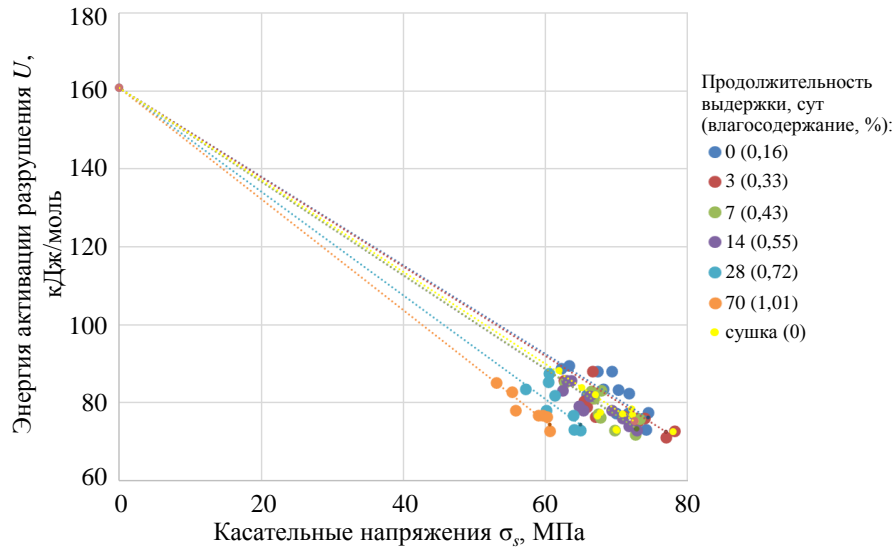


Рис. 4. Силовые зависимости энергии активации разрушения образцов углепластика ВКУ-39/ВТкУ-2.200 с разным влагосодержанием при пяти скоростях деформирования при комнатной температуре

Для количественной оценки прочности при межслойном сдвиге (табл. 2) увлажненного углепластика ВКУ-39/ВТкУ-2.200 использован параметр прочности

$$P_s = \frac{\sigma_s}{U_0 - U_w} = \frac{1}{\gamma}, \quad (7)$$

где $U_0 = 160,8$ кДж/моль – начальная энергия активации разрушения данного материала (при нулевой нагрузке); U_w – энергия активации разрушения образца с влагосодержанием w , кДж/моль.

Зависимость P_s от w оказалась линейной (рис. 5).

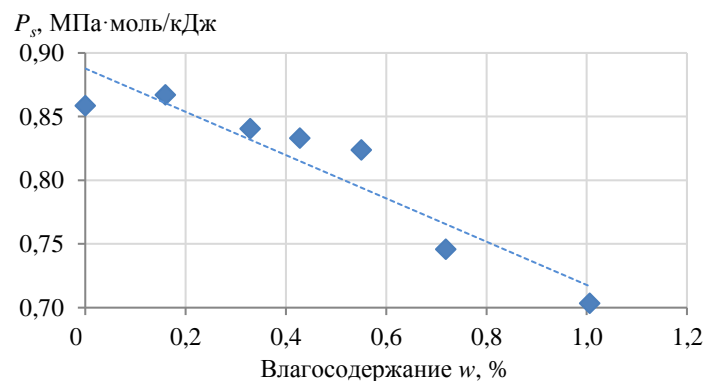


Рис. 5. Зависимость параметра прочности при межслойном сдвиге P_s углепластика ВКУ-39/ВТкУ-2.200 от влагосодержания w

Учитывая линейность зависимостей $T_g(w)$ на рис. 2 и $P_s(w)$ на рис. 5, можно утверждать, что зависимость $P_s(T_g)$ также является линейной. Это обстоятельство позволяет использовать принцип температурно-влажностной аналогии [19–21] в кинетической концепции прочности для ПКМ, содержащих влагу, и представить уравнение Журкова (5) в виде

$$\tau = \tau_0 \exp\left(\frac{U_0 - \gamma\sigma_s}{R_{mol}(T + \Delta T_g)}\right), \quad (8)$$

где $\Delta T_g = T_{g0} - T_{gw}$; T_{g0} – температура стеклования сухого образца; T_{gw} – температура стеклования образца с содержанием влаги w .

