

Научная статья

УДК 678.067.5

DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-1-85-101

КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА ВОЗДЕЙСТВИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ И КЛИМАТИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ НА ИЗМЕНЕНИЕ ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ С ФОРМООБРАЗОВАНИЕМ ПРИ ТЕМПЕРАТУРАХ ДО 40 °С*
Часть 2. Углепластик марки ВКУ-51

А.А. Евдокимов¹, В.С. Ерасов¹, Е.Н. Каблов, А.Б. Лаптев¹

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

***Аннотация.** Проведена комплексная оценка сохраняемости прочностных свойств углепластика марки ВКУ-51 при растяжении, сжатии и изгибе в температурном диапазоне от –60 до +80 °С в исходном состоянии и после климатических испытаний в камере тропического климата и тепловлажностного старения в течение 1 и 3 мес., а также после теплового старения в течение 500, 1000, 1500 и 2000 ч. Изучено влияние микологической среды и горюче-смазочных автомобильных жидкостей на предел прочности при изгибе и изменение массы углепластика.*

***Ключевые слова:** углепластик, физико-механические характеристики, эксплуатационные факторы, сохраняемость свойств*

***Для цитирования:** Евдокимов А.А., Ерасов В.С., Каблов Е.Н., Лаптев А.Б. Комплексная оценка воздействия эксплуатационных и климатических испытаний на изменение прочностных свойств полимерных композиционных материалов с формообразованием при температурах до 40 °С. Часть 2. Углепластик марки ВКУ-51 // Труды ВИАМ. 2026. № 1 (155). С. 85–101. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-1-85-101.*

Scientific article

COMPREHENSIVE ASSESSMENT OF THE IMPACT OF OPERATIONAL AND CLIMATIC TESTS ON THE CHANGE OF STRENGTH PROPERTIES OF POLYMER COMPOSITE MATERIALS WITH SHAPING AT TEMPERATURES UP TO 40 °C
Part 2. Carbon fiber grade VKU-51

A.A. Evdokimov¹, V.S. Erasov¹, E.N. Kablov, A.B. Laptev¹

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

***Abstract.** A comprehensive assessment of the durability of the strength properties of carbon fiber grade VKU-51 under tension, compression and bending in the temperature range from –60 to +80 °C in the initial state and after after climatic tests in a tropical climate and heat-humidity aging chamber to operating factors such as in a tropical climate chamber and heat-humidity aging for 1 and 3 months, as well as thermal aging for 500, 1000, 1500 and 2000 hours was carried out. The influence of mycological environment and fuel and lubricants of automobile fluids on the bending strength limit of carbon fiber reinforced plastic and weight gain was studied.*

***Keywords:** carbon fiber, physical and mechanical characteristics, operational factors, durability of properties*

* Часть 1 – см. «Труды ВИАМ», № 11 (153), 2025.

For citation: Evdokimov A.A., Erasov V.S., Kablov E.N., Laptev A.B. Comprehensive assessment of the impact of operational and climatic tests on the change of strength properties of polymer composite materials with shaping at temperatures up to 40 °C. Part 2. Carbon fiber grade VKU-51. *Trudy VIAM*, 2026, no. 1 (155), pp. 85–101. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-1-85-101.

Введение

В первой части данной статьи представлены результаты исследований влияния эксплуатационных факторов на физико-механические характеристики стеклопластика ВПС-58, применяемого для изготовления листов профилированного настила, который предназначен для возведения малых арочных засыпных мостов (рис. 1) [1]. Кроме того, для изготовления несъемной арочной опалубки круглого сечения диаметром 300 мм используют углепластик ВКУ-51.



Рис. 1. Автомобильный арочный двухполосный мост в р. п. Языково Корсунского района Ульяновской области

Неоспоримым преимуществом использования разработанных материалов в мостостроении является возможность изготовления несущих конструкций непосредственно на строительной площадке или вблизи нее без применения крупногабаритного оборудования. Разработанная технология подразумевает использование для пропитки армирующего наполнителя методом вакуумной инфузии эпоксивинилэфирного связующего холодного отверждения, что обеспечивает стойкость получаемых материалов к воздействию различных эксплуатационных факторов [2–5].

Габариты углепластиковой опалубки могут достигать 15 м в длину и 6 м в высоту. Опалубка, заполненная бетонной смесью, обладает значительной несущей способностью благодаря эффекту пространственно сжатого состояния, наблюдающегося в процессе нагружения всей конструкции [6]. Для достижения высокой несущей способности необходимо соблюдение следующих условий:

- упруго-прочностные характеристики материала опалубки должны превосходить характеристики бетонной смеси, используемой для заполнения арочного элемента;
- бетонная смесь должна образовывать с армирующей опалубкой единую конструкцию, т. е. при заполнении арочного элемента не должно возникать внутренних пустот как в объеме бетонной смеси, так и на границе «полимерный композиционный материал (ПКМ)–бетон» [6–8].

Если для выполнения второго условия достаточно использовать безусадочную бетонную смесь и при заполнении пространства внутри опалубки применять погружные виброустройства, то для реализации первого условия необходимо применение материала, обладающего комплексом требуемых характеристик, прежде всего при приложении растягивающих нагрузок [9, 10].

Это обусловлено тем, что для создания эффекта пространственно сжатого состояния в арочной трубобетонной конструкции требуется компенсировать поперечные напряжения, образующиеся в бетоне в процессе нагружения. Для этого материал оболочки должен обладать упруго-прочностными характеристиками, превышающими показатели бетона. Причем арочная оболочка при данном типе нагружения будет воспринимать растягивающие нагрузки, вызванные расширением бетона при сжатии. Поскольку коэффициент Пуассона при сжатии бетона равен $0,17-0,20$, то растягивающие нагрузки могут достигать значительных величин. Прочность бетона при сжатии составляет 45 МПа, модуль упругости: 36 ГПа [11–13]. Чтобы арочная оболочка обеспечивала эффект трубобетона, углепластик должен иметь модуль упругости при растяжении ≥ 36 ГПа, а прочность при растяжении по закону Гука (с учетом удлинения при разрушении углепластиков $\sim 1,2\%$) должна составлять ≥ 432 МПа [9, 14]. С учетом коэффициента запаса упруго-прочностных характеристик $10-15\%$ установлены минимальные требования к прочности (500 МПа) и модулю упругости при растяжении (40 ГПа).

Однако, кроме определения упруго-прочностных характеристик при растяжении, для подтверждения работоспособности материала в составе конструкции требуется проведение всесторонних исследований, включающих физико-механические испытания при различных видах нагружения и изучение влияния факторов внешней среды, воздействующих на изделие при эксплуатации. Оценке влияния этих факторов на физико-механические характеристики углепластика марки ВКУ-51 посвящена данная статья.

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 13. «Полимерные композиционные материалы» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [15].

