

Научная статья

УДК 53.09:620.22

DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-9-86-98

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ В СООТВЕТСТВИИ С КИНЕТИЧЕСКОЙ КОНЦЕПЦИЕЙ ПРОЧНОСТИ ПРИ РАЗРАБОТКЕ И ИЗГОТОВЛЕНИИ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Е.В. Двирная¹, Е.А. Вешкин¹, Г.В. Корниенко¹, О.В. Старцев¹

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

Аннотация. Установлены закономерности изменения долговечности углепластика ВКУ-39/ВТКУ-2.200, изготовленного при разном давлении и с разным содержанием связующего, а также стеклопластика КМКС в шести вариациях наполнителя и связующего. По результатам испытаний на межслойный сдвиг при разных скоростях нагружения проведен термоактивационный анализ, который позволил оценить изменение долговечности и термодинамического параметра прочности в зависимости от состава и технологии изготовления материала.

Ключевые слова: углепластик, стеклопластик, кинетическая концепция прочности, уравнение Журкова, долговечность, термоактивационный анализ, параметры отверждения

Для цитирования: Двирная Е.В., Вешкин Е.А., Корниенко Г.В., Старцев О.В. Определение долговечности в соответствии с кинетической концепцией прочности при разработке и изготовлении полимерных композиционных материалов // Труды ВИАМ. 2026. № 9 (163). С. 86–98. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-9-86-98.

Scientific article

DETERMINATION OF DURABILITY BASED ON THE KINETIC CONCEPT OF STRENGTH IN THE DEVELOPMENT AND MANUFACTURE OF POLYMER COMPOSITE MATERIALS

E.V. Dvirnaya¹, E.A. Veshkin¹, G.V. Kornienko¹, O.V. Startsev¹

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

Abstract. Durability variations were determined for VKU-39/VTkU-2.200 carbon fiber composites manufactured under different pressures and resin contents, as well as KMKS fiberglass in six filler and binder variations. Based on interlaminar shear test results at various loading rates, a thermal activation analysis was performed, which allowed to assess changes in durability and thermodynamic strength parameter depending on the material composition and manufacturing technology.

Keywords: carbon fiber reinforced polymer, glass fiber reinforced polymer, kinetic theory of strength, Zhurkov's equation, durability, thermal activation analysis, curing parameters

For citation: Dvirnaya E.V., Veshkin E.A., Kornienko G.V., Startsev O.V. Determination of durability based on the kinetic concept of strength in the development and manufacture of polymer composite materials. *Trudy VIAM*, 2026, no. 9 (163), pp. 86–98. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-9-86-98.

Введение

Развитие технологий производства материалов делает применение полимерных композиционных материалов (ПКМ) в различных областях промышленности все более перспективным [1, 2]. В авиастроении эти материалы ценят за коррозионную стойкость и высокую прочность при относительно небольшой массе конструкций [3].

В ходе эксплуатации ПКМ демонстрируют высокую надежность и долговечность [4, 5]. Они устойчивы к агрессивным средам и сохраняют несущую способность при экстремальных температурах [6, 7]. Различные способы изготовления ПКМ направлены на формирование устойчивой и заданной структуры материала с уникальными свойствами [8].

Качество ПКМ определяется не только прочностью волокна или матрицы, но и прочностью связей между ними. Низкая межслоевая прочность может быть вызвана неправильным подбором компонентов или технологических режимов изготовления, что также приводит к развитию таких дефектов, как пористость и неоднородность структуры [9–13].

Важными факторами, влияющими на свойства ПКМ на этапе их изготовления, являются степень отверждения связующего, состояние границы раздела фаз, остаточные напряжения, наличие дефектов и др. Особенно на начальном этапе эксплуатации на свойства ПКМ влияет степень завершенности процессов отверждения полимерного связующего [14–17]. При неполном отверждении происходит ослабление межмолекулярных связей, сохраняется реакционная активность и увеличивается нестабильность свойств. Изучено влияние температуры отверждения в диапазоне от 80 до 130 °C на механические свойства композитов из натуральных волокон [18]. Результаты испытаний показали, что с повышением температуры отверждения ударная вязкость снижается, прочность при изгибе и растяжении увеличивается с последующим снижением. Максимальное значение механической прочности наблюдается при 100 °C.

Работа [19] посвящена исследованию влияния доотверждения на прочность при сжатии ПКМ на основе полимерных матриц с разным содержанием смолы: 9, 12 и 15 % (по массе). Образцы подвергали воздействию четырех температурных режимов: 20, 100, 150 и 200 °C. Максимальное увеличение прочности при сжатии достигает 200 % при воздействии температуры от 20 до 200 °C для 12%-ной эпоксидной смолы. Увеличение количества полимера также привело к повышению предела прочности при сжатии. При возрастании доли связующего с 9 до 15 % (по массе) максимальное увеличение прочности составило 164 % при температуре 20 °C.

В работе [20] представлены результаты исследования серии углепластиков на основе эпоксидной смолы, отвержденных при температурах 25, 40, 50, 60 и 70 °C. Влияние температур отверждения на механические свойства оценивали с помощью испытаний на растяжение и трехточечный изгиб. С увеличением температуры отверждения наблюдали повышение жесткости и прочности углепластиков. При этом диапазон 40–50 °C обеспечивал наиболее сбалансированное улучшение механических свойств.

Авторы работы [21] исследовали влияние температуры отверждения на механические и термические свойства композита из стекловолокна и полиуретана. Испытания на растяжение показали, что предел прочности при растяжении и относительное удлинение при разрыве снижаются с повышением температуры отверждения. Более высокая температура отверждения приводит к снижению адгезионной прочности на поверхности раздела, что обусловлено различной реакционной способностью трех реактивных групп в полимерной матрице. С повышением температуры реакционноспособные группы склонны вступать в реакцию с отвердителем, но не соединяться с поверхностью стекловолокна, что приводит к ослаблению связи между смолой и волокном. Исходя из приведенных результатов, оптимальной температурой отверждения для композитов

из стекловолокна и полиуретана выбрана температура 150 °С. Противоречивые результаты, полученные в представленных работах, свидетельствуют о важности расширения температурного диапазона процесса отверждения. Оптимальная температура отверждения достигается при завершённом процессе сшивки и отсутствии термической деструкции полимера.

