

Научная статья

УДК 620.1

DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-8-113-128

## ВЛИЯНИЕ КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ НА УГЛЕПЛАСТИК ВКУ-39 ПОСЛЕ ТРЕХ ЛЕТ НАТУРНОЙ ЭКСПОЗИЦИИ В ВОСЬМИ КЛИМАТИЧЕСКИХ ЗОНАХ

И.М. Велигодский<sup>1</sup>, Т.В. Коваль<sup>1</sup>, И.Н. Гуляев<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.** Исследована стойкость углепластика ВКУ-39 к влиянию климата в восьми различных климатических зонах после экспозиции в течение трех лет. Проведены исследования экспонированных образцов методами оптической микроскопии, динамического механического анализа, определены влагосодержание образцов, прочность при сжатии и максимальное напряжение при изгибе. Показана деградация поверхностных слоев связующего полимерного композиционного материала (ПКМ) при экспозиции. Установлена взаимосвязь между воздействием отдельных климатических факторов на ПКМ, изменением состояния полимерной матрицы и снижением прочности материала.

**Ключевые слова:** климатические натурные испытания, углепластик, оптическая микроскопия, прочность при сжатии, прочность при изгибе, динамический механический анализ, влагосодержание ПКМ

**Для цитирования:** Велигодский И.М., Коваль Т.В., Гуляев И.Н. Влияние климатических условий на углепластик ВКУ-39 после трех лет натурной экспозиции в восьми климатических зонах // Труды ВИАМ. 2023. № 8 (126). Ст. 10. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-8-113-128.

Scientific article

## INFLUENCE OF CLIMATIC CONDITIONS ON CFRP VKU-39 AFTER THREE YEAR OUTDOOR EXPOSITION IN EIGHT CLIMATIC ZONES

I.M. Veligodskiy<sup>1</sup>, T.V. Koval<sup>1</sup>, I.N. Gulyaev<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 climatic resistance of CFRP to influence of eight types of climate of different climatic zones during the three year exposition were investigated. Exposed polymer composite was studied by optical microscopy, dynamical mechanical analysis, moisture saturation, flexural strength and compressive strength of polymer composite were determined. Deterioration of upper layer of polymer matrices after exposition was shown. Relationship between climatic factors influence on polymer composites, changing of polymer matrices condition and decreasing of material strength was found.

**Keywords:** natural climatic tests, CFRP, optical microscopy, flexural strength, compressive strength, dynamic mechanical analysis, moisture saturation of polymer composites

**For citation:** Veligodskiy I.M., Koval T.V., Gulyaev I.N. Influence of climatic conditions on CFRP VKU-39 after three year outdoor exposition in eight climatic zones. *Trudy VIAM*, 2023, no. 8 (126), paper no. 10. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-8-113-128.

### **Введение**

Полимерные композиционные материалы (ПКМ) на основе углеродных и стеклянных армирующих наполнителей хорошо зарекомендовали себя для изготовления деталей авиационной техники [1]. Благодаря высокой удельной прочности углепластиков их распространение в авиационной технике экономически целесообразно [2, 3]. Низкая плотность стеклопластиков (на 25 % легче алюминиевых сплавов) и углепластиков (на 20 % часть легче стеклопластиков) при сопоставимой или превосходящей прочности позволяет этим материалам постепенно вытеснять традиционно используемые сплавы [4]. Однако общеизвестным недостатком ПКМ является их высокая (по сравнению с металлами) неоднородность механических свойств и недостаточная предсказуемость изменения их показателей при эксплуатации изделий. Эти особенности приводят к увеличению коэффициентов запаса прочности и снижению экономической целесообразности применения ПКМ для изготовления ответственных высоконагруженных авиационных деталей. Данная работа посвящена изучению свойств ПКМ в зависимости от эксплуатации изделий из них в различных климатических зонах.

Высокие механические показатели ПКМ во многом обусловлены полимерной матрицей, скрепляющей волокна армирующего наполнителя воедино и позволяющей высокую прочность отдельных моноволокон перенести на макрообъект в виде детали, способной выдерживать высокие механические нагрузки. Как показали исследования [5], ПКМ на основе эпоксидных матриц склонны в естественных условиях накапливать незначительное по удельному содержанию, но значительное по степени влияния количество влаги. Молекулы воды, взаимодействуя с молекулами эпоксидного полимера, приводят к его пластификации [6], снижая температуру перехода полимера в высокоэластическое состояние, когда его прочность и жесткость существенно снижаются. Следовательно, для обеспечения возможности прогнозирования свойств углепластика ВКУ-39 необходимо установить влияние условий климатических зон на влагонасыщение, на изменения в матрице и на механические характеристики ПКМ.

### **Материалы и методы**

#### **Углепластик**

Углепластик ВКУ-39 разработан в ВИАМ в 2013 г. и хорошо зарекомендовал себя благодаря трещиностойкости, малой подверженности влиянию тепла и влаги и другим преимуществам. Перечисленные преимущества достигаются благодаря сочетанию высокодеформативной полимерной матрицы на основе связующего ВСЭ-1212 расплавного типа и равнопрочной углеродной ткани саржевого плетения с поверхностной плотностью  $200 \pm 10 \text{ г/м}^2$  в качестве армирующего наполнителя. Данный материал рекомендован для использования в авиатехнике для изготовления таких ответственных конструктивных элементов, как обшивки и конструкции крыла, планера, центроплана и элементов механизации, а также наружного кожуха и створок мотогондолы двигательной установки ПД-14, равно как и других звукопоглощающих конструкций газотурбинных двигателей [7, 8].

Повышенная трещиностойкость ПКМ со связующим ВСЭ-1212 в качестве полимерной матрицы, согласно исследованию [9], обусловлена повышенной межслоевой вязкостью разрушения, вызванного увеличением прослоек матрицы в межволоконном пространстве наполнителя и между его слоями. Сама полимерная матрица связующего ВСЭ-1212 относится к трещиностойким ввиду сонепрерывной морфологии и высокой межфазной адгезии составляющих ее термопластичной и терморективной фаз [10, 11]. По этой причине работа расслоения по *модам* I и II может достигать от 20–70 (для материалов на основе связующего ВСТ-1208) до 300 % (для материалов на основе связующего БМИ-3) от значений работы расслоения однофазных матриц [12].

**Методика проведения экспозиции**

Материалам на основе связующего ВСЭ-1212 посвящен ряд исследований по их механическим свойствам, механизмам разрушения, термомеханическим и термическим испытаниям, а также циклическому старению; построены модели изменения механических свойств от времени [9, 13–18]. Однако исследования влияния натурной атмосферной экспозиции по-прежнему актуальны, так как только под действием естественных климатических условий достигается наиболее полное воздействие окружающей среды на ПКМ. Поэтому в данной работе проведено исследование влияния погодных факторов восьми климатических зон с различными типами климата, которые приведены в таблице.