Материалы и методы

Общую квалификацию углепластика марки ВКУ-51 на основе среднепрочного углеродного жгута и эпоксивинилэфирного связующего с формообразованием в интервале температур от 15 до 40 °С осуществляли на трех партиях [9]. Для проведения исследований изготовлено 36 плит углепластика. Для определения влияния угла ориентации армирующего наполнителя на упруго-прочностные характеристики углепластика изготовили образцы с двумя типами укладки: ортогональной и конструктивной (рукавной). При ортогональной укладке ось армирования наполнителя совпадает с осью приложения нагрузки. Конструктивная укладка максимально приближена к укладке, реализованной в арочном элементе, – ось армирования наполнителя не совпадает с осью приложения нагрузки (рис. 2).

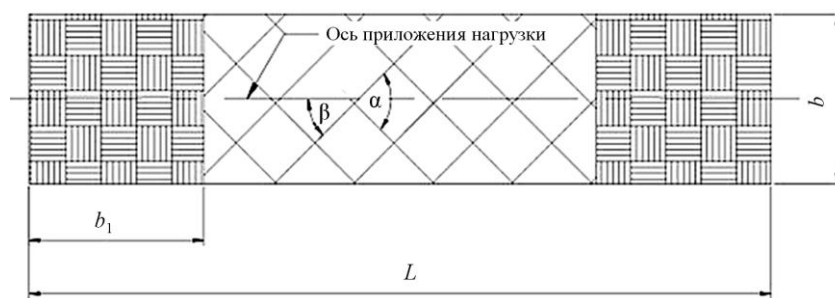


Рис. 2. Схематичное изображение образца углепластика с конструктивной укладкой: α – угол ориентации армирующего наполнителя, β – угол между осью приложения нагрузки и осью армирования, L – длина образца, b – ширина образца, b_1 – длина зоны зажима

Для рукавной укладки угол ориентации армирующего наполнителя α и угол между осью приложения нагрузки и осью армирования β составляют 30 и 15 градусов, для ортогональной укладки: 0 и 0 градусов соответственно.

При ортогональной схеме армирования слои наполнителя в направлении 90 градусов чередовали со слоями в направлении 0 градусов. Схема армирования представлена на рис. 3.

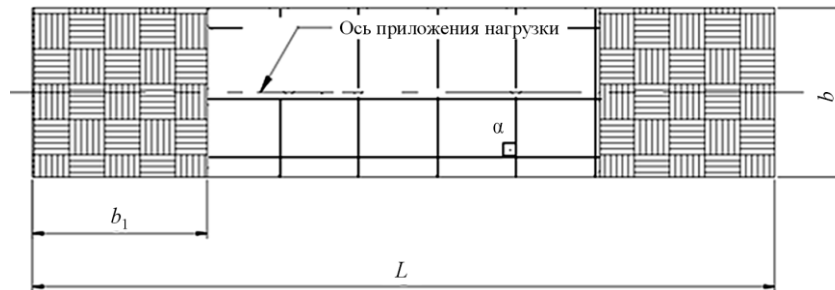


Рис. 3. Схематичное изображение образца углепластика с ортогональной укладкой: α – угол ориентации армирующего наполнителя, L – длина образца, b – ширина образца, b_1 – длина зоны зажима

В данном случае угол β составляет 0 градусов, т.е. в направлении 0 и 90 градусов материал является равнопрочным. Количество слоев наполнителя в ПКМ определяли исходя из толщины монослоя, рассчитанного по ГОСТ Р 56682–2015 (метод II). Для этого изготовлены плиты углепластика размером 300×300 мм с разным количеством слоев. Установлено, что толщина монослоя составляет 0,16 мм. Исходя из этого, отформованы плиты, толщина которых составила 2,4–2,5 мм (15 слоев наполнителя с расположением $[90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ]$). При конструктивной укладке, полученной при изготовлении плетеной преформы из трех слоев наполнителя, толщина плиты ПКМ равна 2,4 мм. Таким образом, толщина всех плит, изготовленных с различными схемами армирования наполнителя, была одинаковой. Образцы для проведения испытаний отбирали в равной мере из трех партий материала.

Влияние факторов нагружения на материал, представленных в табл. 1, оценивали при температурах -60 , $+20$, $+60$ и $+80$ °С. Исследования малоциклового усталости (при коэффициенте асимметрии $R = 0,1$), длительной прочности и ползучести ПКМ проводили при температуре 20 °С.

Таблица 1

Параметры испытаний при определении упруго-прочностных характеристик углепластика ВКУ-51

Вид нагружения	Нормативный документ	Количество испытанных образцов, шт.
Растяжение	ГОСТ 25.601–80	90
Сжатие	ГОСТ 25.602–80	75
Изгиб	ГОСТ 25.604–82	75
Малоцикловая усталость	ГОСТ 25.502–79	20
Длительная прочность	ОСТ 1 90068–79	21
Ползучесть	ОСТ 1 90075–79	21

Для оценки влияния эксплуатационных факторов образцы углепластика выдерживали в климатических камерах (при повышенной температуре для определения теплового ресурса, в тепловлажностных условиях (при температуре $T = 60$ °С, влажности

$\varphi = 85 \pm 2 \%$ и при $T = 28 \text{ }^\circ\text{C}$, $\varphi = 98 \pm 2 \%$), микологической камере и камере тропического климата), а также в жидкостях, взаимодействующих с арочной оболочкой моста при эксплуатации (вода, автомобильные топлива и масла). Условия выдержки определяли исходя из факторов воздействия на материал при эксплуатации и на основании анализа научно-технической литературы [16–22].

Физические свойства углепластика оценивали по показателям плотности и температуры стеклования. Плотность определяли методом гидростатического взвешивания по ГОСТ 15139–69, температуру стеклования – методом динамического механического анализа по СТО 1-595-36-464–2015.

После экспозиции образцы испытывали на трехточечный изгиб по ГОСТ 25.604–83 при температуре $20 \text{ }^\circ\text{C}$ и определяли температуру стеклования, полученные характеристики сравнивали с исходными значениями. В ходе выдержки оценивали изменение массы образцов. Испытано по пять образцов после воздействия каждого исследуемого фактора.

Тепловой ресурс определяли при температурах 60 и $80 \text{ }^\circ\text{C}$ по СТП 1-595-101–83. Для этого образцы помещали в термошкаф и выдерживали при температуре $60 \text{ }^\circ\text{C}$ в течение 500, 1000, 1500, 2000 ч и при температуре $80 \text{ }^\circ\text{C}$ в течение 500, 1000 ч.

Тепловлажностные испытания проводили по ГОСТ 12020–72 (заменен на ГОСТ 12020–2018). Для этого образцы помещали в камеру и экспонировали при $T = 60 \text{ }^\circ\text{C}$ и $\varphi = 85 \%$ в течение 30 и 60 сут.

Экспозицию в камере тропического климата проводили по СТП 1.595-20-100–2002. В камере реализовывался следующий суточный режим в течение 1, 2 и 3 мес.: 8 ч при $T = 50 \text{ }^\circ\text{C}$ и $\varphi = 98 \pm 2 \%$; 12 ч при $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ и $\varphi = 98 \pm 2 \%$; 4 ч при $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ и $\varphi = 60 \pm 2 \%$.