Вычисления, проведенные по уравнению (8), позволили преобразовать семейство прямых линий на рис. 4 в единую прямую линию, представленную на рис. 6.

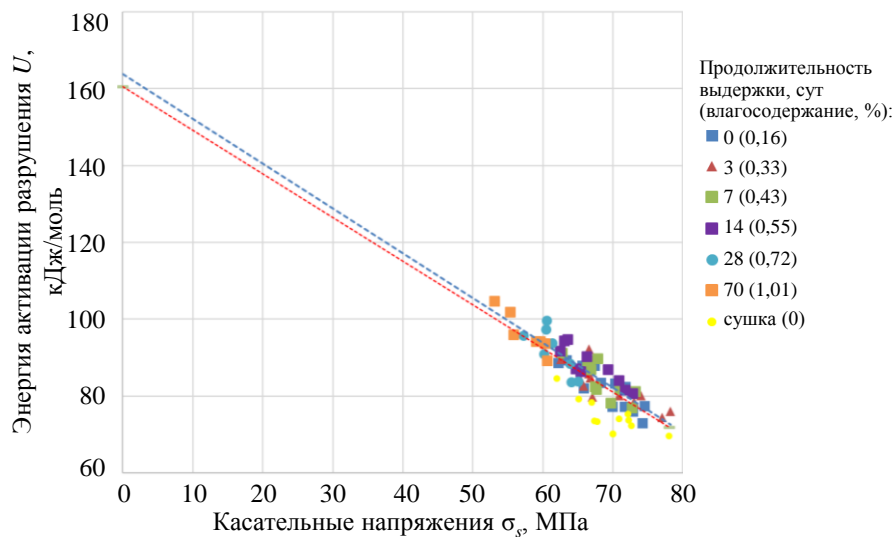


Рис. 6. Зависимость энергии активации разрушения U образцов углепластика ВКУ-39/ВТкУ-2.200 с разным влагосодержанием от касательных напряжений σ_s при межслойном сдвиге с различными скоростями нагружения. Красной пунктирной линией проведена аппроксимация с $U_0 = 160,8$ кДж/моль, синей – обозначена средняя линия для расчета по формуле (8)

Значения показателей термоактивационного анализа, определенные по формулам (5)–(8) для образцов углепластика ВКУ-39/ВТкУ-2.200 при разном содержании влаги, сгруппированы в табл. 2.

Таблица 2

Межслойная прочность и долговечность углепластика ВКУ-39/ВТкУ-2.200 с различным влагосодержанием после испытаний на межслойный сдвиг с разной скоростью нагружения

Показатели	Значения показателей при продолжительности увлажнения, сут					
	0	3	7	14	28	70
Влагосодержание w , %	0,16	0,33	0,46	0,55	0,72	1,01
Параметр прочности при межслойном сдвиге P_s , МПа-моль/кДж	0,88	0,84	0,83	0,82	0,75	0,70
Долговечность τ , годы (при температуре 298 К и нагрузке 30 МПа)	44	29	26	21	2	2

По данным работы [4], после 3 лет экспонирования в различных климатических зонах углепластик ВКУ-39/ВТкУ-2.200 присоединяет 0,6 % воды. Из данных табл. 2

следует, что при таком влагосодержании параметр прочности при межслоном сдвиге уменьшается незначительно (менее чем на 10 %), тогда как долговечность при нагрузке 30 МПа снижается на порядок. Следовательно, в открытых климатических условиях сорбированная влага незначительно уменьшает межслоевую прочность углепластика, но вызывает существенное снижение долговечности при сдвиговых нагрузках.