**Типы климата в местах проведения натуральных климатических испытаний [19]**

Место экспозиции	Средняя температура, °С	Средняя относительная влажность, %	Количество осадков, мм	Средняя скорость ветра, м/с	Доза суммарной солнечной радиации, МДж/м <sup>2</sup>	Тип климата
Геленджик	15,5	70	629	3,2	4865	Приморская атмосфера умеренно теплого климата с мягкой зимой
Владивосток	5,2	64	705	3,0	3253	Приморская атмосфера умеренно влажного климата
Поселок Дальние Зеленцы	1,9	80	472	6,6	2519	Приморская атмосфера умеренного климата
Звенигород	5,6	78	903	2,1	4343*	Сельская атмосфера умеренного климата
Москва	7,9	72	502	1,4	4343	Промышленная атмосфера умеренного климата
Сочи	14,9	77	1518	1,4	5112	Приморская атмосфера теплого влажного климата
Якутск	-7,5	68	221	–	3516	Очень холодный климат
Сьенфуэго (Куба)	25,5	75	842	–	6902	Тропический климат

\* Ввиду близости географического расположения дозу суммарной солнечной радиации в Звенигороде принимали равной таковой в Москве.

Образцы углепластика ВКУ-39 устанавливали на экспозицию в климатических центрах и станциях вышеперечисленных населенных пунктов, закрепляя плиты материала на атмосферных открытых стендах, ориентированных на юг под углом 45 градусов к горизонту. После 36 мес экспозиции плиты ПКМ снимали со стендов, фотографировали

и подвергали исследованиям физических, механических, термомеханических, морфологических свойств, а затем разрезали на образцы требуемых для проведения испытаний форм и размеров. Из каждой зоны экспозиции получено по одной плите материала ВКУ-39 для проведения исследований. Из каждой плиты материала, прошедшего экспозицию, изготовлено по пять образцов для исследования методом динамического механического анализа (ДМА), определения прочности при сжатии и максимального напряжения при изгибе.

### *Методика проведения испытаний*

#### *Методы оптической микроскопии*

Изображения поверхности образцов в отраженном свете получали при помощи микроскопа Olympus SZX-10 с увеличением  $\times 40$  – фотографировали образцы посредством встроенной цифровой фотокамеры и обрабатывали полученные снимки в штатном программном обеспечении.

Определение профиля поверхности углепластика проводили методом оптической 3D-микроскопии посредством конфокального лазерного сканирующего микроскопа Olympus LEXT OLS 3100 с увеличением  $\times 100$ , шагом сканирования 125 нм по горизонтали и 10 нм по вертикали.

#### *Методика определения влагосодержания*

Влагосодержание экспонированных образцов определяли по убыли массы образцов в ходе сушки – от состояния без кондиционирования до высушенного. Для этого на аналитических весах дискретностью 0,0001 г каждый образец взвешивали 3 раза, занося результаты в программную оболочку MS Excel с целью контроля качества результатов измерений и дальнейшей обработки полученных данных. Таким образом, сначала образцы взвешивали в состоянии без кондиционирования. Затем на протяжении высушивания их взвешивание проводили с интервалом в один день в течение первой недели. В дальнейшем, по мере стабилизации массы образцов, интервал между взвешиваниями увеличивали до 2 дней и более. Для сушки использовали замкнутые полимерные емкости (ящики с крышкой), на дно которых насыпали регенерированный (прокаленный при 160 °С в течение 3 ч) силикагель. В день взвешивания (по завершении измерения массы образцов) силикагель в емкости заменяли на регенерированный для обеспечения минимального содержания влаги в атмосфере внутри емкости. Сушку образцов проводили, помещая емкости с образцами в сушильные шкафы с температурой, установленной на 60 °С. При достижении образцами постоянной массы их считали полностью высушенными, а массу образцов в высушенном состоянии использовали для определения равновесного влагосодержания в состоянии без кондиционирования. Содержание влаги в образце определяли по формуле

$$\omega_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{m_{\text{МГНВ}} - m_{\text{суш}}}{m_{\text{МГНВ}}} \cdot 100 \%,$$

где  $\omega_{\text{H}_2\text{O}}$  – равновесное влагосодержание образца, %;  $m_{\text{МГНВ}}$  – масса образца в состоянии без кондиционирования после экспозиции;  $m_{\text{суш}}$  – масса образца в высушенном состоянии.

#### *Методика проведения механических испытаний*

Предел прочности при сжатии прошедших экспозицию образцов углепластика ВКУ-39 определяли по ASTM D6641, максимальное напряжение при изгибе – по ASTM D7264. Измерения обеих механических характеристик проводили при температуре 20 и 120 °С. Для определения площади поперечного сечения при вычислении механических показателей использовали ширину и толщину образцов после экспозиции.

### Методика проведения ДМА-испытаний

Исследование температурных изменений в полимерной матрице углепластика ВКУ-39 проводили с помощью установки ДМА. Измерения проводили в режиме трехточечного изгиба в потоке аргона с расходом 70 мл/мин. Размеры образцов составляли 50×10×2 мм соответственно по длине, ширине и толщине. Температуру в камере поднимали с постоянной скоростью 2 К/мин. Механическое воздействие на исследуемый образец осуществляли пуансоном с частотой колебаний 1 Гц, амплитудой колебаний 30 мкм и динамической силой 1,3 при коэффициенте нагрузки 1,3 Н. При испытании образцов, содержащих влагу, в результате нагрева происходит высыхание материала, поэтому процесс измерения проходит при некотором неизвестном градиенте влажосодержания в объеме образца.

В качестве результата измерений посредством программной оболочки измерительного оборудования получали термомеханические зависимости модуля потерь  $E''$  от температуры, графически выраженные в виде кривых с пиком, максимум которого соответствует точке  $\alpha$ -перехода полимерной матрицы ПКМ в высокоэластическое состояние, также называемой температурой стеклования.

Для измерений методом ДМА из плит, полученных из каждой климатической зоны, подготовлено по пять образцов для параллельных измерений. Из полученных в ходе измерений пяти термомеханических кривых, близких по форме и положению пика, выбирали по одной для каждой климатической зоны с целью совместного отображения на графике.

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

### Результаты и обсуждение

#### *Внешний вид образцов углепластика после 3 лет экспозиции*

Состояние поверхности лицевой стороны образцов углепластика после экспозиции в различных климатических зонах отражено на фотографиях, выполненных посредством оптического микроскопа в отраженном свете. Для примера на рис. 1 представлены снимки лицевой поверхности с различной степенью уноса полимерной матрицы образцов, экспонированных в Сьенфуэгосе (Куба) и Звенигороде.

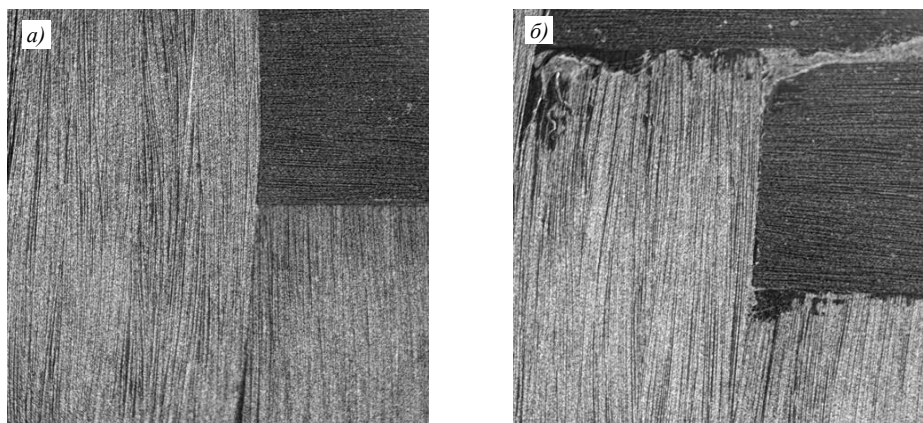


Рис. 1. Увеличенное изображение ( $\times 40$ ) лицевой стороны образцов после трех лет экспозиции в Сьенфуэгосе (Куба) (а) и Звенигороде (б)

На обоих изображениях хорошо различимы выступающие оголенные жгуты углеродных волокон. На рис. 1, б прослеживаются участки с не полностью разрушенной полимерной матрицей в углублениях переплетений жгутов. Целостность

наблюдаемых углеродных волокон и сохранение их параллельной ориентации свидетельствует о поверхностном эрозионном характере разрушения, обусловленном воздействием атмосферных осадков и солнечной радиации.