Испытания на водопоглощение проводили по ГОСТ 12020–72. Для этого образцы помещали в эксикатор, заполненный дистиллированной водой, и выдерживали в течение 1, 5, 10, 20 и 30 сут при комнатной температуре ($23 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$).

Испытания на грибостойкость проводили по ГОСТ 9.049–91 (метод 1). Для этого на образцы наносили суспензию, содержащую споры грибов *Aspergillus niger* van Tieghem, *Aspergillus terreus* Thorn, *Aspergillus oryzae* (Ahlburg) Cohn, *Penicillium funiculosum* Thom, *Penicillium cyclopium* Westling, *Penicillium chrysogenum* Thom, *Trichoderma viride* Pers ex Fr, *Chaetomium globosum* Kunze, *Paecilomyces varioti* Bainier. Зараженные образцы выдерживали в камере в течение 1, 2 и 3 мес. при $T = 28 \text{ }^\circ\text{C}$ и $\varphi = 98 \pm 2 \%$. После съема образцы исследовали под микроскопом для определения степени поражения спорами грибов.

Выдержку в автомобильном топливе проводили в течение 30 сут по ГОСТ 12020–72. Для этого образцы выдерживали в течение 30 сут в моторном масле вязкостью 4–8 и 20–24 $\text{мм}^2/\text{с}$, бензине марки АИ-92 и дизельном топливе марки Л.

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

Результаты и обсуждение

В первую очередь определили плотность углепластика ($1510 \pm 10 \text{ кг/м}^3$) и температуру стеклования ($104 \text{ }^\circ\text{C}$). После этого проведены испытания образцов с ортогональной укладкой армирующего наполнителя на растяжение при температурах -60 , $+20$, $+60$ и $+80 \text{ }^\circ\text{C}$. Результаты испытаний представлены в табл. 2.

Образцы углепластика ВКУ-51 удовлетворяют требованиям технического задания по рабочему интервалу температур, прочности и модулю упругости при растяжении. Уровень сохранения прочности и модуля упругости при температуре $80 \text{ }^\circ\text{C}$ составил 87 и 95 % соответственно.

Таблица 2

**Результаты испытаний образцов углепластика ВКУ-51
с ортогональной укладкой на растяжение**

Характеристика	Направление приложения нагрузки, градус	Требования технического задания	Значения характеристик при температуре испытания, °С			
			-60	+20	+60	+80
Предел прочности, МПа	0	≥500	$\frac{585-915}{705}$	$\frac{610-830}{729}$	$\frac{580-780}{645}$	$\frac{510-785}{640}$
	90	–	–	$\frac{680-930}{808}$	–	–
Модуль упругости, ГПа	0	≥40	$\frac{52-72}{60}$	$\frac{59-62}{61}$	$\frac{58-71}{63}$	$\frac{52-64}{58}$
	90	–	–	$\frac{59-63}{60}$	–	–
Относительное удлинение, %	0	–	$\frac{1,0-1,4}{1,2}$	$\frac{1,0-1,3}{1,2}$	$\frac{0,9-1,1}{1,0}$	$\frac{0,8-1,4}{1,1}$
	90	–	–	$\frac{1,2-1,3}{1,3}$	–	–
Коэффициент Пуассона	0	–	$\frac{0,03-0,12}{0,07}$	$\frac{0,03-0,15}{0,07}$	$\frac{0,03-0,11}{0,07}$	$\frac{0,04-0,16}{0,11}$
	90	–	–	$\frac{0,05-0,10}{0,08}$	–	–

Примечание. В числителе приведен диапазон значений, в знаменателе – среднее арифметическое значение.

Результаты испытаний образцов с ортогональной укладкой армирующего наполнителя на сжатие при температурах –60, +20, +60 и +80 °С представлены в табл. 3.

Таблица 3

**Результаты испытаний образцов углепластика ВКУ-51
с ортогональной укладкой на сжатие**

Характеристика	Направление приложения нагрузки, градус	Значения характеристик при температуре испытания, °С			
		-60	+20	+60	+80
Предел прочности, МПа	0	$\frac{315-495}{381}$	$\frac{255-350}{294}$	$\frac{215-310}{274}$	$\frac{170-265}{210}$
	90	–	$\frac{360-410}{384}$	–	–
Модуль упругости, ГПа	0	$\frac{52-58}{54}$	$\frac{42-52}{48}$	$\frac{45-57}{51}$	$\frac{45-51}{48}$
	90	–	$\frac{43-49}{46}$	–	–
Коэффициент Пуассона	0	$\frac{0,03-0,05}{0,04}$	$\frac{0,02-0,04}{0,03}$	$\frac{0,01-0,02}{0,01}$	$\frac{0,01-0,03}{0,02}$
	90	–	$\frac{0,02-0,04}{0,03}$	–	–

Примечание. В числителе приведен диапазон значений, в знаменателе – среднее арифметическое значение.

Образцы углепластика ВКУ-51 имеют удовлетворительный уровень сохранения упруго-прочностных характеристик при сжатии. Уровень сохранения прочности и модуля упругости составил 71 и 100 % соответственно.

Результаты испытаний образцов с ортогональной укладкой армирующего наполнителя на изгиб при температурах –60, +20, +60 и +80 °С представлены в табл. 4.

Таблица 4

**Результаты испытаний образцов углепластика ВКУ-51
с ортогональной укладкой на изгиб**

Характеристика	Направление приложения нагрузки, градус	Значения характеристик при температуре испытания, °С			
		–60	+20	+60	+80
Предел прочности, МПа	0	$\frac{540-800}{676}$	$\frac{540-730}{663}$	$\frac{440-610}{523}$	$\frac{395-510}{445}$
	90	–	$\frac{580-840}{716}$	–	–
Модуль упругости, ГПа	0	$\frac{51-62}{58}$	$\frac{57-67}{63}$	$\frac{59-74}{65}$	$\frac{52-70}{63}$
	90	–	$\frac{44-52}{47}$	–	–

Примечание. В числителе приведен диапазон значений, в знаменателе – среднее арифметическое значение.

Углепластик ВКУ-51 имеет низкий уровень сохранения прочности (67 %) при температуре 80 °С. Поэтому, несмотря на стопроцентное сохранение значений модуля упругости, рекомендовать углепластик ВКУ-51 для изготовления несущих конструкций, работающих при температуре 80 °С, нельзя. Уровень сохранения прочности (79 %) и модуля упругости (100 %) при температуре 60 °С оказался достаточным для того, чтобы рекомендовать материал для изготовления несущих строительных конструкций, работающих при температуре до 60 °С.

Для оценки работоспособности углепластика ВКУ-51 в качестве конструктивной оболочки арочного элемента проведены испытания образцов с укладкой армирующего наполнителя [$\pm 30^\circ$] на растяжение, сжатие и изгиб при температуре 20 °С. Результаты испытаний представлены в табл. 5.