Немаловажным параметром при изготовлении ПКМ является давление отверждения, варьируя которое можно достигнуть лучшей адгезии волокна и матрицы [22–24]. Например, в работе [25] показано, что снижение давления формования углепластиков с 1,0 до 0,2 МПа значительно влияет на толщину монослоя и содержание связующего. Обе характеристики увеличиваются на ~ (13–15) %. При этом наблюдается снижение прочности на изгиб на 8 % и повышение прочности при межслойном сдвиге на 6 %. Недостаточное давление также может привести к образованию пустот и слабой пропитке материала, что, в свою очередь, снижает прочностные показатели материала, износостойкость и повышает влагопоглощение [22, 25, 26].

Подбор соотношения компонентов ПКМ имеет особое значение для формирования материала, соответствующего требованиям к надёжности и долговечности [27, 28]. На примере углепластика на основе ткани марки ВТкУ-2.200 выявлено [29], что при содержании связующего в диапазоне от 32 до 37 % происходит линейное снижение предела прочности при растяжении. Постепенное уменьшение содержания наполнителя в композите оказывает значительное влияние на прочность при растяжении, при этом основное значение придается наполнителю.

Прогнозирование срока службы позволяет выяснить, будет ли материал пригодным к эксплуатации в определенных условиях в течение заданного времени. Классические механические испытания, направленные на определение пределов прочности, не могут дать информацию о том, как будет вести себя материал в процессе эксплуатации, так как величины этих параметров будут меняться в зависимости от условий исследований. Однако механические испытания в широком диапазоне температур и скоростей нагружения, а также дальнейший анализ изменения термоактивационных констант позволяют определить расчетную долговечность, близкую к эксплуатационным значениям. Именно этот подход применяется в кинетической концепции прочности, на которой основано уравнение Журкова (1), позволяющее определить долговечность материалов:

$$\tau = t_0 \exp\left(\frac{U_0 - \gamma\sigma}{RT}\right), \quad (1)$$

где t_0 – период тепловых колебаний атомов в твердом теле, равный 10^{-13} с; R – универсальная газовая постоянная, равная 8,314 Дж/(моль·К); T – температура испытаний, К; γ – структурно чувствительный коэффициент (активационный объем), кДж/(моль·МПа); U_0 – начальная энергия активации разрушения, кДж/моль; σ – разрушающая нагрузка, МПа; τ – долговечность, с.

В соответствии с кинетической концепцией прочности, разрушение является термоактивационным процессом, т. е. под действием температуры и нагрузки происходит постепенное разрушение материала. При этом изменяется его поврежденность (ω) с определенной скоростью разрушения ($\dot{\omega}$). Время до момента макроразрушения материала определяется как интеграл от скорости разрушения с течением времени:

$$\int_0^{t^*} \dot{\omega}(t, \sigma_i) dt = \tau_{eq} \nu_0 \exp\left(-\frac{U_0 - \gamma\sigma_i}{RT}\right), \quad (2)$$

где t – время, с; t^* – верхний предел интегрирования (время до разрушения материала), с; σ_i – касательные напряжения при выбранной схеме нагружения, МПа; τ_{eq} – эквивалентное время разрушения, с; ν_0 – характерная дебаевская частота, равная 10^{13} с $^{-1}$.

Под эквивалентным временем разрушения τ_{eq} понимается приведенное время действия постоянной нагрузки, вызывающее тот же уровень накопленной поврежденности, что и реальный процесс нагружения при испытании с постоянной скоростью деформирования. Эквивалентное время разрушения рассчитывается путем интегрирования кинетического уравнения разрушения (2) по всей продолжительности испытания вплоть до момента макроразрушения образца.

Уравнение (1) учитывает влияние внешних условий воздействия – температуры испытаний и действующих напряжений, что позволяет определить долговечность при разных условиях эксплуатации [30, 31].

Цель данной работы – исследование влияния технологических параметров изготовления на изменение свойств и долговечности перспективных авиационных углепластиков и стеклопластиков посредством термоактивационного анализа (ТАА) результатов испытаний на межслойный сдвиг.

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

Материалы и методы

Углепластик ВКУ-39/ВТкУ-2.200 [32] изготовлен с разным содержанием связующего и при разных условиях формования (табл. 1).

Таблица 1

Условия изготовления углепластика ВКУ-39/ВТкУ-2.200

Образец углепластика	Содержание связующего, %	Давление отверждения, МПа	Температура отверждения, °С
УП38/7/180	38	0,7	180
УП36/7/180	36	0,7	180
УП34/7/180	34	0,7	180
УП32/7/180	32	0,7	180
УП34/9/180	34	0,9	180
УП34/3/180	34	0,3	180
УП34/7/160	34	0,7	160
УП34/7/200	34	0,7	200

Исследованы также шесть вариантов стеклопластика КМКС, отличающихся наполнителем и полимерным связующим (табл. 2).

Таблица 2

Связующие и наполнители для изготовления стеклопластика КМКС

Образец стеклопластика	Связующее	Наполнитель
СП1.1	ВСК-14-2м	ТС-8/3-К-ТО
СП1.2	ВСК-14-2м	Т-10П-14
СП1.3	ВСК-14-2м	Т-15П(П)76
СП2.1	ВСК-14-4к	ТС-8/3-К-ТО
СП2.2	ВСК-14-4к	Т-10П-14
СП2.3	ВСК-14-4к	Т-15П(П)76

Для исследования долговечности ПКМ проведены испытания на межслойный сдвиг методом короткой балки в соответствии с ГОСТ 32659–2014. Нагружение

проводили монотонно в диапазоне скоростей от 0,005 до 5 мм/мин (рис. 1). При каждой скорости нагружения испытывали один образец, при этом для серии образцов использовали от 5 до 7 различных скоростей нагружения для получения зависимости энергии активации разрушения от напряжения.