Представленное на рис. 2 распределение размаха высот на лицевой стороне образца имеет форму Гауссовской кривой и отличается значительной полушириной пика, полученной для всех исследованных образцов.

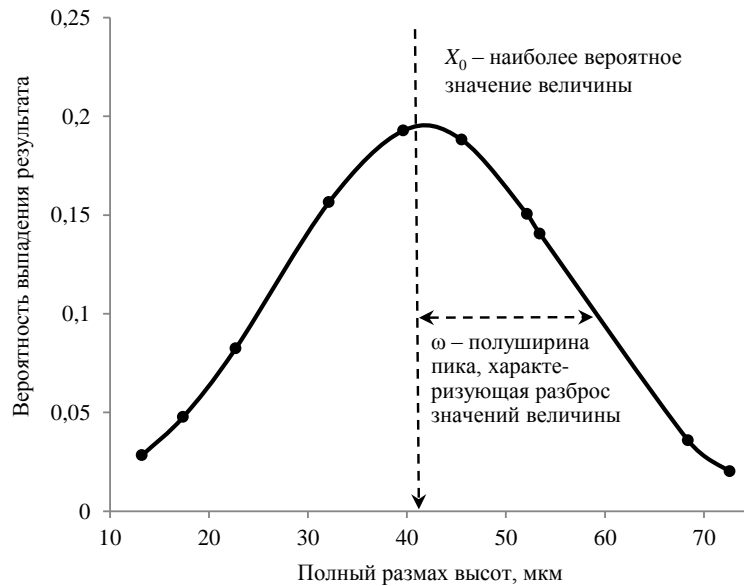


Рис. 2. Распределение размаха высот рельефа поверхности на лицевой стороне образца, прошедшего экспозицию во Владивостоке

При сопоставимости значений полуширины и центра пика, отношения которых в зависимости от зоны экспозиции варьируются в диапазоне 0,24–0,49, серьезные требования предъявляются к количеству измерений для возможности корректного сопоставления средних значений размаха высот у образцов из различных климатических зон. Однако даже при значительном разбросе показателей рельефа можно достичь достоверной оценки показателей рельефа путем увеличения числа снимков.

На рис. 3 показаны снимки оборотной поверхности тех же экспонированных образцов. Суммарная площадь участков с сохранившейся полимерной матрицей оказалась многократно больше, чем на лицевой стороне, что указывает на преобладающее влияние прямого действия солнечной радиации и осадков на деструкцию полимерной матрицы в поверхностном слое.

Тем не менее рассеянная (отраженная) солнечная радиация, роса, иней и другие непрямые атмосферные осадки, а также эрозия ухудшают состояние оборотной стороны, которым нельзя пренебрегать в ходе эксплуатации углепластика ВКУ-39. Эрозионный характер разрушения подтверждается наличием участков поверхности черного цвета с растрескавшейся полимерной матрицей (показаны стрелками на рис. 3, а) и участков светло-серого цвета с частично выкрошившейся полимерной матрицей (показаны стрелками на рис. 3, б).

Полученные результаты позволили дать численную оценку климатического воздействия различных климатических зон (см. таблицу). Оказалось, что площадь участков с сохранившейся полимерной матрицей, нормированная на общую площадь, на оборотной стороне образцов убывает с повышением дозы суммарной солнечной радиации. Эта зависимость показана на рис. 4.

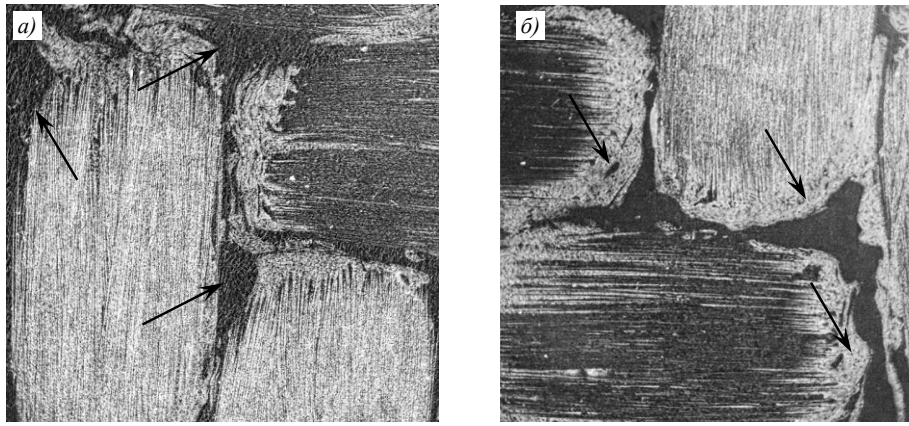


Рис. 3. Увеличенное изображение ( $\times 40$ ) оборотной стороны образцов после трех лет экспозиции в Сьенфуэгос (Куба) (а) и Звенигороде (б)

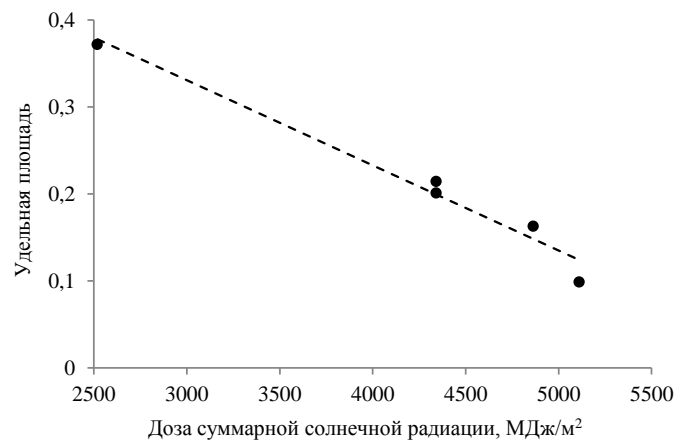


Рис. 4. Зависимость удельной площади участков с остаточной полимерной матрицей на оборотной поверхности образцов от поглощенной дозы суммарной солнечной радиации

Еще одной информативной характеристикой поверхности, показывающей влияние климатической зоны на деструкцию поверхности образцов, оказался размах высот профиля поверхности. Это видно на рис. 5, показывающем, что глубина эрозии полимера из межволоконного пространства на оборотной стороне образцов зависит от дозы поглощенной суммарной солнечной радиации – доминирующего фактора, вызывающего разрушение молекул эпоксидного полимера.