Таблица 5

**Результаты испытаний образцов углепластика ВКУ-51 с конструктивной укладкой
при температуре 20 °С (направление приложения нагрузки 0 градусов)**

Характеристика	Значения характеристик при испытании		
	на растяжение	на сжатие	на изгиб
Предел прочности, МПа	$\frac{205-260}{230}$	$\frac{110-230}{170}$	$\frac{325-530}{415}$
Модуль упругости, ГПа	$\frac{60-76}{67}$	$\frac{31-41}{37}$	$\frac{40-76}{53}$
Коэффициент Пуассона	$\frac{1,1-1,8}{1,4}$	$\frac{0,58-0,64}{0,60}$	–

Примечание. В числителе приведен диапазон значений, в знаменателе – среднее арифметическое значение.

Результаты испытаний свидетельствуют об ухудшении упруго-прочностных характеристик углепластика при всех видах нагружения, наиболее критичным из которых является растяжение. Полученные значения не удовлетворяют требованиям технического задания, поэтому результаты данного вида испытаний требуют анализа.

При исследовании испытанных образцов выявлено, что разрушение происходило вдоль углеродного волокна (рис. 4). Сами углеродные волокна, находящиеся рядом с зоной разрушения, не были разрушены. Имеют место значительные сдвиговые нагрузки, не характерные для процесса эксплуатации. Таким образом, можно констатировать, что испытание углепластика ВКУ-51 с конструктивной укладкой армирующего

наполнителя по ГОСТ 25.601–80 для оценки работоспособности в составе арочной конструкции не показательно. Для достоверной оценки упруго-прочностных характеристик углепластика с конструктивной укладкой при растяжении предложен способ, заключающийся в испытании образцов, в которых армирующий наполнитель полностью вовлечен в нагружение образца [23]. Полученные таким образом значения упруго-прочностных характеристик представлены в табл. 6.

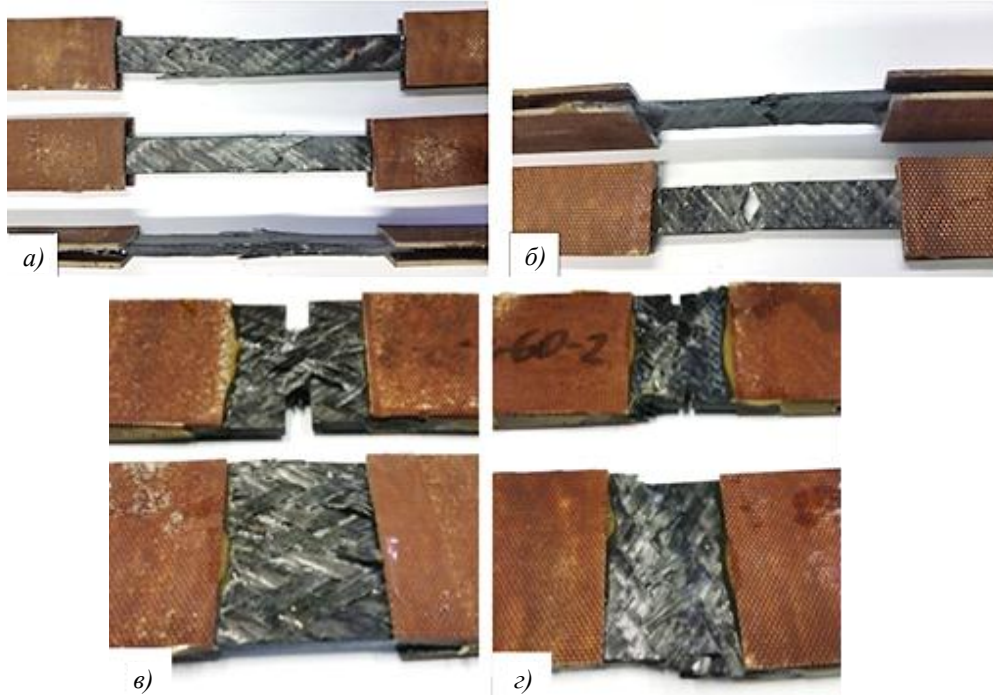


Рис. 4. Образцы углепластика ВКУ-51 с конструктивной укладкой после испытаний на растяжение по ГОСТ 25.601–80 (а, б) и СТО 1-595-11-505–2016 (в, з)

Таблица 6

Результаты испытаний образцов углепластика ВКУ-51 с конструктивной укладкой на растяжение при температуре 20 °С

Нормативный документ	Предел прочности, МПа	Модуль упругости, ГПа	Коэффициент Пуассона
ГОСТ 25.601–80	$\frac{205-260}{230}$	$\frac{60-76}{67}$	$\frac{1,1-1,8}{1,4}$
СТО 1-595-11-505–2016	$\frac{670-880}{753}$	$\frac{63-70}{67}$	$\frac{1,1-1,8}{1,4}$

Примечание. В числителе приведен диапазон значений, в знаменателе – среднее арифметическое значение.

На основании полученных данных установлена зависимость упруго-прочностных характеристик углепластика от угла ориентации армирующего наполнителя при статическом нагружении (рис. 5).

Исходя из выявленной зависимости, для достижения требуемых прочностных характеристик ПКМ (модуль упругости при растяжении ≥ 40 ГПа, прочность при растяжении ≥ 500 МПа) необходимо обеспечить угол армирования углепластика < 40 градусов.

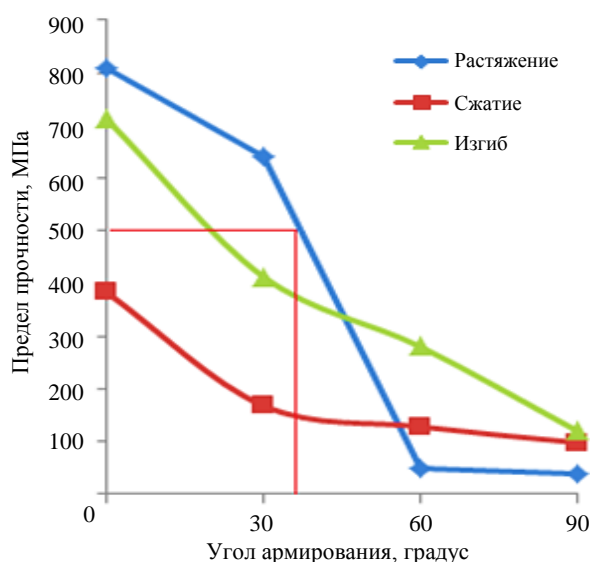


Рис. 5. Зависимости упруго-прочностных свойств углепластика ВКУ-51 при растяжении, сжатии и изгибе от угла ориентации армирующего наполнителя

Полученные результаты хорошо сочетаются с данными научно-технической литературы (рис. 6). Можно заключить, что закономерности регулирования прочностных характеристик образцов ПКМ, изготовленных с применением тканых наполнителей, применимы для расчета прочности ПКМ, полученных с использованием плетеных преформ [14, 24–26].