Возможна и другая интерпретация результатов, полученных в этом разделе. Прежде всего, следует подчеркнуть, что формула (5) отражает закон разрушения как термодинамический процесс, описываемый в терминах теории скоростей реакций [23]. Абсолютная температура T в данном выражении определяет скорость реакции разрушения и величину внутренней тепловой энергии твердого тела, за счет которой происходит разрушение. Температура стеклования (в данном случае называемая температурой размягчения) в опытах была гораздо меньше, и никакой связи с ее величиной заметить было бы невозможно. Если бы испытания проводили при температуре T_g , то получилась бы другая силовая зависимость энергии активации разрушения. Обычно энергия активации разрушения при вязком течении материала имеет постоянное значение, не зависящее от напряжений. Зависимость $\gamma(\sigma)$ свидетельствует о пластических деформациях в материале, сопровождающих процесс разрушения.

Поэтому естественной характеристикой влияния степени увлажнения на прочность является зависимость активационного объема γ от влагосодержания w . Коэффициент γ характеризует уровень внутренних напряжений, которые определяют скорость разрушения наряду с температурой. Физическое обоснование его величины дается в ссылках [8, 11] в публикации [23]. Он является количественной характеристикой структуры материала в отношении прочности в так называемых центрах разрушения, а распределение внутренних напряжений по объему материала – количественной мерой неоднородности этой структуры. Параметр прочности, вычисляемый по уравнению (7), служит лишь удобной для восприятия характеристикой различия прочностных свойств материала, зависящих от влагосодержания.

На следующем этапе сопоставлены зависимость $\gamma(w)$ и температура стеклования, имеющая подобную связь с влагосодержанием (рис. 2 и 5). Поскольку переход из стеклообразного в высокоэластичное и вязкотекучее состояния требует времени и протекает с определенной скоростью, зависимость $T_g(w)$ как термодинамический процесс представлена зависимостью обратной величины абсолютной температуры стеклования от влагосодержания. Результаты сопоставления приведены на рис. 7.

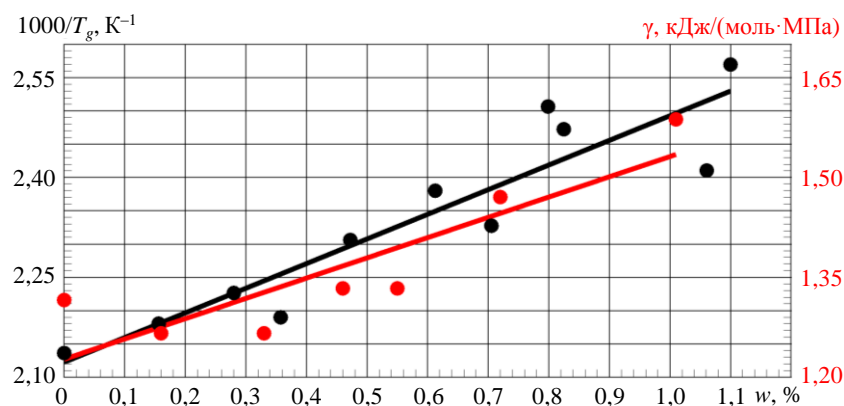


Рис. 7. Изменение обратной величины абсолютной температуры стеклования $1000/T_g$ (—) и активационного объема γ (—) при возрастании в материале влагосодержания w

Видно, что изменение данных величин в небольшом интервале влагосодержания можно также представить линейными зависимостями, которые пропорциональны друг другу. Это демонстрирует связь между ними, но не означает, что величину T_g надо подставлять в формулу (8). Коэффициент γ можно выразить через T_g , но необходимость в этом отсутствует. Кроме того, T_g зависит от напряжений, при которых находится материал. Зависимости $\gamma(w)$ вполне достаточно для описания изменений прочности углепластика по мере увеличения влагосодержания.