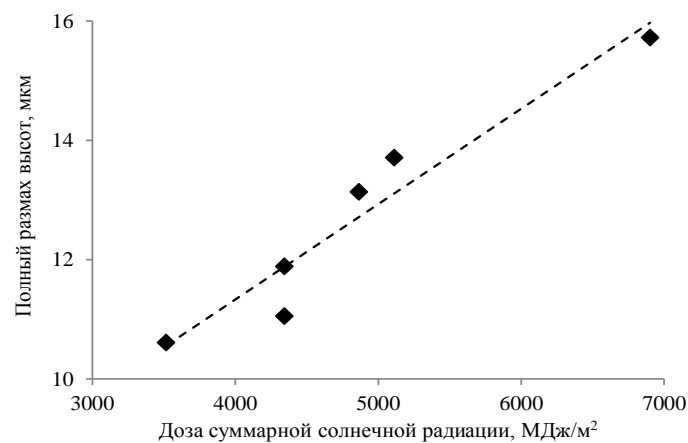


Рис. 5. Зависимость глубины рельефа оборотной поверхности образцов из углепластика от поглощенной в ходе экспозиции солнечной радиации

Несмотря на большую (в 2,5–3 раза) глубину проникновения эрозии в матрицу на лицевой стороне образца (по сравнению с оборотной стороной) удовлетворительной корреляции между дозой солнечной радиации и полным размахом высот не наблюдается, предположительно, ввиду дополнительного наложения влияния прямых атмосферных осадков. Однако обнаружение такой корреляции возможно при многократном увеличении количества фотоснимков с различных участков поверхности.

### *Влагосодержание углепластика после трех лет экспозиции*

На рис. 6 приведена зависимость влагосодержания образцов от экспозиции в климатических зонах, обозначенных соответствующими населенными пунктами. На диаграмме можно выделить максимальное влагосодержание у образцов из Владивостока по сравнению с образцами из остальных зон. Это можно связать с низкой (однако превышающей 0 °С) среднегодовой температурой (метеорологические параметры приведены в таблице), низкой дозой суммарной солнечной радиации, не способствующей высыханию образцов. Кроме того, приморская атмосфера умеренно влажного климата совокупно с интенсивными ветрами в летнее время способствуют значительному насыщению влагой ПКМ [19].

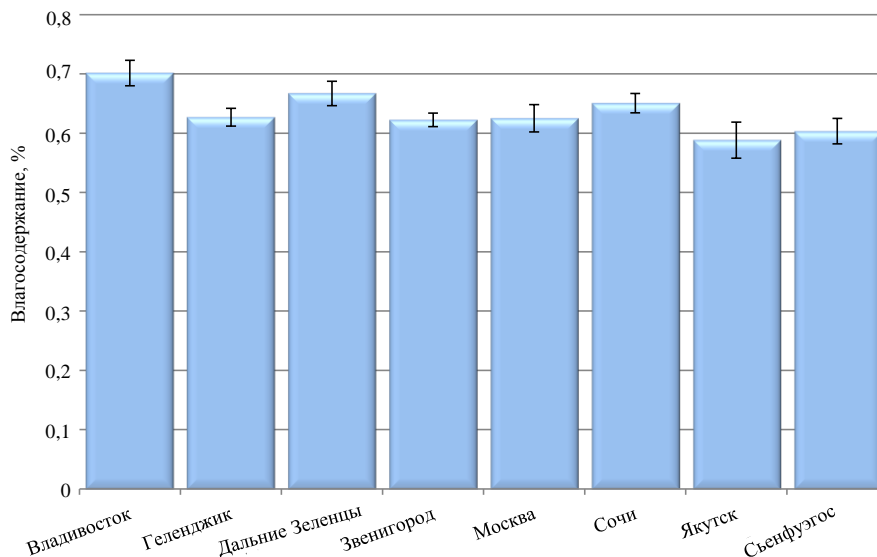


Рис. 6. Влагосодержание образцов из углепластика ВКУ-39 в зависимости от места проведения экспозиции

Менее выраженное повышение влагосодержания отмечено для образцов, проходивших экспозицию в Дальних Зеленцах и Сочи, для которых соответственно характерны высокая влажность и большое количество атмосферных осадков. Наименьшие значения влагосодержания продемонстрировали образцы из Якутска, а также образцы, проходившие экспозицию с Сьенфуэгосе (Куба). В Якутске среднегодовая температура находится ниже 0 °С (указано в таблице), что приводит к снижению содержания паров воды в воздухе и замедляет диффузию влаги в ПКМ. Сравнительно низкие значения влагосодержания у образцов, проходивших экспозицию на Кубе, обусловлены сезонностью тропического климата и съемом образцов в сезон с низким количеством осадков и среднесуточной температурой атмосферного воздуха >20 °С, что способствовало их высыханию. Различия остальных значений влагосодержания не выходят за рамки погрешности.

При сопоставлении влагосодержания образцов со значениями климатических показателей, представленных в таблице, прямой корреляции не наблюдается. Такой характер зависимости можно объяснить наложением таких разнонаправленных эффектов,

как деструкция полимерной матрицы, насыщение образца влагой и его высыхание. Количественная оценка осложняется неконтролируемыми потерями массы при транспортировке образцов. В работе [20] показано что зависимость максимального равновесного содержания паров воды в воздухе от его температуры стремится к экспоненте. Согласно приведенным данным, с ростом температуры при постоянной абсолютной влажности относительная влажность воздуха снижается, а его водоотнимающие свойства резко возрастают. Таким образом, при повышении температуры в ходе экспозиции в результате контакта с ненасыщенным влагой воздухом влагосодержание образцов снижается, в то время как при понижении температуры ниже точки росы образцы склонны сорбировать влагу. Однако при понижении температуры ниже нуля снижается содержание паров воды в воздухе. Например, при среднегодовой температуре в Якутске (см. таблицу)  $-7,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  абсолютная влажность воздуха в  $\sim 2$  раза меньше, чем при  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , и более чем в 6 раз меньше, чем при  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Кроме того, со снижением температуры снижается активность диффузионных процессов, что также затрудняет насыщение влагой материала.

Ввиду инерционности процесса диффузии влаги в ПКМ итоговое влагосодержание является функцией, обусловленной кинетикой протекания чередующихся процессов адсорбции и десорбции влаги. Система «ПКМ–атмосфера» в отношении перераспределения влаги всегда стремится к динамическому равновесию, но не достигает его полностью ввиду изменения климатических параметров окружающей среды. Поэтому прямое сопоставление среднегодовых климатических показателей с влагосодержанием требует дополнительных исследований, не предусмотренных в данной работе.

#### *Изменение механических характеристик после экспозиции*

На рис. 7 приведена диаграмма, которая демонстрирует высокую устойчивость материала ВКУ-39 к трехлетней экспозиции во всех рассматриваемых климатических зонах в отношении сжимающих нагрузок. Показатели прочности в исходном состоянии для комнатной и повышенной температур испытаний отображены пунктирными линиями соответствующего цвета, а разброс исходных значений – областями серого цвета. Так, материал после экспозиции демонстрирует повышение прочности при сжатии на 14 % по отношению к исходному состоянию в случае испытания при температуре  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , что при учете разброса исходных значений прочности можно отнести к вариативности свойств материала.