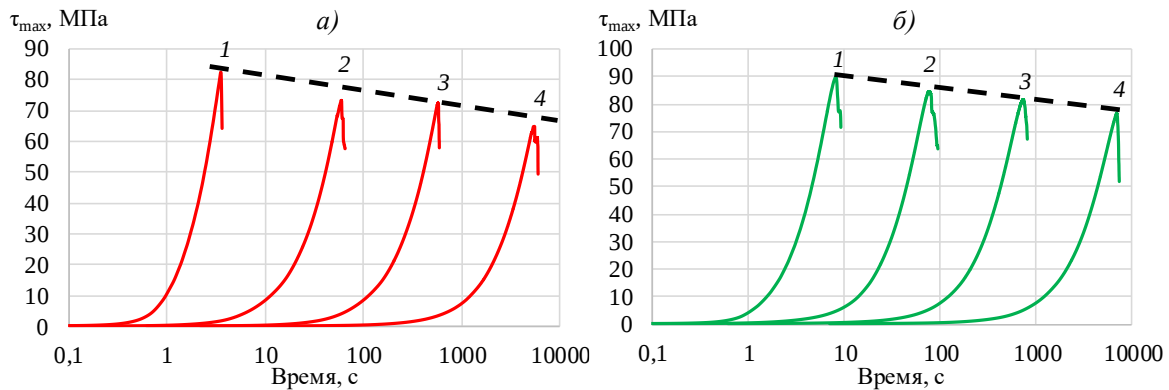


Рис. 1. Кривые нагружения при испытаниях углепластика ВКУ-39/ВТкУ-2.200 (а) и стеклопластика КМКС (б) на межслойный сдвиг при скорости нагружения 5 (1), 0,5 (2), 0,05 (3) и 0,005 мм/мин (4). $\tau_{\max}$ – касательные напряжения

Результаты и обсуждение

Согласно кинетической концепции прочности, разрушение не является мгновенным актом, а происходит постепенно с накопительным процессом разрыва межатомных связей под воздействием температур и механических нагрузок [33].

Ключевым математическим выражением этой идеи является уравнение Журкова (1), в соответствии с которым рассчитать долговечность можно, зная физические константы t_0 , U_0 и γ . Значение t_0 было принято стандартным (10^{-13} с) в соответствии с данными по определению долговечности композитов [30, 31, 33]. Начальная энергия активации разрушения U_0 для неметаллических материалов характеризует энергию разрыва межатомных и межмолекулярных связей в отсутствие внешней нагрузки и определяется химической природой компонентов. Исследованные углепластики изготовлены из одного материала и различаются только технологией изготовления. Значение U_0 для углепластика ВКУ-39/ВТкУ-2.200 определено ранее в результате испытаний при различных температурах и скоростях нагружения [34] и составляет 160,8 кДж/моль. Константу γ определяли с помощью ТАА по результатам испытаний на межслойный сдвиг при монотонном нагружении с разной скоростью. В результате анализа получена зависимость

$$U_i(\tau_{\max}) = U_0 - \gamma \tau_{\max} \in RT \ln(\tau_{eq}/v_0), \quad (3)$$

где U_i – энергия активации разрушения, соответствующая i -й экспериментальной точке (определенная для конкретного уровня напряжения), кДж/моль; $\tau_{\max}$ – касательные напряжения при межслойном сдвиге, МПа.

Долговечность рассчитывали при фиксированном значении температуры и действующем напряжении, выбранном исключительно для сравнительного анализа исследованных материалов. Полученные значения не характеризуют нормативный срок службы конструкции при конкретных условиях эксплуатации.

Зависимости $U_i(\tau_{\max})$ для углепластика ВКУ-39/ВТкУ-2.200 представлены на рис. 2.

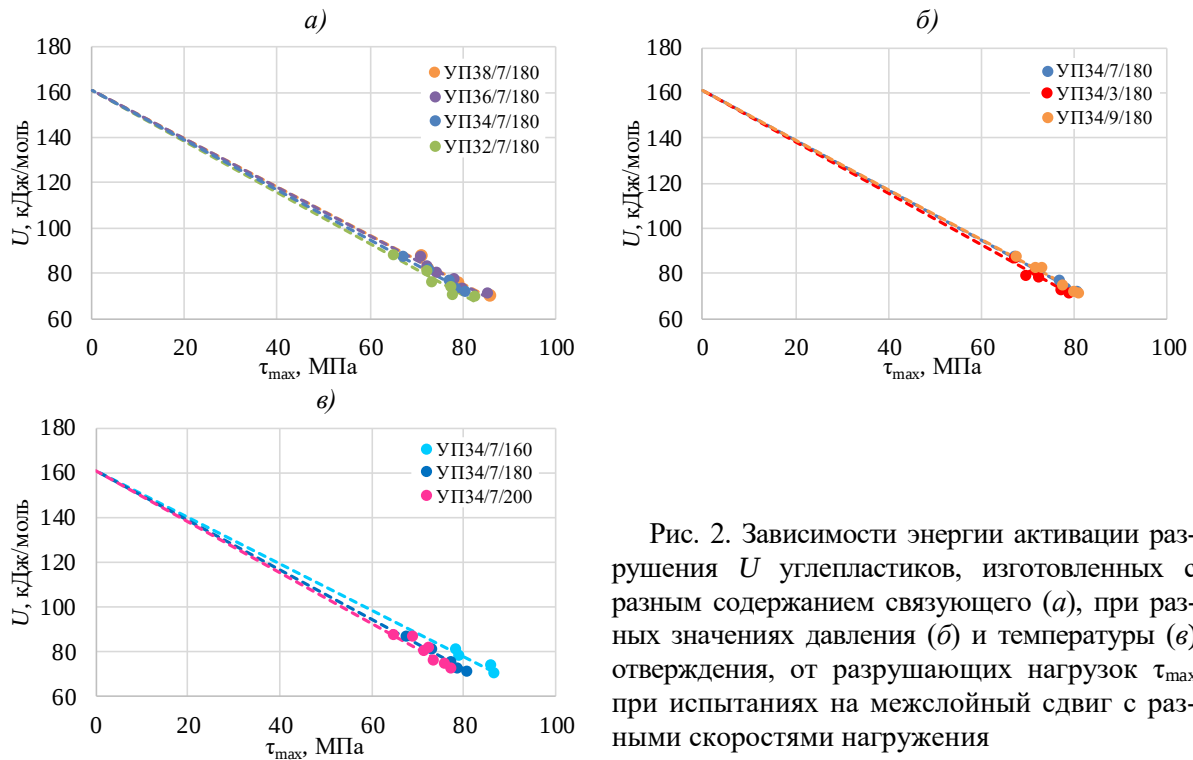


Рис. 2. Зависимости энергии активации разрушения U углепластиков, изготовленных с разным содержанием связующего (а), при разных значениях давления (б) и температуры (в) отверждения, от разрушающих нагрузок $\tau_{\max}$ при испытаниях на межслойный сдвиг с разными скоростями нагружения