Использование формулы (8) приводит к необъяснимым последствиям: получаются другие величины U_0 . Если на рис. 6 они различаются незначительно, то для другого напряженно-деформированного состояния это различие необъяснимо. В этом случае активационный объем имеет совершенно другие значения (рассмотрено в следующем разделе), связанные с видом напряженно-деформированного состояния, что может приводить к каким-то иным зависимостям. Начальная энергия активации разрушения U_0 определяет энергию связи атомов в твердом теле и одинакова в различных опытах [23].

Именно изменение активационного объема γ по мере увеличения влагосодержания будет характеризовать изменение структуры материала, т. е. изменение внутренних напряжений, влияющих на скорость разрушения. Это и будет той необходимой информацией об изменениях прочностных свойств материала. Взаимосвязь прочностных свойств и температуры стеклования требует изучения на других ПКМ, причем с вариациями режимов ее определения.

Испытания на циклическое растяжение-сжатие с нарастающей амплитудой образцов углепластика ВКУ-39/ВТкУ-2.200 с различным влагосодержанием

Подобным образом, по методике работы [23], исследовано влияние влагосодержания на прочность и долговечность образцов углепластика ВКУ-39/ВТкУ-2.200 при циклическом растяжении-сжатии с нарастающей амплитудой. По результатам испытаний вычислены значения и построены силовые зависимости энергии активации разрушения $U(\sigma_t)$ от разрушающей нагрузки σ_t (рис. 8).

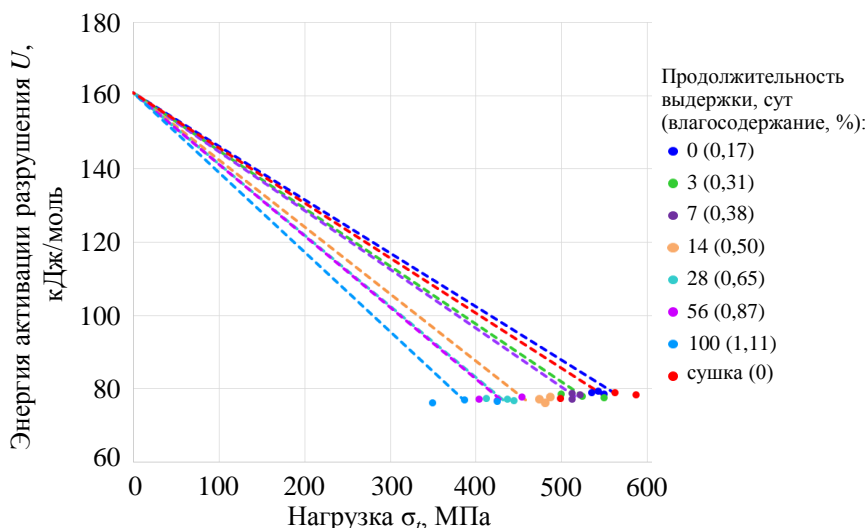


Рис. 8. Зависимости энергии активации разрушения U от нагрузки σ_t образцов углепластика ВКУ-39/ВТкУ-2.200 с разным влагосодержанием при циклическом растяжении-сжатии с нарастающей амплитудой при комнатной температуре

Результаты вычислений данных испытаний при сжатии, также проведенных по уравнению (8), привели к преобразованию прямых линий, полученных по результатам термоактивационного анализа на рис. 4, в единую линию, изображенную на рис. 9. Несмотря на высокую степень принадлежности точек для образца в нативном (высушенном) состоянии и при увлажнении от 3 до 14 дней прямой, проведенной с заданным значением U_0 , для результатов образцов после 28 дней увлажнения наблюдаются отклонения. Данное явление можно объяснить особенностями реализации нагружения, высокой флуктуации значений прочности при сжатии. Важно также отметить, что при испытаниях на межслойный сдвиг и методом ДМА образцы имели схожую форму и размеры, в то время как лопатки для испытаний на растяжение-сжатие значительно отличались от них, что в свою очередь могло привести к неоднородному распределению влаги в процессе диффузии.