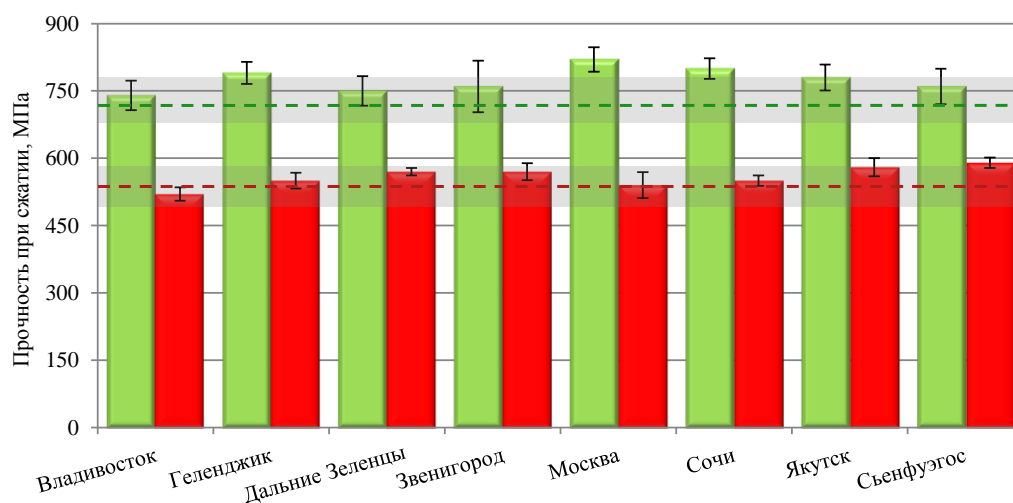


Рис. 7. Изменение предела прочности при сжатии при температурах  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  (■) и  $120\text{ }^{\circ}\text{C}$  (■) образцов из углепластика ВКУ-39 без кондиционирования

При температуре 120 °С исследуемый углепластик также показывает высокую стойкость к климатическим факторам рассматриваемых климатических зон, проявляя незначительные изменения в пределах разброса измеренных значений.

Такие же выводы можно сделать и по результатам определения максимального напряжения при изгибе, представленным в виде диаграммы на рис. 8, где при температуре 20 °С образцы после экспозиции демонстрируют увеличение показателя от незначительного до 14 %. На фоне разброса исходных значений единственное значимое снижение максимального напряжения при изгибе (9 %) показывают образцы, прошедшие экспозицию во Владивостоке, что позволяет сделать вывод о влиянии состояния полимерной матрицы на показатели прочности при изгибе и сжатии.

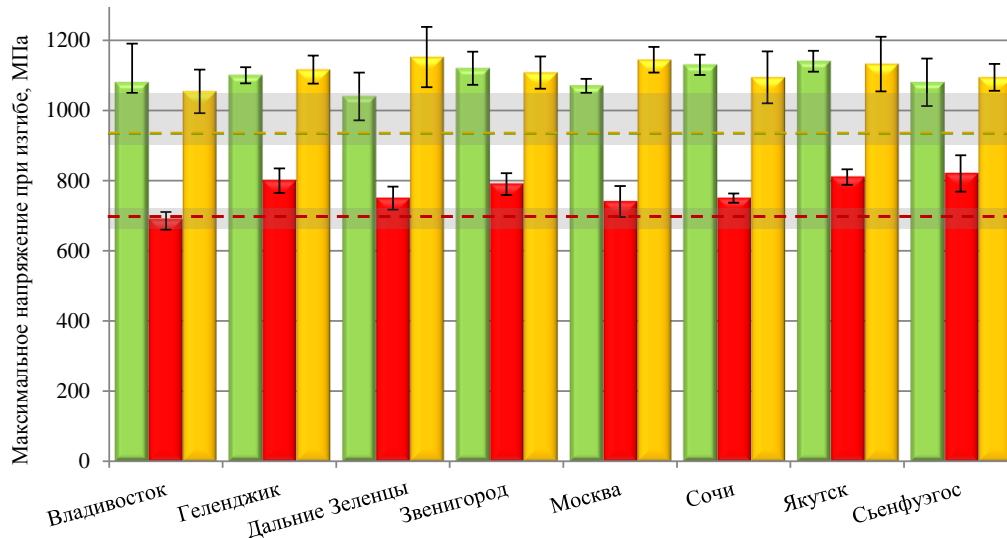


Рис. 8. Максимальное напряжение при изгибе при температурах 20 (■) и 120 °С (■) образцов из углепластика ВКУ-39 без кондиционирования и в высушенном состоянии при 20 °С (■)

Из представленных результатов можно сделать вывод о высокой стойкости углепластика ВКУ-39 к действию климатических факторов восьми климатических зон, выбранных для проведения экспозиции. Кроме того, отсутствие снижения прочности, несмотря на деструкцию полимерной матрицы на лицевой и оборотной сторонах всех экспонированных образцов, является следствием деструкции в поверхностном слое, не приводящей к ухудшению контакта матрицы с волокнами наполнителя в объеме образцов.

### Обсуждение термомеханических зависимостей

На представленных на рис. 9 типичных графиках термомеханических кривых, в отличие от результатов работы [19] (где для материала ВПС-48 на аналогичном связующем ВСЭ-1212 на термомеханических кривых были получены сдвоенных пики модуля потерь  $E''$ ), показан один пик модуля потерь (в области температур 159–165 °С) вне зависимости от зоны экспозиции образцов.

Такое поведение материала, по мнению авторов, характеризует особенности взаимодействия в системе «стекловолокно–влага–полимерная матрица», характерные для стеклопластиков на основе связующего ВСЭ-1212. Одиночные пики на термомеханических кривых показывают отсутствие значительного влияния влаги на взаимодействие «матрица–наполнитель», приведшего в случае стеклопластика ВПС-48 к уширению зоны  $\alpha$ -перехода, появлению сдвоенных пиков и значительному снижению механических показателей. Такая стойкость к влаге ПКМ с углеволоконным наполнителем

обусловлена неполярностью углерод-углеродной ковалентной связи, посредством которой образованы углеродные волокна, и малым числом гидроксильных функциональных групп по сравнению со стекловолокном. Это не позволяет влаге гидратировать волокна наполнителя и изменять взаимодействие между наполнителем и матрицей.