В реальном теле напряжение распределено неравномерно. Активационный объем γ показывает, во сколько раз локальное напряжение в области дефектов превышает среднее внешнее напряжение. При этом γ является структурно чувствительным коэффициентом, что выражается в изменении этой величины в зависимости от преобразований структуры под воздействием внешних факторов. Такая характеристика, как параметр прочности P_{sh} , является обратной величиной активационного объема γ и позволяет оценить изменение термодинамического состояния материала при изменении его структуры:

$$P_{sh} = \frac{\tau_{\max}}{U_0 - U_i} = \frac{1}{\gamma}. \quad (4)$$

В табл. 3 приведены средние значения параметра прочности P_{sh} и долговечности τ исследованных образцов углепластика ВКУ-39/ВТКУ-2.200, коэффициенты линейной аппроксимации силовых зависимостей для каждой серии образцов, а также отклонения от значений P_{sh} и τ , полученные на основе разброса экспериментальных точек относительно линейной зависимости $U_i(\tau_{\max})$.

При изучении результатов анализа образцов углепластика, изготовленного с разным содержанием связующего, выявлено, что значения P_{sh} и τ увеличиваются с повышением концентрации связующего. При изменении содержания связующего с 32 до 38 % параметр прочности возрастает на 6,8 %, а долговечность при заданных условиях (температура 298 К, давление 33 МПа) – в 2 раза (с 17 до 35 лет). В работе [29] приведены данные о снижении прочности при растяжении с увеличением содержания связующего. При этом результаты исследований, представленные в данной работе, демонстрируют противоположную зависимость, но для испытаний на межслойный сдвиг. Это явление можно объяснять улучшением состояния межфазного пространства с увеличением содержания связующего, так как недостаток связующего компонента может приводить к недостаточной пропитке наполнителя, что, в свою очередь, ведет к возникновению структурных дефектов.

Таблица 3

Параметр прочности P_{sh} и долговечность τ углепластика ВКУ-39/ВТКУ-2.200, определенные при испытаниях на межслойный сдвиг с разной скоростью нагружения

Образец углепластика	P_{sh} , моль·МПа/кДж	τ , лет (при температуре 298 К и давлении 33 МПа)	Коэффициент линейной аппроксимации R^2	Касательные напряжения τ_{max} , МПа, при скорости нагружения 0,5 мм/мин
УП32/7/180	0,88±0,02	17±3	0,92	73,2
УП34/7/180	0,91±0,01	21±3	0,91	76,9
УП36/7/180	0,93±0,02	32±11	0,99	78,2
УП38/7/180	0,94±0,02	35±14	0,94	78,8
УП34/3/180	0,88±0,02	15±5	0,98	69,4
УП34/9/180	0,91±0,01	22±5	0,98	73,0
УП34/7/160	0,98±0,02	58±14	0,90	78,5
УП34/7/200	0,90±0,02	18±7	0,90	73,2

Проведенный ТАА результатов испытаний образцов, изготовленных при разном давлении отверждения, показал, что большее значение P_{sh} наблюдается для образца, полученного при давлении 0,7 МПа. Данная закономерность наглядно демонстрирует необходимость оптимизировать такой параметр изготовления, как давление. Слишком большое давление может вызвать повреждение волокон. В то же время низкое давление приводит к плохой пропитке и накоплению пустот [23]. При этом более низкая температура отверждения предположительно могла снизить вероятность термодеструкции материала при изготовлении, поэтому при содержании связующего 34 % и давлении 0,7 МПа наибольшая прочность наблюдается для углепластика, изготовленного при 160 °С (табл. 3).

Аналогичные испытания проведены для серии стеклопластиков, изготовленных из различных типов волокна и полимерных связующих. На первоначальном этапе обработки экспериментальных данных величина начальной энергии активации разрушения определена отдельно для каждого стеклопластика путем экстраполяции данного параметра в область нулевой нагрузки в соответствии с уравнением (3). Анализ полученных результатов показал, что для материалов, изготовленных из одного и того же типа стекловолокна, значения U_0 различаются незначительно, несмотря на применение различных полимерных связующих. Поскольку разница между значениями начальной энергии активации разрушения в случае одного типа стекловолокна и разных полимерных связующих не превышала 10 % [35], для дальнейшего анализа стеклопластики объединены в три группы по типу используемого стекловолокна, а для каждой группы использовано усредненное значение U_0 . Такой подход позволил уменьшить влияние разброса и выделить влияние типа армирующего волокна на величину начальной энергии активации разрушения, а также различить влияние полимерного связующего в сочетании с каждым типом волокна. На рис. 3 приведены силовые зависимости энергии активации разрушения для вариаций стеклопластиков на основе двух видов связующего и трех марок стекловолокна. Результаты ТАА для данных стеклопластиков представлены в табл. 4. Как и для углепластика ВКУ-39/ВТКУ-2.200, для стеклопластиков определены значения отклонений экспериментальных точек и коэффициенты линейной аппроксимации R^2 .

Установлено, что на величину начальной энергии активации разрушения, а следовательно, и на долговечность в наибольшей степени влияет природа наполнителя. Наилучшим вариантом наполнителя оказалась ткань ТС-8/3-К-ТО. При заданных условиях (температура 298 К, давление 50 МПа) долговечность стеклопластика на основе данной ткани составляет 16–19 лет, что превышает значения долговечности для стеклопластика на основе тканей Т-10П-14 и Т-15П(П)76 на несколько порядков.