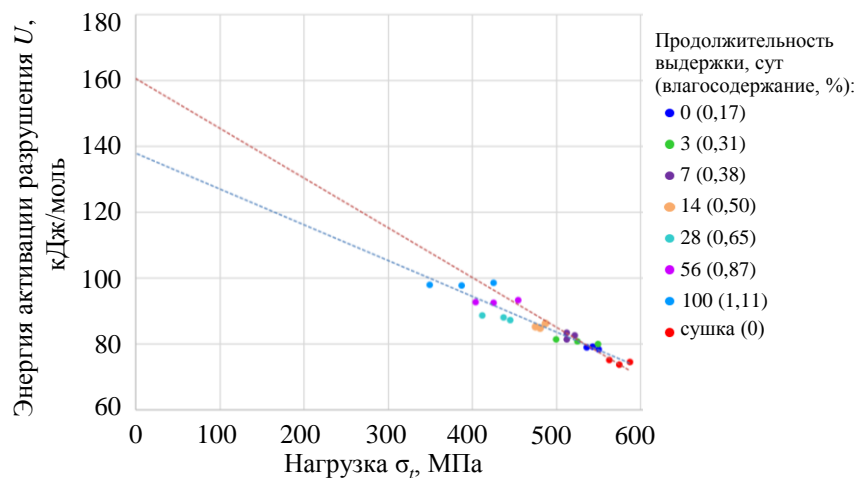


Рис. 9. Силовая зависимость энергии активации разрушения U при растяжении-сжатии образцов углепластика ВКУ-39/ВТкУ-2.200 с разным влагосодержанием. Красной пунктирной линией проведена аппроксимация с $U_0 = 160,8$ кДж/моль, синей – обозначена средняя линия для расчета по формуле (8)

Дальнейшие вычисления по формуле (7) показали, что параметр прочности при циклическом растяжении-сжатии с нарастающей амплитудой P_t линейно уменьшается с увеличением влагосодержания (рис. 10).

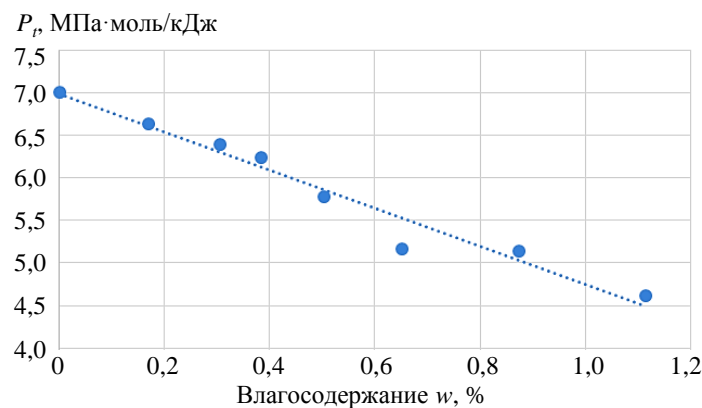


Рис. 10. Зависимость параметра прочности при циклическом растяжении-сжатии с нарастающей амплитудой P_t углепластика ВКУ-39/ВТкУ-2.200 от влагосодержания w

Из этого следует вывод, что образцы углепластика ВКУ-39/ВТкУ-2.200, содержащие влагу, в случае разрушения при циклическом растяжении-сжатии с нарастающей амплитудой также подчиняются принципу температурно-влажностной аналогии, для них справедливо уравнение (8) при замене σ_s на σ_r .

Результаты расчета прочности и долговечности для этого способа разрушения представлены в табл. 3.