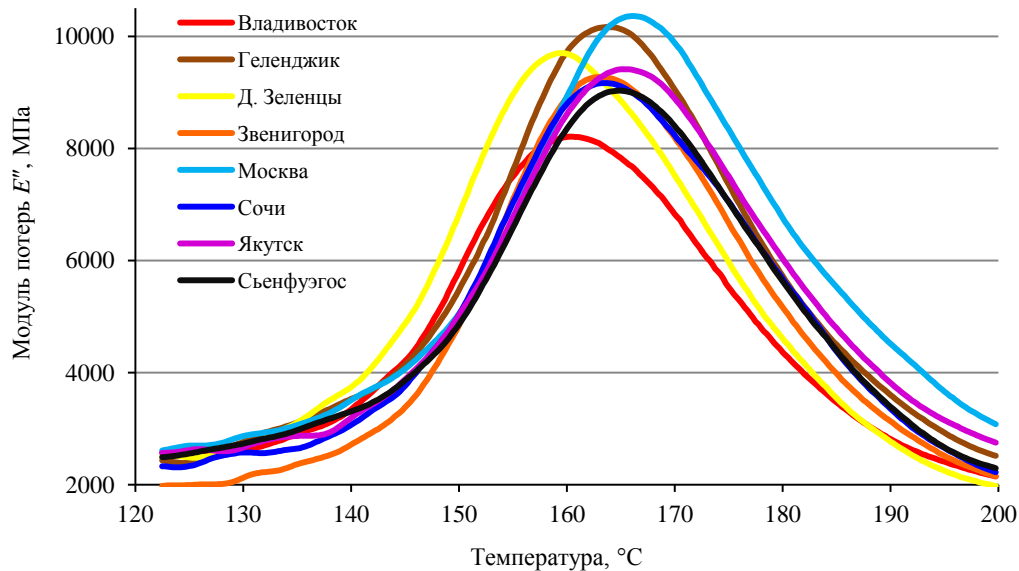


Рис. 9. Температурные зависимости модуля потерь для образцов из углепластика ВКУ-39

На рис. 10 приведена диаграмма зависимости температуры стеклования от зоны экспозиции, где среднее значение температуры стеклования углепластика в исходном состоянии показано пунктирной линией, а разброс результатов отображен областью светло-серого цвета вокруг пунктира. На диаграмме видно снижение температуры стеклования (порядка 10–15 °C) у образцов, прошедших экспозицию, по сравнению с исходным значением ( $175,6 \pm 1,2$  °C), что свидетельствует о заметном изменении состояния эпоксидной матрицы в результате экспозиции.

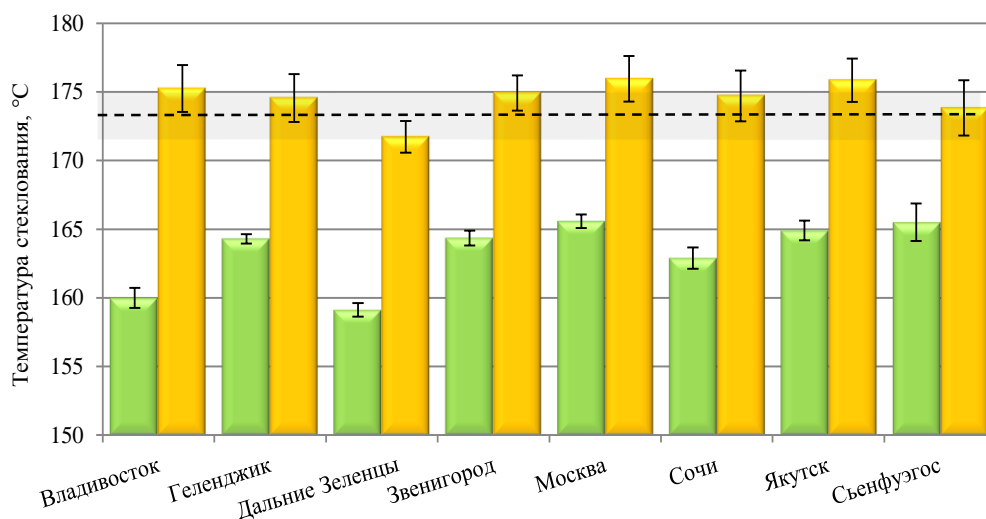


Рис. 10. Температура стеклования в зависимости от зон экспозиции углепластика ВКУ-39 без кондиционирования (■) и в высушенном состоянии (■)

Основной причиной снижения температуры стеклования является проникновение влаги внутрь композита и взаимодействие с полярными кислородсодержащими функциональными группами эпоксидной матрицы, сопровождающееся их гидратацией. Такой эффект приводит к пластификации связующего, сопровождающейся старением полимера и снижением температуры перехода в высокоэластическое состояние. Наименьшее значение показателя характерно для климатических зон Владивостока и поселка Дальние Зеленцы, что, однако, лишь частично подтверждается снижением механических показателей в случае образцов, проходивших экспозицию во Владивостоке. Авторы данной статьи предполагают, что снижение температуры стеклования под действием климата в поселке Дальние Зеленцы происходило с наложением иного механизма деградации связующего по сравнению с другими климатическими зонами.

Узкий диапазон значений влагосодержания не позволил выявить влияния зоны экспонирования на изменение прочностных показателей. Это также значит, что значения влагосодержания ПКМ в течение времени экспозиции не колебались настолько, чтобы привести к изменению прочности образцов. Такую зависимость удалось обнаружить для прочностных показателей, измеренных при повышенной температуре. На рис. 11 наблюдается тенденция к снижению прочности (при изгибе и сжатии) с увеличением влагосодержания в материале. Поэтому при оценке состояния ПКМ при повышенных температурах необходимо контролировать влагосодержание для оценки возможного снижения их прочности.

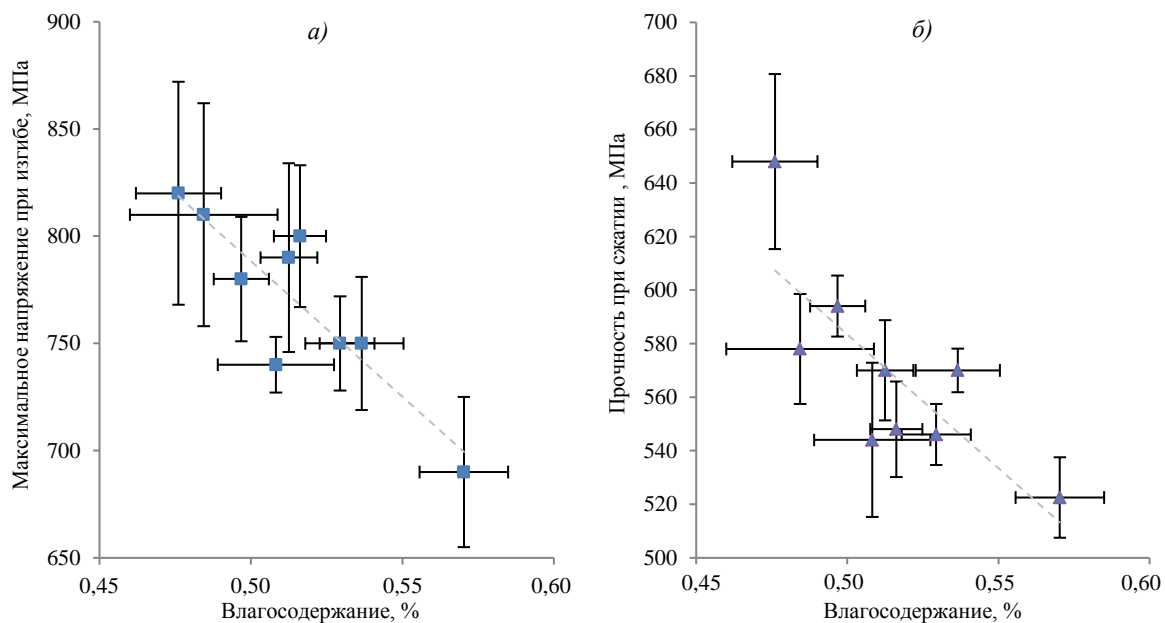


Рис. 11. Максимальное напряжение при изгибе (а) и прочность при сжатии (б) при температуре 120 °С в зависимости от влагосодержания образцов из углепластика ВКУ-39 после экспозиции в различных зонах

Данные, представленные на рис. 10, позволяют выявить аналогичную корреляцию снижения температуры стеклования с повышением влагосодержания в углепластике. Подобная корреляция была определена ранее для стеклопластика ВПС-48 [19].