Рис. 6. Зависимость прочности при растяжении полимерного композиционного материала от угла ориентации армирующего наполнителя

Для оценки прочностных характеристик углепластика при продолжительном статическом и динамическом нагружении определены длительная прочность и ползучесть на базе 500 ч, а также малоцикловая усталость при температуре 20 °С. В ходе испытаний установлено, что для образцов с ортогональной укладкой армирующего наполнителя [0°/90°] длительная статическая прочность σ_{500}^{20} составляет 500 МПа, а предел выносливости на базе $1 \cdot 10^4$ циклов равен 400 МПа. Для образцов с конструктивной укладкой армирующего наполнителя $\sigma_{500}^{20} = 185$ МПа, а предел выносливости составляет 150 МПа. Следует также отметить, что испытания углепластика с конструктивной

укладкой [$\pm 30^\circ$] проводили на образцах, изготовленных в соответствии с ГОСТ 25.601–80, ввиду невозможности испытаний образцов, выполненных по СТО 1-595-11-505–2016, на имеющемся оборудовании. Результаты испытаний на ползучесть представлены в табл. 7.

Таблица 7

Результаты испытаний образцов углепластика ВКУ-51 с ортогональной и конструктивной укладкой на ползучесть при температуре 20 °С ($\sigma_{\max} = 500$ МПа)

Направление приложения нагрузки, градус	σ/σ_{\max} , %	Деформация, %, на базе времени, ч			
		0,1	10	100	500
Ортогональная укладка					
0	50	0,268	0,286	0,291	0,297
	70	0,505	0,556	0,556	0,572
	90	0,736	0,784	0,806	0,821
90	50	0,324	0,329	0,336	0,442
	70	0,554	0,563	0,567	0,634
	90	0,709	0,732	0,740	0,779
Конструктивная укладка					
0	50	0,063	0,077	0,082	0,137
	70	0,073	0,08	0,091	0,154
	90	0,121	0,129	0,146	0,154

Полученные данные подтверждают работоспособность углепластика ВКУ-51 в длительном временном интервале при приложении нагрузки, близкой к максимально допустимой. Это позволит изготавливать из него несущие конструкции, надежно воспринимающие нагрузки продолжительное время.

Помимо механического нагружения, на конструкцию влияют такие факторы внешней среды, как знакопеременные температуры, тепловлажностное воздействие и др. [20, 27–29]. В связи с этим для оценки влияния эксплуатационных факторов на свойства исследуемого ПКМ образцы углепластика экспонировали в различных средах.

Важнейшим требованием к ПКМ, предназначенным для использования в строительной отрасли, является устойчивость к химически агрессивным средам. Это обусловлено тем, что различные бетоны и строительные смеси на их основе обладают высоким уровнем щелочности неотвержденного раствора на протяжении всего времени, предшествующего отверждению. Их активная кислотность (рН) колеблется в пределах от 11,8 до 13,8 [1, 11]. Такие значения рН характерны для сильнощелочных водных растворов, например 0,1 М раствора NaOH. При нахождении ПКМ в такой среде возможно протекание реакций щелочного гидролиза в молекулярных фрагментах, формирующих полимерную сетку отвержденного связующего. В результате при недостаточной химической устойчивости полимерной матрицы может происходить ее разрушение с последующим выходом из строя оболочки из ПКМ. Поэтому для подтверждения работоспособности углепластика ВКУ-51 в качестве несъемной опалубки образцы экспонировали в щелочном растворе (рН = 13) в течение 7 сут. Кроме того, образцы исследованы после выдержки в тепловлажностных условиях и в воде при температуре 60 °С в течение 60 сут.

Результаты исследований образцов углепластика ВКУ-51 с конструктивной укладкой представлены в табл. 8.

Таблица 8

Результаты испытаний на статический изгиб и термомеханические свойства образцов углепластика ВКУ-51 с конструктивной укладкой после тепловлажностного старения и воздействия щелочной водной среды (рН = 13)

Вид испытания	Температура стеклования, °С	Влагопоглощение, %	Прочность при изгибе, МПа		Модуль упругости при изгибе, ГПа	
			при температуре, °С			
			20	60	20	60
В исходном состоянии	104	–	<u>325–530</u> 415	<u>335–345</u> 340	<u>50–66</u> 53	<u>40–46</u> 43
Водный раствор (рН = 13) при температуре 60 °С	103 (99)	–	369 (89)	291 (86)	49 (94)	44 (96)
Тепловлажностное старение (T = 60 °С, φ = 85 %)	102 (98)	0,33	315 (76)	288 (85)	47 (90)	44 (96)
Вода при температуре 60 °С	102 (98)	0,61	311 (75)	257 (76)	47 (90)	43 (93)

Примечание. В числителе приведен диапазон значений, в знаменателе – среднее арифметическое значение; в скобках указан уровень сохранения характеристик по сравнению с показателями исходных образцов (%).

В условиях тепловлажностного старения и воздействия щелочных водных растворов, имитирующих по уровню рН бетонные смеси, происходит незначительное снижение термомеханических и физико-механических характеристик углепластика ВКУ-51. Температура стеклования образцов практически не изменяется (уровень сохранения показателя ~ (98–99) %). В то же время уровень сохранения прочности при изгибе образцов ПКМ, прошедших тепловлажностные испытания, составляет от 75 до 89 % по отношению к значениям прочности исходных отвержденных образцов углепластика ВКУ-51 с конструктивной укладкой. Следует отметить, что для такой высокой стабильности физико-механических свойств отвержденных образцов углепластика ВКУ-51 характерны незначительные показатели влагопоглощения: 0,61 % – в воде при T = 60 °С и 0,33 % – при T = 60 °С и φ = 85 %.

Результаты испытаний углепластика ВКУ-51 с ортогональной укладкой на изгиб при температуре 20 °С после выдержки в различных средах приведены в табл. 9, а изменение массы – на рис. 7.

Уровень сохранения прочностных характеристик близок к 100 %, причем их изменение после выдержки при температуре как 60, так и 80 °С носит нелинейный характер. В некоторых случаях наблюдается улучшение характеристик, что в совокупности с увеличением температуры стеклования свидетельствует об образовании более прочной сшивки макромолекул полимерной матрицы в результате прохождения реакций доотверждения и старения. Оценивая полученные значения, можно констатировать, что воздействие повышенных температур не оказывает негативного влияния на углепластик. Значительного изменения массы образцов после выдержки при разных температурах не выявлено.

Результаты ускоренных тепловлажностных испытаний показали, что характеристики образцов после экспозиции снизились на <25 %, что является хорошим показателем устойчивости углепластика к воздействию климатических факторов [29–33]. При этом максимальное снижение показателей (24 %) выявлено после выдержки в воде при температуре 20 °С. В случае длительной тепловлажностной выдержки при T = 60 °С, φ = 85 % произошло увеличение прочности при изгибе, что объясняется упрочнением структуры ПКМ вследствие воздействия повышенных температур и сшивки макромолекул матрицы в материале.