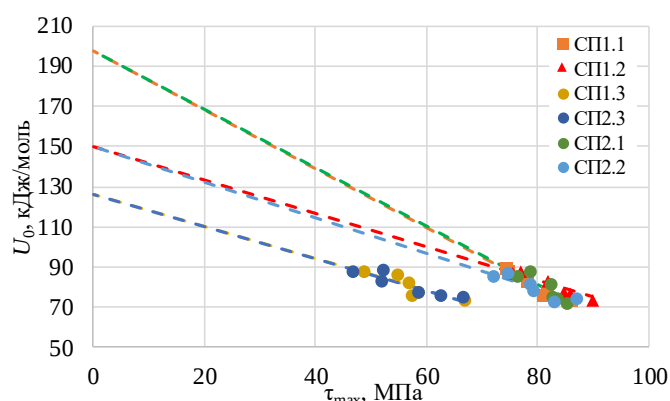


Рис. 3. Силовые зависимости энергии активации разрушения U_0 стеклопластиков разного состава от разрушающих нагрузок $\tau_{\max}$ при испытаниях на межслойный сдвиг с разными скоростями нагружения

Таблица 4

Параметр прочности P_{sh} и долговечность τ стеклопластика, определенные при испытаниях на межслойный сдвиг с разной скоростью нагружения

Образец стеклопластика	Начальная энергия активации разрушения U_0 , кДж/моль	Коэффициент линейной аппроксимации R^2	Касательные напряжения $\tau_{\max}$, МПа, при скорости нагружения 0,5 мм/мин	P_{sh} , моль·МПа/кДж	τ (при температуре 298 К и давлении 50 МПа)
СП1.1	197	0,99	81,8	$0,684 \pm 0,003$	19 ± 3 лет
СП1.2	150	0,96	84,7	$1,199 \pm 0,022$	10 ± 4 сут
СП1.3	126	0,74	58,7	$1,258 \pm 0,040$	3 ± 1 мин
СП2.1	197	0,82	82,7	$0,679 \pm 0,002$	16 ± 1 лет
СП2.2	150	0,83	79,2	$1,138 \pm 0,41$	4 ± 2 сут
СП2.3	126	0,85	58,5	$1,226 \pm 0,044$	2 ± 1 мин

Меньшее влияние на долговечность оказывает состав связующего. Однако для стеклопластиков на основе всех исследованных видов наполнителя наблюдается общая тенденция: материалы на основе связующего ВСК-14-2м имеют большую долговечность по сравнению со связующим ВСК-14-4к.

Для стеклопластиков СП1.3 и СП2.3 прогнозируемая долговечность при напряжении 50 МПа составляет несколько минут. Это связано с тем, что выбранный уровень нагрузки близок к кратковременной прочности данных материалов, которая по результатам испытаний находится в диапазоне $\sim(45-65)$ МПа. Вследствие этого даже небольшое увеличение времени действия нагрузки приводит к разрушению материала.

Можно ожидать, что дополнительную информацию о влиянии состава и технологии получения ПКМ на их долговечность можно получить данным способом в процессе экспонирования материалов в различных климатических условиях, а также при действии значимых факторов старения [36]. В дальнейших работах будет изучен вклад данных факторов в значение изученных характеристик для различных ПКМ.

Заключения

Использование кинетической концепции прочности для определения долговечности и прочности при испытаниях на межслойный сдвиг позволило приблизиться к выбору оптимальных условий изготовления исследованных материалов.

Метод ТАА продемонстрировал перспективность оценки таким способом вклада содержания связующего в углепластике ВКУ-39/ВТКУ-2.200, а также технологических

параметров изготовления. С повышением содержания связующего с 32 до 38 % происходит постепенное увеличение долговечности при межслойном сдвиге.

Такая характеристика, как термодинамический параметр прочности, оказалась чувствительна к изменению давления и температуры при изготовлении углепластиков: оптимальные значения давления и температуры в случае изготовления стеклопластика ВКУ-39/ВТКУ-2.200 составляют 0,7 МПа и 160 °С соответственно.

По данным ТАА результатов испытаний стеклопластика КМКС можно утверждать, что выбор наполнителя оказывает определяющее влияние на долговечность ПКМ. Долговечность стеклопластика на основе ткани ТС-8/3-К-ТО на несколько порядков превышает долговечность стеклопластика на основе ткани Т-15П(П)76. При этом влияние полимерной матрицы значительно меньше.

Таким образом, метод ТАА, основанный на кинетической концепции прочности, позволил определить показатель прочности и долговечность ПКМ при изменении компонентного состава или технологических параметров изготовления. Представленные в данной работе методики могут применяться для прогнозирования долговечности материалов на этапе их разработки.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 24-19-00009).

Список источников

1. Chaffey B., Marchante-Rodriguez V., Brighton J., Grasso M. Degradation mechanisms effect on the mechanical properties of pultruded CFRPS: a review // Discover Polymers. 2025. Vol. 2. No. 1. P. 17. DOI: 10.1007/s44347-025-00029-1.
2. Соловьев В.В., Рычкова А.Д., Неретина А.С. Обоснование выбора материала и технологии изготовления полимерных композиционных материалов // Космические аппараты и технологии. 2025. Т. 9. № 2. С. 79–86. DOI: 10.26732/j.st.2025.2.03.
3. Barreira-Pinto R., Carneiro R., Miranda M., Guedes R.M. Polymer-matrix composites: characterising the impact of environmental factors on their lifetime // Materials. 2023. Vol. 16. No. 11. P. 3913. DOI: 10.3390/ma16113913.
4. Александров Д.В., Маликов С.Б. Перспективы применения композиционных материалов в авиастроении // Идеи и новации. 2020. Т. 8. № 3-4. С. 160–163. DOI: 10.48023/2411-7943_2020_8_3_4_160.
5. Janeikaitė J., Misiūnaitė I., Gribniak V. Fiber-Reinforced Polymer Laminates in Aviation and Structural Engineering: A Synthetic Comparison of Performance Requirements, Design Principles, and Defect Assessment Procedures // Materials. 2025. Vol. 18. No. 21. P. 4938. DOI: 10.3390/ma18214938.
6. Herbold E.B., Nesterenko V.F., Benson D.J. et al. Particle size effect on strength, failure, and shock behavior in polytetrafluoroethylene-Al-W granular composite materials // Journal of Applied Physics. 2008. Vol. 104. No. 10. DOI: 10.1063/1.303903/912097.
7. Schlothauer A., Pappas G.A., Ermanni P. Thin-ply thermoplastic composites: from weak to robust transverse performance through microstructural and morphological tuning // Composites Part B: Engineering. 2023. Vol. 261. P. 110764. DOI: 10.1016/j.compositesb.2023.110764.
8. Adil S., Lazoglu I. A review on additive manufacturing of carbon fiber-reinforced polymers: Current methods, materials, mechanical properties, applications and challenges // Journal of Applied Polymer Science. 2023. Vol. 140. No. 7. P. e53476. DOI: 10.1002/app.53476.
9. Тимошков П.Н., Гончаров В.А., Усачева М.Н., Хрульков А.В. Влияние технологических параметров на характеристики полимерных композиционных материалов при автоматизированной выкладке препрегов (обзор) // Труды ВИАМ. 2021. № 6 (100). С. 46–55. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 03.02.2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-6-46-55.
10. Mattlet A., Sicot O., Van Schoors L., Aivazzadeh S. Influence of processing and matrix parameters on the manufacturing of unidirectional flax/polypropylene composites // SN Applied Sciences. 2023. Vol. 5. No. 12. P. 314. DOI: 10.1007/s42452-023-05457-x.