Таблица 3

Прочность и долговечность углепластика ВКУ-39/ВТкУ-2.200 с разным влагосодержанием после испытаний на циклическое растяжение-сжатие с нарастающей амплитудой

Показатели	Значения показателей при продолжительности увлажнения, сут					
	0	3	7	14	28	56
Влагосодержание w , %	0,17	0,31	0,38	0,50	0,65	0,87
Параметр прочности при циклическом растяжении-сжатии с нарастающей амплитудой P_t , МПа·моль/кДж	6,7	6,3	6,3	5,9	5,2	5,0
Долговечность τ , годы (при температуре 298 К и нагрузке 200 МПа)	260	160	120	43	8	7

Параметр разрушения в образце с влагосодержанием $w = 0,87$ % по сравнению с образцом в сухом состоянии уменьшился с 6,7 до 5,0 МПа·моль/кДж (на 25 %), тогда как долговечность сократилась более чем на 2 порядка.

Заключения

Исследовано влияние воздействия влаги на прочностные свойства и долговечность углепластика авиационного назначения ВКУ-39/ВТкУ-2.200. С помощью ДМА продемонстрировано снижение температуры стеклования по мере влагонасыщения материала. Линейность изменения данной характеристики в зависимости от влагосодержания демонстрирует пластифицирующий характер действия влаги на вязкоупругое состояние материала.

Результаты термоактивационного анализа позволили оценить вклад влаги в прочность и долговечность углепластика ВКУ-39/ВТкУ-2.200. Установлено, что термодинамический параметр прочности также линейно зависит от влагосодержания и при увлажнении снижается на 20,5 и 25,4 % при межслойном сдвиге и растяжении-сжатии соответственно.

Показано, что модификация уравнения Журкова с учетом температуры стеклования позволяет привести к единому значению долговечности результаты испытаний материала в разном состоянии, что соответствует принципу температурно-влажностной эквивалентности, но требует доказательств правомерности такой интерпретации результатов. Изучение связи температуры стеклования с долговечностью материала является перспективным направлением в исследованиях свойств материалов.

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: 05.09.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-122-144.
2. 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.
3. Гуняева А.Г., Сидорина А.И., Курносоев А.О., Клименко О.Н. Полимерные композиционные материалы нового поколения на основе связующего ВСЭ-1212 и наполнителей, альтернативных наполнителям фирм Porsher Ind. и Toho Tenax // *Авиационные материалы и технологии*. 2018. № 3 (52). С. 18–26. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-3-18-26.
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: 09.09.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-8-113-128.
5. 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: 13.09.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-5-114-126.
6. 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.
7. 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). С. 100–112. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 13.09.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-5-11-11.
8. Startsev O.V., Kornienko G.V., Gladkikh A.V., Gorbovets M.A. Nondestructive measurements of shear modulus in a sheet plane upon aging of polymeric composites // *Polymer Science. Series D*. 2024. Vol. 17. P. 606–614. DOI: 10.1134/s1995421224701041.
9. Pride R.A. Environment effects of composites for aircraft // *CTOL Transport Technology: conference proceedings*. Hampton, VR, 1978. P. 239–258. URL: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19780019118> (дата обращения: 28.07.2025).
10. Collings T.A. The effect of observed climatic conditions on the moisture equilibrium level of fiber-reinforced plastics // *Composites*. 1986. Vol. 17. P. 33–41. DOI: 10.1016/0010-4361(86)90731-7.
11. Baker D.J. Ten-Year Ground Exposure of Composite Materials Used on the Bell Model 206L Helicopter Flight Service Program. NASA, 1994. URL: <https://ntrs.nasa.gov/citations/19950005944> (дата обращения: 29.07.2025).
12. Ramesh C., Arumugam V., Stanley J., Kumar V. Effects of hydrolytic aging on glass/epoxy, kevlar/epoxy, and hybrid (glass/kevlar/epoxy) composites // *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*. 2013. Vol. 2. P. 1589–1596. DOI: 10.17577/IJERTV2IS50859.
13. 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. 65. P. 2189–2199. DOI: 10.1177/00219983221091465.
14. Anderson E., Gunawan B., Nicholas J. et al. A multicontinuum theory based approach to the analysis of fiber-reinforced polymer composites with degraded stiffness and strength properties due to moisture absorption // *Journal of Marine Science and Engineering*. 2023. Vol. 11. Art. 421. DOI: 10.3390/jmse11020421.