Результаты испытаний при температуре 20 °С образцов углепластика ВКУ-51 с ортогональной укладкой после выдержки в различных средах

Условия экспозиции	Продолжительность выдержки, ч	Предел прочности при изгибе, МПа	Температура стеклования, °С
$T = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$	500	650 (98)	–
	1000	661 (100)	
	1500	719 (100)	
	2000	648 (98)	112 (100)
$T = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$	100	661 (100)	–
	2000	678 (100)	114 (100)
$T = 28\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\varphi = 98\%$	672	565 (85)	–
	1344	525 (79)	
	2016	508 (77)	
$T = 28\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\varphi = 98\%$, споры грибов*	672	540 (81)	–
	1344	547 (83)	
	2016	553 (83)	
$T = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\varphi = 85\%$	672	538 (81)	–
	1344	540 (81)	106 (100)
Камера тропического климата	672	580 (87)	–
	1344	590 (89)	109 (100)
	2016	544 (82)	
Вода при температуре 20 °С	672	503 (76)	103 (99)
Бензин марки АИ-92		610 (92)	–
Дизельное топливо марки Л		601 (92)	–
Моторное масло вязкостью, мм ² /с: 4–8 20–24	672	590 (89)	–
		555 (84)	

Примечание. В скобках указан уровень сохранения характеристик по сравнению с показателями исходных образцов (%).
* Степень поражения грибами образцов при любой продолжительности выдержки составила 0 баллов.

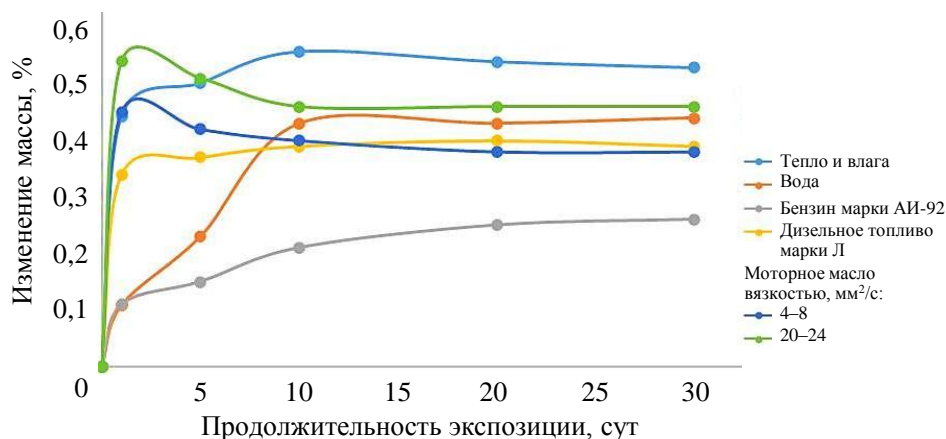


Рис. 7. Зависимости изменения массы образцов углепластика ВКУ-51 с ортогональной укладкой от продолжительности экспозиции в различных средах

Дополнительно исследовано влияние тепловлажностных условий на предел прочности при изгибе при повышенной и пониженной температурах (табл. 10).

Представленные данные свидетельствуют о хорошем уровне сохранения свойств углепластика после экспозиции в тепловлажностных условиях и подтверждают его высокую надежность в ожидаемых условиях эксплуатации аэрокосмических элементов.

Таблица 10

**Результаты испытаний на изгиб после тепловлажностных испытаний
при $T = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $\varphi = 85\%$**

Температура испытания, $^{\circ}\text{C}$	Предел прочности при изгибе, МПа		
	в исходном состоянии	после экспозиции в тепловлажностных условиях продолжительностью, мес.	
		1	2
-60	$\frac{540-800}{676}$	630 (93)	700 (100)
+20	$\frac{540-730}{663}$	538 (81)	540 (81)
+60	$\frac{440-610}{523}$	482 (92)	414 (79)

Примечание. В числителе приведен диапазон значений, в знаменателе – среднее арифметическое значение; в скобках указан уровень сохранения характеристик по сравнению с показателями исходных образцов (%).

Установлено, что выдержка в воде и тепловлажностных условиях оказала наиболее существенное влияние на прочностные характеристики исследуемого углепластика (уровень сохранения показателей $\sim 76\%$). Изменение массы при выдержке не превысило $0,56\%$ (в тепловлажностных условиях при $T = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $\varphi = 85\%$). Полученные данные свидетельствуют о незначительном влиянии автомобильных горюче-смазочных материалов (бензин марки АИ-92, дизельное топливо марки Л и моторные масла разной вязкости) на углепластик ВКУ-51, что позволяет использовать его для изготовления конструкций, применяемых при строительстве автодорожных объектов.

Заключения

По совокупности исследованных упруго-прочностных характеристик при разных видах нагружения подтверждена работоспособность углепластика ВКУ-51 в интервале температур от -60 до $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$. Уровень сохранения упруго-прочностных характеристик составляет $\geq 71\%$.

Установлено, что для создания эффекта обоймы в арочной трубобетонной конструкции углепластик должен иметь модуль упругости при растяжении ≥ 40 ГПа, прочность при растяжении должна составлять ≥ 500 МПа. Выявлена зависимость изменения упруго-прочностных характеристик при растяжении углепластика от угла ориентации армирующего наполнителя. Установлено, что для достижения требуемых прочностных характеристик ПКМ и создания эффекта обоймы в арочной трубобетонной конструкции необходимо обеспечить угол армирования углепластика < 40 градусов.

Подтверждена стойкость исследованного углепластика к внешним воздействующим факторам: щелочной среде, тепловлажностной, микологической и влажной среде, воде, автомобильным горюче-смазочным материалам (бензин марки АИ-92, дизельное топливо марки Л и моторные масла разной вязкости).

Таким образом, всесторонние исследования углепластика ВКУ-51 подтверждают возможность изготовления из него несущих конструкций, усиливающих бетонное основание сооружений, работоспособных в интервале температур от -60 до $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$ и стойких к воздействию факторов окружающей среды.

Получены положительное заключение и техническое свидетельство № 5012-16 от федерального автономного учреждения «Федеральный центр нормирования, стандартизации и технической оценки соответствия в строительстве» (ФАУ «ФЦС»), подтверждающее возможность применения углепластика ВКУ-51 в строительстве.

Благодарность

Авторы считают своим долгом отметить вклад **А.Е. Раскутина** в постановку и осуществление научного руководства НИОКР шифра «Арка», на основании результатов которой написана данная статья.

Александр Евгеньевич Раскутин (1975–2020) – выпускник МАТИ им. К.Э. Циолковского, к.т.н. Работал в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ с 1998 по 2020 г. Начальник лаборатории, начальник НИО «Полимерные композиционные материалы и технологии их переработки». Научное направление деятельности – высокотемпературные углепластики, технологии и применение ПКМ в конструкции планеров летательных аппаратов. Организатор создания при лаборатории Центра компетенций.