11. Иванов Н.В., Гуревич Я.М., Хасков М.А., Акмеев А.Р. Изучение режима отверждения связующего ВСЭ-34 и его влияния на механические свойства // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. № 2 (47). С. 50–55. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-2-50-55.
12. Okolie O., Latto J., Faisal N. et al. Manufacturing defects in thermoplastic composite pipes and their effect on the in-situ performance of thermoplastic composite pipes in oil and gas applications // *Applied composite materials*. 2023. Vol. 30. No. 1. P. 231–306. DOI: 10.1007/s10443-022-10066-9.
13. Малышева Г.В., Гузева Т.А., Гращенко Д.В., Раскутин А.Е. Влияние технологии нагрева на продолжительность процесса отверждения полимерных композиционных материалов // *Труды ВИАМ*. 2018. № 8 (68). С. 23–27. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 03.02.2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-8-23-27.
14. Díaz-Rodríguez J.G., Pertuz-Comas A.D., Bohórquez-Becerra O.R. Impact strength for 3D-printed PA6 polymer composites under temperature changes // *Journal of Manufacturing and Materials Processing*. 2023. Vol. 7. No. 5. P. 178. DOI: 10.3390/jmmp7050178.
15. Liang J., Liu L., Qin Z. et al. Experimental study of curing temperature effect on mechanical performance of carbon fiber composites with application to filament winding pressure vessel design // *Polymers*. 2023. Vol. 15. No. 4. P. 982. DOI: 10.3390/polym15040982.
16. Singh J.I.P., Singh S., Dhawan V. Influence of fiber volume fraction and curing temperature on mechanical properties of jute/PLA green composites // *Polymers and polymer composites*. 2020. Vol. 28. No. 4. P. 273–284. DOI: 10.1177/0967391119872875.
17. Parente J.M., Simoes R., Silva A.P., Reis P.N. Impact of the curing temperature on the manufacturing process of multi-nanoparticle-reinforced epoxy matrix composites // *Materials*. 2024. Vol. 17. No. 8. P. 1930. DOI: 10.3390/ma17081930.
18. Singh J.I.P., Singh S., Dhawan V. Effect of curing temperature on mechanical properties of natural fiber reinforced polymer composites // *Journal of natural fibers*. 2018. Vol. 15. No. 5. P. 687–696. DOI: 10.1080/15440478.2017.1354744.
19. El-Hawary M.M., Abdel-Fattah H. Temperature effect on the mechanical behavior of resin concrete // *Construction and Building Materials*. 2000. Vol. 14. No. 6-7. P. 317–323. DOI: 10.1016/S0950-0618(00)00032-5.
20. Stroe L.A., Crunteanu D.E., Botan M. et al. Thermo-Mechanical Behavior of Carbon Fiber Composites Processed at Elevated Temperatures // *Polymers*. 2026. Vol. 18. No. 3. P. 401. DOI: 10.3390/polym18030401.
21. Meng S.S., Zhang B.M. Effects of curing temperature on glass fiber/urethane composite's mechanical and thermal properties // *Materials Science Forum*. 2015. Vol. 813. P. 194–201. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.813.194.
22. Handwerker M., Wellnitz J., Marzbani H., Tetzlaff U. Pressure and heat treatment of continuous fiber reinforced thermoplastics produced by fused filament fabrication // *Progress in Additive Manufacturing*. 2023. Vol. 8. No. 2. P. 99–116. DOI: 10.1007/s40964-022-00315-5.
23. Rajak D.K., Wagh P.H., Linul E. Manufacturing technologies of carbon/glass fiber-reinforced polymer composites and their properties: A review // *Polymers*. 2021. Vol. 13. No. 21. P. 3721. DOI: 10.3390/polym13213721.
24. Janiszewski J., Komorek A., Bakula M. et al. The influence of pressure in the infusion method upon mechanical properties of polymer composites // *Advances in Science and Technology. Research Journal*. 2023. Vol. 17. No. 6. DOI: 10.12913/22998624/173382.
25. Coulon P., Chatelain J.F., Dubé M., Rimpault X. Effect of curing pressure on machinability of carbon fiber composite // *Procedia CIRP*. 2018. Vol. 77. P. 307–310. DOI: 10.1016/j.procir.2018.09.022.
26. Иванов М.С., Морозова В.С., Павлюкович Н.Г. Влияние технологических режимов изготовления на свойства консолидированных пластин углепластика на основе полиэфирэфиркетона // *Труды ВИАМ*. 2025. № 3 (145). С. 60–69. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 03.02.2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-3-60-69.
27. Gong J., Saeed N., Huang X. et al. Influences of fiber volume content on the mechanical properties of 2D plain carbon-fiber woven composite materials // *Polymers*. 2023. Vol. 16. No. 1. P. 108. DOI: 10.3390/polym16010108.