Таким образом, на примере углепластика ВКУ-39 показана его стойкость (несмотря на деструкцию поверхностных слоев полимерной матрицы) к широкому спектру климатических воздействий: температуры экспозиции, суммарной дозы солнечной радиации, влажности воздуха и объема осадков в течение трех лет. При этом у

образцов из ПКМ в условиях умеренно влажного климата Владивостока наблюдали наибольшее увеличение влагосодержания в полимерной матрице углепластика, что привело к снижению температуры стеклования и заметному снижению показателей прочности материала при повышенной температуре (120 °С) вследствие эффекта пластификации полимера. По аналогии с результатами работ [19, 21] можно утверждать, что углепластик ВКУ-39 стоек к воздействию климатических факторов, но чувствителен к воздействию влаги.

### Заключения

Установлено, что деградация поверхностных слоев матрицы в течение трех лет экспозиции в восьми климатических зонах не оказывает значимого влияния на прочностные свойства углепластика ВКУ-39.

Высокая влажность, низкая среднегодовая температура, а также муссонный характер климата Владивостока способствует достижению максимального влагосодержания в образцах из углепластика в сравнении с аналогичными образцами, экспонированными в других климатических зонах.

Прочность при повышенной температуре (120 °С) образцов из углепластика после экспозиции снижается с увеличением в них влагосодержания.

Чувствительными индикаторами агрессивности различных климатических зон для образцов из углепластика ВКУ-39 являются удельная площадь участков с остатками полимерной матрицы и глубина рельефа на оборотной стороне образцов, значения которых зависят от дозы солнечной радиации.

### Список источников

1. Нурмухаметова А.Н., Зенитова Л.А. Углеродное волокно. Конъюнктура рынка, структура спроса, перспективные рынки продуктов на его основе, области применения // Бутлеровские сообщения. 2022. Т. 72. № 10. С. 102–130. DOI: 10.37952/ROI-jbc-01/2272-10-102.
2. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения – основа инноваций, технологического лидерства и национальной безопасности России // Интеллект и технологии. 2016. № 2. С. 16–22.
3. Молчанов Б.И., Гудимов М.М. Свойства углепластиков и области их применения // Авиационная промышленность. 1997. № 3-4. С. 58–60.
4. Лебедева О.В., Сипкина Е.И. Полимерные композиты и их свойства // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2022. Т. 12. № 2 (41). С. 192–207. DOI: 10.21285/2227-2925-2022-12-2-192-207.
5. Колесник К.А. Моделирование влагонасыщения полимерных композитов в реальных климатических условиях // Авиационные материалы и технологии. 2017. № 4 (49). С. 77–86. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-4-77-86.
6. Каблов Е.Н., Лаптев А.Б., Прокопенко А.Н., Гуляев А.И. Релаксация полимерных композиционных материалов под длительным действием статической нагрузки и климата (обзор). Часть 1. Связующие // Авиационные материалы и технологии. 2021. № 4 (65). Ст. 08. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 23.12.2022). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-70-80.
7. Донецкий К.И., Караваев Р.Ю., Быстрикова Д.В., Мишун М.И. Свойства углепластика на основе биаксиальной объемно-армирующей плетеной преформы для изготовления элементов трубчатых конструкций // Конструкции из композиционных материалов. 2022. № 2 (166). С. 8–14. DOI: 10/52190/2073-2562\_2022\_2\_8.
8. Мишуров К.С., Мишкин С.И. Влияние внешней среды на свойства углепластика ВКУ-39 // Труды ВИАМ. 2016. № 12 (48). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 23.12.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-12-8-8.

9. Имамединов Э.Ш., Кондрашов С.В., Гуляев И.Н., Терехов И.В. Сравнительная оценка влияния модификации термопластичными порошками на величину остаточной прочности при сжатии углепластика // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2022. № 7. С. 22–31.
10. Гуляев А.И., Яковлев Н.О., Крылов В.Д., Лашов О.А. Применение фрактографического анализа при исследовании межслоевого разрушения ПКМ // Авиационные материалы и технологии. 2017. № 3 (48). С. 65–73. DOI: 10.18577/9140-2071-2017-0-3-65-73.
11. Семенова Л.В., Нефедов Н.И. Технология восстановления систем ЛКП с полиуретановыми эмалями для эксплуатируемых изделий АТ после удаления старых ЛКП // Авиационные материалы и технологии. 2014. № S3. С. 47–50. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-s3-47-50.
12. Яковлев Н.О., Гуляев А.И., Лашов О.А. Трещиностойкость слоистых полимерных композиционных материалов (обзор) // Труды ВИАМ. 2016. № 4 (40). Ст. 12. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 23.12.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-4-12-12.
13. Сорокин А.Е., Иванов М.С., Сагомонова В. А. Термопластичные полимерные композиционные материалы на основе полиэфирэфиркетонов различных производителей // Авиационные материалы и технологии. 2022. № 1 (66). Ст. 04. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 23.12.2022). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-1-41-50.
14. Гуляева А.Г., Сидорина А.И., Курносов А.О., Клименко О.Н. Полимерные композиционные материалы нового поколения на основе связующего ВСЭ-1212 и наполнителей, альтернативных наполнителям фирм Porcher Ind. и Toho Tenax // Авиационные материалы и технологии. 2018. № 3 (52). С. 18–26. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-3-18-26.
15. Чертищев В.Ю., Оспенникова О.Г., Бойчук А.С., Диков И.А., Генералов А.С. Определение размера и глубины залегания дефектов в многослойных сотовых конструкциях из ПКМ по величине механического импеданса // Авиационные материалы и технологии. 2020. № 3 (60). С. 72–94. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-3-72-94.
16. Донецкий К.И., Тимошков П.Н., Сафронов А.М. Безавтоклавное формование препрегов // Конструкции из композиционных материалов. 2022. № 1 (165). С. 29–34. DOI: 10.52190/2073-2562\_2022\_1\_29.
17. Мараховский П.С., Воробьев Н.Н., Гуляев А.И., Ткачук А.И. Влияние добавок полиарилсульфона на климатическую стойкость углепластика на эпоксидной основе // Высокомолекулярные соединения. Серия А. 2022. Т. 64. № 2. С. 113–119.
18. Струнгарь Е.М., Староверов О.А., Лунегорова Е.М. Комплексная оценка процессов усталостного накопления повреждений и разрушения образцов с концентраторами напряжения эксплуатационного характера // Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures. 2022. № 4. С. 37–49. DOI: 10.17804./2410.-08.2022.4.037.-049.
19. Велигодский И.М., Коваль Т.В., Курносов А.О., Мараховский П.С. Исследование климатической стойкости образцов стеклопластика после натурной экспозиции в различных климатических зонах // Труды ВИАМ. 2022. № 11 (117). Ст. 12. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 23.12.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-11-134-148.
20. Сальников В.Г., Старцев О.В., Лебедев М.П., Копырин М.М., Вапиров Ю.М. Влияние суточных и сезонных изменений относительной влажности и температуры на влагонасыщение углепластика в открытых климатических условиях // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2022. № 5. С. 2–10.
21. Донецкий К.И., Караваев Р.Ю., Цыбин А.И., Вешкин Е.А., Михадькин Е.С. Конструкционный стеклопластик для изготовления элементов шпунтовых ограждений // Авиационные материалы и технологии. 2017. № 3 (48). С. 56–64. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-3-56-64.