Список источников

1. Евдокимов А.А., Петрова А.П., Раскутин А.Е. и др. Полимерные композиционные материалы для применения в строительной индустрии // OpenScience 2021: сб. тез. VIII Всерос. молодежного научного форума. Гатчина, 2022. С. 124.
2. Ткачук А.И., Донецкий К.И., Терехов И.В., Караваев Р.Ю. Применение терморезистивных связующих для изготовления полимерных композиционных материалов методами безавтоклавного формования // Авиационные материалы и технологии. 2021. № 1 (62). С. 22–33. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 21.02.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-22-33.
3. Седов Л.Н., Михайлова З.В. Ненасыщенные полиэфирсы. М.: Химия, 1977. 232 с.
4. Огмрцян А.Р., Гусева М.А. Исследование влияния модификаторов на свойства эпоксивинилэфирной композиции, отверждаемой по механизму радикальной полимеризации // Новости материаловедения. Наука и техника. 2018. № 1-2 (29). Ст. 9. URL: <http://materialsnews.ru> (дата обращения: 21.02.2025).
5. Ткачук А.И., Терехов И.В., Гуревич Я.М., Григорьева К.Н. Исследование влияния природы модифицирующих добавок на реологические и термомеханические характеристики фотополлимерной композиции на основе эпоксивинилэфирной смолы // Авиационные материалы и технологии. 2019. № 3 (56). С. 31–40. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-3-31-40.
6. Михалдыкин Е.С. Применение трубобетонных конструкций с оболочкой из полимерных композиционных материалов при строительстве малых мостов: дис. ... канд. техн. наук. М., 2021. 111 с.
7. Строительное материаловедение: учеб. пособие / под общ. ред. В.А. Невского. 3-е изд., доп. и перераб. Ростов н/Д: Феникс, 2010. 588 с.
8. Okano M., Sugimoto K., Saito H. et al. Effect of the braiding angle on the energy absorption properties of a hybrid braided FRP tube // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part L. 2005. Vol. 219. No. 1. P. 59.
9. Евдокимов А.А. Полимерный композиционный материал с формообразованием при температурах до 40 °С: дис. ... канд. техн. наук. М.: ВИАМ, 2022. 116 с.
10. Erber A., Birkefeld K., Drechsler K. The influence of braiding configuration on damage tolerance of drive shafts // SAMPE EUROPE 30-th International Jubilee Conference and Forum. Paris, 2010. P. 364–371.
11. Ежов В.Б. Технология бетона, строительных изделий и конструкций. Екатеринбург, 2014. 206 с.
12. Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология / под ред. Ал.Ал. Берлина. СПб.: Профессия, 2008. 557 с.
13. Кербер М.Л., Виноградов В.М. Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология. СПб.: Профессия, 2009. 560 с.
14. Румянцев А.Ф. Свойства конструкционных углепластиков, состав, структура армирования: дис. ... д-ра техн. наук. М., 2002. 113 с.
15. Каблов Е.Н. Роль фундаментальных исследований при создании материалов нового поколения // Тез. докл. XXI Менделеевского съезда по общей и прикладной химии: в 6 т. СПб., 2019. Т. 4. С. 24.

16. Старцев В.О. Старение полимерных композиционных материалов в морской воде (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2023. № 1 (70). С. 148–170. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 21.02.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-1-148-170.
17. Михайлин Ю.А. Конструкционные полимерные композиционные материалы. СПб.: Научные основы и технологии, 2008. 822 с.
18. Бунаков В.А., Головкин Г.С., Машинская Г.П. и др. Армированные пластики / под ред. Г.С. Головкина, В.И. Семенова. М.: Изд-во МАИ, 1997. 404 с.
19. Hrulkov A.V., Dushin M.I., Popov Yu.O., Kogan D.I. Researches and development autoclave and out-of-autoclave technologies of formation of PCM. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2012, no. S, pp. 292–301.
20. Каблов Е.Н., Старцев О.В. Фундаментальные и прикладные исследования коррозии и старения материалов в климатических условиях (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. № 4. С. 38–52. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-4-38-52.
21. Каблов Е.Н., Кириллов В.Н., Жирнов А.Д. и др. Центры для климатических испытаний авиационных ПКМ // *Авиационная промышленность*. 2009. № 4. С. 36–46.
22. 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). С. 70–80. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 05.02.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-70-80.
23. Евдокимов А.А., Ильичев А.В., Михалдыкин Е.С. Растяжение анизотропных слоистых полимерных композиционных материалов на основе углеродных преформ с биаксиальным плетением // *Все материалы. Энциклопедический справочник*. 2016. № 7. С. 72–79.
24. Гуняев Г.М. Структура и свойства полимерных волокнистых композитов. М: Химия, 1981. 232 с.
25. Раскутин А.Е., Соколов И.И. Углепластики и стеклопластики нового поколения // *Труды ВИАМ*. 2013. № 4. Ст. 9. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 11.02.2025).
26. Алфутов Н.А., Болотин В.В., Васильев В.В. и др. Композиционные материалы: справочник. М.: Машиностроение, 1990. 512 с.
27. Кириллов В.Н., Старцев О.В., Ефимов В.А. Климатическая стойкость и повреждаемость полимерных композиционных материалов, проблемы и пути решения // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. № S. С. 412–423.
28. Старцев В.О. Климатическая стойкость полимерных композиционных материалов и защитных покрытия в умеренно-теплом климате: дис. ... д-ра техн. наук. М., 2018. 297 с.
29. Старцев В.О., Валевин Е.О., Гуляев А.И. Влияние старения поверхности полимерных композиционных материалов на их механические свойства // *Труды ВИАМ*. 2020. № 8 (90). С. 64–76. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 11.02.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-8-64-76.
30. Петрова А.П., Малышева Г.В. Клеи, клеевые связующие и клеевые препреги: учеб. пособие / под общ. ред. Е.Н. Каблова. М.: ВИАМ, 2017. 472 с.
31. Старцев В.О., Плотников В.И., Антипов Ю.В. Обратимые эффекты влияния влаги при определении механических свойств ПКМ при климатических воздействиях // *Труды ВИАМ*. 2018. № 5 (65). С. 110–118. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 11.02.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-5-110-118.
32. Деев И.С., Куршев Е.В., Лонский С.Л., Железина Г.Ф. Влияние длительного климатического старения на микроструктуру поверхности эпоксидных органопластиков и характер ее разрушения в условиях изгиба // *Вопросы материаловедения*. 2016. № 3 (87). С. 104–114.
33. Евдокимов А.А., Петрова А.П., Павловский К.А., Гуляев И.Н. Влияние климатического старения на свойства ПКМ на основе эпоксивинилэфирного связующего // *Труды ВИАМ*. 2021. № 3 (97). С. 128–136. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 11.02.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-3-128-136.