15. Pritchard G., Speake S.D. The use of water absorption kinetic data to predict laminate property changes // *Composites*. 1987. Vol. 18. P. 227–232. DOI: 10.1590/0104-1428.2106.
16. Nandagopal R.A., Boay C.G., Narasimalu S. An empirical model to predict the strength degradation of the hygrothermal aged CFRP material // *Composite Structures*. 2020. Vol. 236. Art. 111876.
17. Urzhumtsev Yu.S. Time-temperature superposition. Review // *Mechanics of Composite Materials*. 1976. Vol. 11. P. 57–72. DOI: 10.1007/bf00855426.
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. Maksimov R.D., Sokolov E.A., Mochalov V.P. Effect of temperature and moisture on the creep of polymeric materials. 1. One-dimensional extension under stationary temperature-moisture conditions // *Polymer Mechanics*. 1975. Vol. 11. P. 334–339. DOI: 10.1007/BF00863977.
20. Maksimov R.D., Sokolov E.A., Mochalov V.P. Effect of temperature and humidity on the creep of polymer materials. 2. Uniaxial elongation under variable temperature-humidity conditions // *Polymer Mechanics*. 1975. Vol. 11. P. 834–839. DOI: 10.1007/BF00857602.
21. Maksimov R.D., Mochalov V.P., Sokolov E.A. Influence of temperature and humidity on the creep of polymer materials. 3. Shear, and shear and tensile strain acting together // *Polymer Mechanics*. 1976. Vol. 12. P. 562–567. DOI: 10.1007/BF00857006.
22. Hafiz T.A. Life prediction of carbon fiber reinforced polymers using time temperature shift factor // *International Journal of Engineering Transactions A: Basics*. 2020. Vol. 33. P. 1340–1346. DOI: 10.5829/ije.2020.33.07a.21.
23. 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.
24. 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: 15.09.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-6-49-57.
25. 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.
26. ISO 6721-11. Plastics – Determination of dynamic mechanical properties – Part 11: Glass transition temperature. ISO, 2012. 22 p.
27. Исупов В.В., Старцев О.В. Численные методы в динамической механической спектроскопии полимеров // Тез. докл. Междунар. конф. «Математические модели и численные методы механики сплошных сред» / под ред. Ю.И. Шокина. Новосибирск, 1996. С. 293–294.

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: September 05, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-122-144.
2. Kablov E.N., Startsev V.O. Systematical analysis of the climatic influence on mechanical properties of the polymer composite materials based on domestic and foreign sources (review). *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2018, no. 2 (51), pp. 47–58. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-2-47-58.
3. Gunyaeva A.G., Sidorina A.I., Kurnosov A.O., Klimenko O.N. Polymeric composite materials of new generation on the basis of binder VSE-1212 and the filling agents alternative to ones of Porcher Ind. and Toho Tenax. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2018, no. 3 (52), pp. 18–26. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-3-18-26.
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 09, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-8-113-128.