### References

1. Nurmukhametova A.N., Zenitova L.A. Carbon fiber. Market conditions, demand structure, promising markets for products based on it, areas of application. *Butlerovskiye soobshcheniya*, 2022, vol. 72, no. 10, pp. 102–130. DOI: 10.37952/ROI-jbc-01/2272-10-102.

2. Kablov E.N. Materials of the new generation – the basis of innovation, technological leadership and national security of Russia. *Intellekt i tekhnologii*, 2016, no. 2, pp. 16–22.
3. Molchanov B.I., Gudimov M.M. Properties of carbon plastics and their applications. *Aviatsionnaya promyshlennost*, 1997, no. 3-4, pp. 58–60.
4. Lebedeva O.V., Sipkina E.I. Polymer composites and their properties. *Izvestiya vuzov. Prikladnaya khimiya i biotekhnologiya*, 2022. Vol. 12. No. 2 (41), pp. 192–207. DOI: 10.21285/2227-2925-2022-12-2-192-207.
5. Kolesnik K.A. Modeling of moisture saturation in polymer composites in real climatic environmental conditions. *Aviacionnye materialy i tekhnologii*, 2017, no. 4 (49), pp. 77–86. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-4-77-86.
6. Kablov E.N., Laptev A.B., Prokopenko A.N., Gulyaev A.I. Relaxation of polymeric composite materials under the prolonged action of static load and climate (review). Part 1. Binders. *Aviation materials and technologies*, 2021, no. 4 (65), paper no. 08. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: December 23, 2022). DOI: 10.18577/2071-9140-2021-0-4-70-80.
7. Donetsky K.I., Karavaev R.Yu., Bystrikova D.V., Mishchun M.I. Properties of carbon fiber reinforced plastic based on a biaxial volume-reinforcing braided preform for the manufacture of elements of tubular structures. *Konstruktsii iz kompozitsionnykh materialov*, 2022, no. 2 (166), pp. 8–14. DOI: 10.52190/2073-2562\_2022\_2\_8.
8. Mishurov K.S., Mishkin S.I. Environmental effect on properties of CFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastic) VKU-39. *Trudy VIAM*, 2016, no. 12 (48), paper no. 08. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: December 23, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-12-8-8.
9. Imametdinov E.Sh., Kondrashov S.V., Gulyaev I.N., Terekhov I.V. Comparative evaluation of the effect of modification with thermoplastic powders on the value of residual compressive strength of carbon fiber. *Vse materialy. Entsiklopedicheskiy spravochnik*, 2022, no. 7, pp. 22–31.
10. Gulyaev A.I., Yakovlev N.O., Krylov V.D., Lashov O.A. Application of fractographic analysis in the study of interlayer fracture of PCM. *Aviacionnye materialy i tekhnologii*, 2017, no. 3 (48), pp. 65–73. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-3-65-73.
11. Semyonova L.V., Nefyodov N.I. Recovery technology for PWC systems with polyurethane enamel for the operating aviation articles after wornout PLC removal. *Aviacionnye materialy i tekhnologii*, 2014, no. S3, pp. 47–50. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-s3-47-50.
12. Yakovlev N.O., Gulyaev A.I., Lashov O.A. Crack firmness of layered polymeric composite materials (review). *Trudy VIAM*, 2016, no. 4, paper no. 12. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: December 23, 2022) DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-4-12-12.
13. Sorokin A.E., Ivanov M.S., Sagomonova V.A. Thermoplastic polymer composite materials based on polyetheretherketones of various manufacturers. *Aviation materials and technologies*, 2022, no. 1 (66), paper no. 04. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: December 23, 2022). DOI: 10.18577/2071-9140-2022-0-1-41-50.
14. 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 tekhnologii*, 2018, no. 3 (52), pp. 18–26. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-3-18-26.
15. Chertishchev V.Yu., Ospennikova O.G., Boichuk A.S., Dikov I.A., Generalov A.S. Determination of the size and depth of defects in multilayer PCM honeycomb structures based on the mechanical impedance value. *Aviacionnye materialy i tekhnologii*, 2020, no. 3 (60), pp. 72–94. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-3-72-94.
16. Donetsky K.I., Timoshkov P.N., Safronov A.M. Non-autoclave molding of prepregs. *Konstruktsii iz kompozitsionnykh materialov*, 2022, no. 1 (165), pp. 29–34. DOI: 10.52190/2073-2562\_2022\_1\_29.
17. Marakhovsky P.S., Vorobyov N.N., Gulyaev A.I., Tkachuk A.I. Influence of polyarylsulfone additives on the climatic resistance of epoxy-based carbon fiber. *Vysokomolekulyarnye soyedineniya. Seriya A*, 2022, vol. 64, no. 2, pp. 113–119.

18. Strungar E.M., Staroverov O.A., Lunegorova E.M. Comprehensive assessment of the processes of fatigue accumulation of damage and destruction of samples with operational stress concentrators. *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures*, 2022, no 4, pp. 37–49. DOI: 10.17804./2410.-08.2022.4.037.-049.
19. Veligodskiy I.M., Koval T.V., Kurnosov A.O., Marakhovskiy P.S. Study of resistance of glass fiber reinforced plastic to natural weathering in different climatic conditions. *Trudy VIAM*, 2022, no. 11 (117), paper no. 12. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: December 23, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-11-134-148.
20. Salnikov V.G., Startsev O.V., Lebedev M.P., Kopyrin M.M., Vapirov Yu.M. Influence of daily and seasonal changes in relative humidity and temperature on the moisture saturation of carbon fiber in open climatic conditions. *Vse materialy. Entsiklopedicheskiy spravochnik*, 2022, no. 5, pp. 2–10.
21. Donetskii K.I., Karavayev R.Yu., Tsybin A.I., Veshkin E.A., Mikhaldykin E.S. Constructional fiberglass plastic for manufacturing of enclosing sheeting elements. *Aviacionnyye materialy i tehnologii*, 2017, no. 3 (48), pp. 56–64. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-3-56-64.

*Информация об авторах*

**Велигодский Илья Михайлович**, инженер 1 категории, к.х.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Коваль Татьяна Васильевна**, начальник сектора, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Гуляев Иван Николаевич**, заместитель начальника лаборатории по науке, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

*Information about the authors*

**Ilya M. Veligodskiy**, First Category Engineer, Candidate of Sciences (Chem.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Tatiana V. Koval**, Head of Sector, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Ivan N. Gulyaev**, Deputy Head of Laboratory of Science, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

Статья поступила в редакцию 31.01.2023; получена после доработки 26.05.2025; одобрена и принята к публикации после рецензирования 30.05.2023.  
The article was submitted 31.01.2023; received in revised form 26.05.2025; approved and accepted for publication after reviewing. 30.05.2023.