References

1. Evdokimov A.A., Petrova A.P., Raskutin A.E. et al. Polymer composite materials for use in the construction industry. *OpenScience 2021: Collection of abstracts of the VIII All-Rus. youth scientific forum*. Gatchina, 2022, p. 124.
2. Tkachuk A.I., Donetsky K.I., Terekhov I.V., Karavaev R.Yu. The use of thermosetting matrices for the manufacture of polymer composite materials by the non-autoclave molding methods. *Aviation materials and technology*, 2021, no. 1 (62), pp. 22–33. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: February 21, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-22-33.
3. Sedov L.N., Mikhailova Z.V. *Unsaturated polyesters*. Moscow: Khimiya, 1977, 232 p.
4. Ogmrcyan A.R., Guseva M.A. Research of the effect of modifiers on the properties of an epoxy vinyl ester composition cured by the radical polymerization mechanism. *Novosti materialovedeniia. Nauka i tekhnika*, 2018, no. 1-2 (29), paper no. 9. Available at: <http://materialsnews.ru> (accessed: February 21, 2025).
5. Tkachuk A.I., Terekhov I.V., Gurevich Ya.M., Grigoreva K.N. Research of the influence of the modifying additives nature on the rheological and thermomechanical properties of a photopolymer composition based on epoxy vinyl ester resin. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2019, no. 3 (56), pp. 31–40. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-3-31-40.
6. Mikhaldykin E.S. *Application of Tube-Concrete Structures with a Shell Made of Polymer Composite Materials in the Construction of Small Bridges*: thesis, Cand. Sc. (Tech.). Moscow, 2021, 111 p.
7. *Construction Materials Science: Textbook*. Ed. V.A. Nevsky. 3rd ed., add. and rev. Rostov-on-Don: Phoenix, 2010, 588 p.
8. Okano M., Sugimoto K., Saito H. et al. Effect of the braiding angle on the energy absorption properties of a hybrid braided FRP tube. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L*, 2005, vol. 219, no. 1, p. 59.
9. Evdokimov A.A. *Polymer composite material with shaping at temperatures up to 40 °C*: thesis, Cand. Sc. (Tech.). Moscow: VIAM, 2022, 116 p.
10. Erber A., Birkefeld K., Drechsler K. The influence of braiding configuration on damage tolerance of drive shafts. *SAMPE EUROPE 30-th International Jubilee Conference and Forum*. Paris, 2010, p. 364–371.
11. Yezhov V.B. *Technology of Concrete, Building Products and Structures*. Ekaterinburg, 2014, 206 p.
12. *Polymer Composite Materials: Structure, Properties, Technology*. Ed. St. Petersburg: Profession, 2008, 557 p.
13. Kerber M.L., Vinogradov V.M. *Polymer Composite Materials: Structure, Properties, Technology*. St. Petersburg: Profession, 2009, 560 p.
14. Rumyantsev A.F. *Properties of Structural Carbon Fiber Reinforced Plastics, Composition, Reinforcement Structure*: thesis, Dr Sc. (Tech.). Moscow, 2002, 113 p.
15. Kablov E.N. *The Role of Fundamental Research in the Creation of New Generation Materials*. Reports XXI Mendeleev Congress on General and Applied Chemistry: in 6 vols. St. Petersburg, 2019, vol. 4, p. 24.
16. Startsev V.O. The degradation of polymer composite materials in seawater (review). *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 1 (70), pp. 148–170. URL: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: February 21, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-1-148-170.
17. Mikhailin Yu.A. *Structural polymer composite materials*. St. Petersburg: Scientific foundations and technologies, 2008, 822 p.
18. Bunakov V.A., Golovkin G.S., Mashinskaya G.P. et al. *Reinforced plastics*. Ed. G.S. Golovkin, V.I. Semenov. Moscow: MAI Publ. House, 1997, 404 p.
19. Hrulkov A.V., Dushin M.I., Popov Yu.O., Kogan D.I. Researches and development autoclave and out-of-autoclave technologies of formation of PCM. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2012, no. S, pp. 292–301.
20. Kablov E.N., Startsev O.V. The basic and applied research in the field of corrosion and ageing of materials in natural environments (review). *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2015, no. 4 (37), pp. 38–52. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-4-38-52.

21. Kablov E.N., Kirillov V.N., Zhirnov A.D. et al. Centers for climatic testing of aviation PCM. *Aviatsionnaya promyshlennost*, 2009, no. 4, pp. 36–46.
22. 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), pp. 70–80. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: February 05, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-70-80.
23. Evdokimov A.A., Pyichev A.V., Mikhaldykin E.S. Stretching of anisotropic layered polymer composite materials based on carbon preforms with biaxial weaving. *Vse materialy. Entsiklopedicheskiy spravochnik*, 2016, no. 7, pp. 72–79.
24. Gunyaev G.M. *Structure and Properties of Polymer Fiber Composites*. Moscow: Khimiya, 1981, 232 p.
25. Sokolov I.I., Raskutin A.E. Carbon plastics and fibreglasses of new generation. *Trudy VIAM*, 2013, no. 4, paper no. 09. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: February 11, 2025).
26. Alfutov N.A., Bolotin V.V., Vasiliev V.V. et al. *Composite materials: a reference book*. Moscow: Mashinostroenie, 1990, 512 p.
27. Kirillov V.N., Startsev O.V., Efimov V.A. Climatic firmness and damageability of polymeric composite materials, problems and solutions. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2012, no. S, pp. 412–423.
28. Startsev V.O. *Climatic resistance of polymer composite materials and protective coatings in a moderately warm climate: thesis, Dr Sc. (Tech.)*. Moscow, 2018, 297 p.
29. Startsev V.O., Valevin E.O., Gulyaev A.I. The influence of polymer composite materials' surface weathering on its mechanical properties. *Trudy VIAM*, 2020, no. 8 (90), pp. 64–76. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: February 11, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-8-64-76.
30. Petrova A.P., Malysheva G.V. *Adhesives, adhesive binders and adhesive prepregs: textbook*. Ed. E.N. Kablov. Moscow: VIAM, 2017, 472 p.
31. Startsev V.O., Plotnikov V.I., Antipov Yu.V. Reversible influence of moisture on the mechanical properties of PCM after weathering. *Trudy VIAM*, 2018, no. 5 (65), pp. 110–118. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: February 11, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-5-110-118.
32. Deev I.S., Kurshev E.V., Lonskiy S.L., Zhelezina G.F. The influence of long-term climatic aging on the surface microstructure of epoxy organoplastics and the nature of its destruction under bending conditions. *Voprosy materialovedeniya*, 2016, no. 3 (87), pp. 104–114.
33. Evdokimov A.A., Petrova A.P., Pavlovskiy K.A., Gulyaev I.N. The influence of climatic ageing on the properties of PCM-based epoxy resin systems. *Trudy VIAM*, 2021, no. 3 (97), pp. 128–136. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: February 11, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-3-128-136.

Информация об авторах

Евдокимов Антон Андреевич, заместитель начальника лаборатории по науке, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Ерасов Владимир Сергеевич, ведущий научный сотрудник, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Каблов Евгений Николаевич, д.т.н., профессор, академик РАН

Лаптев Анатолий Борисович, главный научный сотрудник, д.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Anton A. Evdokimov, Deputy Head of Laboratory for Science, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Vladimir S. Erasov, Leading Researcher, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Evgeniy N. Kablov, Doctor of Sciences (Tech.), Professor, Academician of RAS

Anatoliy B. Laptev, Chief Researcher, Doctor of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 19.08.2025; одобрена и принята к публикации после рецензирования 22.09.2025.

The article was submitted 19.08.2025; approved and accepted for publication after reviewing 22.09.2025.