5. 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: September 13, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-5-114-126.
6. 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.
7. 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), pp. 100–112. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: September 13, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-5-11-11.
8. Startsev O.V., Kornienko G.V., Gladkikh A.V., Gorbovets M.A. Nondestructive measurements of shear modulus in a sheet plane upon aging of polymeric composites. *Polymer Science. Series D*, 2024, vol. 17, pp. 606–614. DOI: 10.1134/s1995421224701041.
9. Pride R.A. Environment effects of composites for aircraft. *CTOL Transport Technology: conference proceedings*. Hampton, VR, 1978, pp. 239–258. Available at: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19780019118> (accessed: July 28, 2025).
10. Collings T.A. The effect of observed climatic conditions on the moisture equilibrium level of fiber-reinforced plastics. *Composites*, 1986, vol. 17, pp. 33–41. DOI: 10.1016/0010-4361(86)90731-7.
11. Baker D.J. *Ten-Year Ground Exposure of Composite Materials Used on the Bell Model 206L Helicopter Flight Service Program*. NASA, 1994. Available at: <https://ntrs.nasa.gov/citations/19950005944> (accessed: July 29, 2025).
12. Ramesh C., Arumugam V., Stanley J., Kumar V. Effects of hydrolytic aging on glass/epoxy, kevlar/epoxy, and hybrid (glass/kevlar/epoxy) composites. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, 2013, vol. 2, pp. 1589–1596. DOI: 10.17577/IJERTV2IS50859.
13. 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. 65, pp. 2189–2199. DOI: 10.1177/00219983221091465.
14. Anderson E., Gunawan B., Nicholas J. et al. A multicontinuum theory based approach to the analysis of fiber-reinforced polymer composites with degraded stiffness and strength properties due to moisture absorption. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2023, vol. 11, art. 421. DOI: 10.3390/jmse11020421.
15. Pritchard G., Speake S.D. The use of water absorption kinetic data to predict laminate property changes. *Composites*, 1987, vol. 18, pp. 227–232. DOI: 10.1590/0104-1428.2106.
16. Nandagopal R.A., Boay C.G., Narasimalu S. An empirical model to predict the strength degradation of the hygrothermal aged CFRP material. *Composite Structures*, 2020, vol. 236, art. 111876.
17. Urzhumtsev Yu.S. Time-temperature superposition. Review. *Mechanics of Composite Materials*, 1976, vol. 11, pp. 57–72. DOI: 10.1007/bf00855426.
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. Maksimov R.D., Sokolov E.A., Mochalov V.P. Effect of temperature and moisture on the creep of polymeric materials. 1. One-dimensional extension under stationary temperature-moisture conditions. *Polymer Mechanics*, 1975, vol. 11, pp. 334–339. DOI: 10.1007/BF00863977.
20. Maksimov R.D., Sokolov E.A., Mochalov V.P. Effect of temperature and humidity on the creep of polymer materials. 2. Uniaxial elongation under variable temperature-humidity conditions. *Polymer Mechanics*, 1975, vol. 11, pp. 834–839. DOI: 10.1007/BF00857602.
21. Maksimov R.D., Mochalov V.P., Sokolov E.A. Influence of temperature and humidity on the creep of polymer materials. 3. Shear, and shear and tensile strain acting together. *Polymer Mechanics*, 1976, vol. 12, pp. 562–567. DOI: 10.1007/BF00857006.

22. Hafiz T.A. Life prediction of carbon fiber reinforced polymers using time temperature shift factor. *International Journal of Engineering Transactions A: Basics*, 2020, vol. 33, pp. 1340–1346. DOI: 10.5829/ije.2020.33.07a.21.
23. Petrov M.G., Startsev O.V., Lebedev M.P. Study of the strength of structural carbon fiber reinforced plastics under tension, compression and interlayer shear. *Deformatsiya i razrusheniye materialov*, 2025, no. 3, pp. 19–27. DOI: 10.31044/1814-4632-2025-3-19-27.
24. 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: September 15, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-6-49-57.
25. 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.
26. ISO 6721-11. *Plastics – Determination of dynamic mechanical properties – Part 11: Glass transition temperature*. ISO, 2012, 22 p.
27. Isupov V.V., Startsev O.V. Numerical methods in dynamic mechanical spectroscopy of polymers. *Reports of the Int. Conf. «Mathematical Models and Numerical Methods of Continuum Mechanics»*. Ed. Yu.I. Shokin. Novosibirsk, 1996, pp. 293–294.

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

Петров Марк Григорьевич, ведущий научный сотрудник, к.т.н., ФАУ «СибНИА им. С.А. Чаплыгина», sibnia@sibnia.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

Mark G. Petrov, Leading Researcher, Candidate of Sciences (Tech.), SIBNIA, sibnia@sibnia.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.