28. Damanik W.S., Siregar M.A., Lubis S. Evaluation of the effect of variations in resin and fiber composition on tensile and compressive properties of natural material composites // *Hybrid Advances*. 2025. Vol. 10. P. 100434. DOI: 10.1016/j.hybadVol.2025.100434.
29. Мишкин С.И., Жакова Л.С., Клименко О.Н., Васильчук Е.А. Исследование влияния содержания связующего в углепластике на их механические свойства // *Труды ВИАМ*. 2023. № 2 (120). С. 77–86. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 05.02.2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-2-77-86.
30. Петров М.Г., Старцев О.В., Лебедев М.П., Копырин М.М. Анализ разрушения и прогнозирование долговечности углепластика в различных температурно-силовых условиях и воздействиях внешней среды // *Целостность и ресурс в экстремальных условиях*. 2024. № 1. С. 36–39. DOI: 10.24412/cl-37269-2024-1-36-39.
31. Петров М.Г. Исследование долговечности материалов с использованием кинетической концепции разрушения // *Прикладная механика и техническая физика*. 2021. Т. 62. № 1. С. 165–178. DOI: 10.1134/S0021894421010181.
32. 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 // *Polymer Science, Series D*. 2025. Vol. 178. P. 382–386.
33. Petrov M.G., Startsev O.V., Lebedev M.P. et al. Strength characteristics of carbon fiber reinforced plastic in shear and cyclic extension-compression after 7 years of climate exposure // *Universal Journal of Carbon Research*. 2024. Vol. 2. No. 1. P. 1–13.
34. 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> (дата обращения: 05.02.2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-4-68-84.
35. Регель В.Р., Слущер А.И., Томашевский Э.Е. Кинетическая природа прочности твердых тел. М.: Наука, 1974. 560 с.
36. Kablov E.N., Kirillov V.N., Startsev O.V., Krotov A.S. Climatic aging of composite aviation materials: II. Relaxation of the initial structural nonequilibrium and through-thickness gradient of properties // *Russian Metallurgy (Metally)*. 2011. Vol. 2011. No. 10. P. 1001–1007. DOI: 10.1134/S0036029511100077.

References

1. Chaffey B., Marchante-Rodriguez V., Brighton J., Grasso M. Degradation mechanisms effect on the mechanical properties of pultruded CFRPS: a review. *Discover Polymers*, 2025, vol. 2, no. 1, pp. 17. DOI: 10.1007/s44347-025-00029-1.
2. Soloviev V.V., Rychkova A.D., Neretina A.S. Justification of the choice of material and technology for the manufacture of polymer composite materials. *Kosmicheskie apparaty i tekhnologii*, 2025, vol. 9, no. 2, pp. 79–86. DOI: 10.26732/j.st.2025.2.03.
3. Barreira-Pinto R., Carneiro R., Miranda M., Guedes R.M. Polymer-matrix composites: characterising the impact of environmental factors on their lifetime. *Materials*, 2023, vol. 16, no. 11, p. 3913. DOI: 10.3390/ma16113913.
4. Aleksandrov D.V., Malikov S.B. Prospects for the use of composite materials in aircraft manufacturing. *Idey i novatsii*, 2020, vol. 8, no. 3–4, pp. 160–163. DOI: 10.48023/2411-7943_2020_8_3_4_160.
5. Janeikaitė J., Misiūnaitė I., Gribniak V. Fiber-Reinforced Polymer Laminates in Aviation and Structural Engineering: A Synthetic Comparison of Performance Requirements, Design Principles, and Defect Assessment Procedures. *Materials*, 2025, vol. 18, no. 21, p. 4938. DOI: 10.3390/ma18214938.
6. Herbold E.B., Nesterenko V.F., Benson D.J. et al. Particle size effect on strength, failure, and shock behavior in polytetrafluoroethylene-Al-W granular composite materials. *Journal of Applied Physics*, 2008, vol. 104, no. 10. DOI: 10.1063/1.2990391.
7. Schlothauer A., Pappas G.A., Ermanni P. Thin-ply thermoplastic composites: from weak to robust transverse performance through microstructural and morphological tuning. *Composites Part B: Engineering*, 2023, vol. 261, p. 110764. DOI: 10.1016/j.compositesb.2023.110764.
8. Adil S., Lazoglu I. A review on additive manufacturing of carbon fiber-reinforced polymers: Current methods, materials, mechanical properties, applications and challenges. *Journal of Applied Polymer Science*, 2023, vol. 140, no. 7, p. e53476. DOI: 10.1002/app.53476.

9. Timoshkov P.N., Goncharov V.A., Usacheva M.N., Khrulkov A.V. Influence of technological parameters on characteristics of polymer composite materials in automated layup of prepregs (review). *Trudy VIAM*, 2021, no. 6 (100), pp. 46–55. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: February 03, 2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-6-46-55.
10. Mattlet A., Sicot O., Van Schoors L., Aivazzadeh S. Influence of processing and matrix parameters on the manufacturing of unidirectional flax/polypropylene composites. *SN Applied Sciences*, 2023, vol. 5, no. 12, p. 314. DOI: 10.1007/s42452-023-05457-x.
11. Ivanov N.V., Gurevich Ya.M., Khaskov M.A., Akmeev A.R. Mode studying curing binding VSE-34 and its influences on mechanical properties. *Aviacionnyye materialy i tehnologii*, 2017, no. 2, pp. 50–55. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-2-50-55.
12. Okolie O., Latto J., Faisal N. et al. Manufacturing defects in thermoplastic composite pipes and their effect on the in-situ performance of thermoplastic composite pipes in oil and gas applications. *Applied composite materials*, 2023, vol. 30, no. 1, pp. 231–306. DOI: 10.1007/s10443-022-10066-9.
13. Malysheva G.V., Guzeva T.A., Grashchenkov D.V., Raskutin A.E. The influence of heating technology on the duration of the curing process of polymer composite materials. *Trudy VIAM*, 2018, no. 8 (68), pp. 23–27. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: February 03, 2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-8-23-27.
14. Díaz-Rodríguez J.G., Pertuz-Comas A.D., Bohórquez-Becerra O.R. Impact strength for 3D-printed PA6 polymer composites under temperature changes. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 2023, vol. 7, no. 5, p. 178. DOI: 10.3390/jmmp7050178.
15. Liang J., Liu L., Qin Z. et al. Experimental study of curing temperature effect on mechanical performance of carbon fiber composites with application to filament winding pressure vessel design. *Polymers*, 2023, vol. 15, no. 4, p. 982. DOI: 10.3390/polym15040982.
16. Singh J.I.P., Singh S., Dhawan V. Influence of fiber volume fraction and curing temperature on mechanical properties of jute/PLA green composites. *Polymers and polymer composites*, 2020, vol. 28, no. 4, pp. 273–284. DOI: 10.1177/0967391119872875.
17. Parente J.M., Simoes R., Silva A.P., Reis P.N. Impact of the curing temperature on the manufacturing process of multi-nanoparticle-reinforced epoxy matrix composites. *Materials*, 2024, vol. 17, no. 8, p. 1930. DOI: 10.3390/ma17081930.
18. Singh J.I.P., Singh S., Dhawan V. Effect of curing temperature on mechanical properties of natural fiber reinforced polymer composites. *Journal of natural fibers*, 2018, vol. 15, no. 5, pp. 687–696. DOI: 10.1080/15440478.2017.1354744.
19. El-Hawary M.M., Abdel-Fattah H. Temperature effect on the mechanical behavior of resin concrete. *Construction and Building Materials*, 2000, vol. 14, no. 6–7, pp. 317–323. DOI: 10.1016/S0950-0618(00)00032-5.
20. Stroe L.A., Crunteanu D.E., Botan M. et al. Thermo-Mechanical Behavior of Carbon Fiber Composites Processed at Elevated Temperatures. *Polymers*, 2026, vol. 18, no. 3, p. 401. DOI: 10.3390/polym18030401.
21. Meng S.S., Zhang B.M. Effects of curing temperature on glass fiber/urethane composite's mechanical and thermal properties. *Materials Science Forum*, 2015, vol. 813, pp. 194–201. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.813.194.
22. Handwerker M., Wellnitz J., Marzbani H., Tetzlaff U. Pressure and heat treatment of continuous fiber reinforced thermoplastics produced by fused filament fabrication. *Progress in Additive Manufacturing*, 2023, vol. 8, no. 2, pp. 99–116. DOI: 10.1007/s40964-022-00315-5.
23. Rajak D.K., Wagh P.H., Linul E. Manufacturing technologies of carbon/glass fiber-reinforced polymer composites and their properties: A review. *Polymers*, 2021, vol. 13, no. 21, p. 3721. DOI: 10.3390/polym13213721.
24. Janiszewski J., Komorek A., Bakula M. et al. The influence of pressure in the infusion method upon mechanical properties of polymer composites. *Advances in Science and Technology. Research Journal*, 2023, vol. 17, no. 6. DOI: 10.12913/22998624/173382.
25. Coulon P., Chatelain J.F., Dubé M., Rimpault X. Effect of curing pressure on machinability of carbon fiber composite. *Procedia CIRP*, 2018, vol. 77, pp. 307–310. DOI: 10.1016/j.procir.2018.09.022.

26. Ivanov M.S., Morozova V.S., Pavlukovich N.G. Influence of technological modes of manufacture on properties of consolidated plates of carbon fiber reinforced thermoplastic based on polyetheretherketone. *Trudy VIAM*, 2025, no. 3 (145), pp. 60–69. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: February 03, 2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-3-60-69.
27. Gong J., Saeed N., Huang X. et al. Influences of fiber volume content on the mechanical properties of 2D plain carbon-fiber woven composite materials. *Polymers*, 2023, vol. 16, no. 1, p. 108. DOI: 10.3390/polym16010108.
28. Damanik W.S., Siregar M.A., Lubis S. Evaluation of the effect of variations in resin and fiber composition on tensile and compressive properties of natural material composites. *Hybrid Advances*, 2025, vol. 10, p. 100434. DOI: 10.1016/j.hybadVol.2025.100434.
29. Mishkin S.I., Zhakova L.S., Klimenko O.N., Vasilchuk E.A. Research of influence of the contents resin in CFRP on their mechanical properties. *Trudy VIAM*, 2023, no. 2 (120), pp. 77–86. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: February 05, 2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-2-77-86.
30. Petrov M.G., Startsev O.V., Lebedev M.P., Kopyrin M.M. Analysis of destruction and prediction of durability of carbon fiber reinforced plastic under various temperature-force conditions and environmental influences. *Tselostnost i resurs v ekstremal'nykh usloviyakh*, 2024, no. 1, pp. 36–39. DOI: 10.24412/cl-37269-2024-1-36-39.
31. Petrov M.G. Study of durability of materials using the kinetic concept of destruction. *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika*, 2021, vol. 62, no. 1, pp. 165–178. DOI: 10.1134/S0021894421010181.
32. 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. *Polymer Science, Series D*, 2025, vol. 178, pp. 382–386.
33. Petrov M.G., Startsev O.V., Lebedev M.P. et al. Strength characteristics of carbon fiber reinforced plastic in shear and cyclic extension-compression after 7 years of climate exposure. *Universal Journal of Carbon Research*, 2024, vol. 2, no. 1, pp. 1–13.
34. 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> (accessed: February 05, 2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-4-68-84.
35. Regel V.R., Slutsker A.I., Tomashevsky E.E. *Kinetic nature of the strength of solids*. Moscow: Nauka, 1974, 560 p.
36. Kablov E.N., Kirillov V.N., Startsev O.V., Krotov A.S. Climatic aging of composite aviation materials: II. Relaxation of the initial structural nonequilibrium and through-thickness gradient of properties. *Russian Metallurgy (Metally)*, 2011, vol. 2011, no. 10, pp. 1001–1007. DOI: 10.1134/S0036029511100077.

Информация об авторах

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

Вешкин Евгений Алексеевич, начальник УНТЦ, д.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

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

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

Information about the authors

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

Evgeny A. Veshkin, Head of USTC, Doctor of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

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

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

Статья поступила в редакцию 12.05.2026; получена после доработки 26.05.2026; одобрена и принята к публикации после рецензирования 02.07.2026.
The article was submitted 12.05.2026; received in revised form 26.05.2026; approved and accepted for publication after reviewing 02.07.2026.