

Научная статья

УДК 678.067.5

DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-11-23-37

КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА ВОЗДЕЙСТВИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ И КЛИМАТИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ НА ИЗМЕНЕНИЕ ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ С ФОРМООБРАЗОВАНИЕМ ПРИ ТЕМПЕРАТУРАХ ДО 40 °С
Часть 1. Стеклопластик марки ВПС-58

А.А. Евдокимов¹, Е.А. Вешкин¹, Е.Н. Каблов, А.Б. Лаптев¹, А.А. Баранников¹

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 стеклопластика марки ВПС-58 при растяжении, сжатии и изгибе в температурном диапазоне от –60 до +80 °С в исходном состоянии и после воздействия эксплуатационных факторов, таких как экспозиция в камере тропического климата и тепловлажностное старение в разных условиях в течение 1 и 3 мес., а также тепловое старение 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 стеклопластика.

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

Для цитирования: Евдокимов А.А., Вешкин Е.А., Каблов Е.Н., Лаптев А.Б., Баранников А.А. Комплексная оценка воздействия эксплуатационных и климатических испытаний на изменение прочностных свойств полимерных композиционных материалов с формообразованием при температурах до 40 °С. Часть 1. Стеклопластик марки ВПС-58 // Труды ВИАМ. 2025. № 11 (153). Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-11-23-37.

Scientific article

COMPREHENSIVE ASSESSMENT OF THE IMPACT OF OPERATIONAL AND CLIMATIC TESTING ON THE STRENGTH PROPERTIES OF POLYMER COMPOSITE MATERIALS WITH SHAPING AT TEMPERATURES UP TO 40 °C
Part 1. Fiberglass of the VPS-58 brand

A.A. Evdokimov¹, E.A. Veshkin¹, E.N. Kablov, A.B. Laptev¹, A.A. Barannikov¹

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

Abstract. The article provides the results of a comprehensive assessment of the retention of the strength properties of VPS-58 fiberglass under tension, compression and bending in the temperature range of –60 to +80 °C in the initial state and after exposure to operating factors. These factors included exposure in a tropical climate chamber and hygrothermal aging under different conditions for 1 and 3 months, as well as thermal aging for 500, 1000, 1500 and 2000 hours. The influence of mycological environment and automotive fuels and lubricants on the bending strength limit of fiberglass and mass change was studied.

Keywords: fiberglass, physical and mechanical characteristics, operational factors, retention of properties

For citation: Evdokimov A.A., Veshkin E.A., Kablov E.N., Laptev A.B., Barannikov A.A. Comprehensive assessment of the impact of operational and climatic testing on the strength properties of polymer composite materials with shaping at temperatures up to 40 °C. Part 1. Fiberglass of the VPS-58 brand. *Trudy VIAM*, 2025, no. 11 (153), paper no. 03. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-11-23-37.

Введение

В настоящее время проблеме создания несущих конструкций из полимерных композиционных материалов (ПКМ) для применения в различных отраслях промышленности уделяется повышенное внимание [1, 2]. Наряду с авиационной отраслью, в которой опыт изготовления ответственных конструкций из ПКМ составляет уже более 50 лет, следует отметить судостроение и строительство. И если в авиации для создания наиболее ответственных конструкций используют в основном ПКМ на основе углеродных волокон [3, 4], а в судостроении – на основе стеклоровингов [5, 6], то в строительной отрасли угле- и стеклонаполненные композиты тестируются в равной мере [7, 8]. Причем процесс внедрения разрабатываемых ПКМ зависит от требуемых упруго-прочностных характеристик, стойкости к воздействию климатических и эксплуатационных факторов, стоимости изготовления конечной конструкции и др. Поэтому при разработке ПКМ требуется исследование свойств материала во времени для наиболее достоверного прогнозирования сроков работоспособности конструкции в конкретных условиях ее использования.

Так, для строительной отрасли, а именно для мостостроения, специалисты НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ предложили использовать комплекс ПКМ, применимых для изготовления несущих строительных конструкций [9, 10]. Отличительной особенностью предлагаемой технологии является то, что изготовление из ПКМ конструкций с необходимым уровнем прочностных характеристик возможно без использования крупногабаритного оборудования, благодаря чему можно провести полный цикл строительного процесса непосредственно на площадке. Это, в свою очередь, сокращает стоимость строительства, сводя затраты на монтаж к минимуму. Кроме того, применение безрастворного эпоксивинилэфирного связующего для изготовления профилированного настила позволяет не только обеспечить необходимые физико-механические характеристики и высокий уровень стойкости конструкции к агрессивным эксплуатационным факторам, но и изготавливать конструкции без выделения вредных побочных продуктов [11–16]. Разработанные материалы – углепластик марки ВКУ-51 для изготовления несъемной опалубки трубобетонного основания сооружения и стеклопластик марки ВПС-58 для изготовления профилированного настила (рис. 1) прошли общую квалификацию (паспортизацию) и использованы при строительстве мостового сооружения в р. п. Языково Ульяновской области (рис. 2) [17].

В данной статье представлены результаты, полученные при паспортизации стеклопластика ВПС-58. Проведение всесторонних испытаний необходимо для подтверждения работоспособности стеклопластика при разных видах нагружения в широком интервале температур, а также для определения максимальной несущей способности и температурного диапазона эксплуатации конструкции, изготовленной из него (стеклопластикового профилированного настила). В качестве критериев применимости стеклопластика для формования конструкции выбраны расчетные значения прочностных характеристик – предел прочности при растяжении ≥ 250 МПа и предел прочности при сжатии ≥ 125 МПа (требования технического задания). Данные характеристики установлены проектировщиками и являются минимально допустимыми для применения в мостовых сооружениях с повышенной проектной нагрузкой [18]. Кроме того, представлены результаты исследований влияния внешних воздействующих факторов на материал. По результатам испытаний на стеклопластик ВПС-58 оформлен паспорт № 1939.

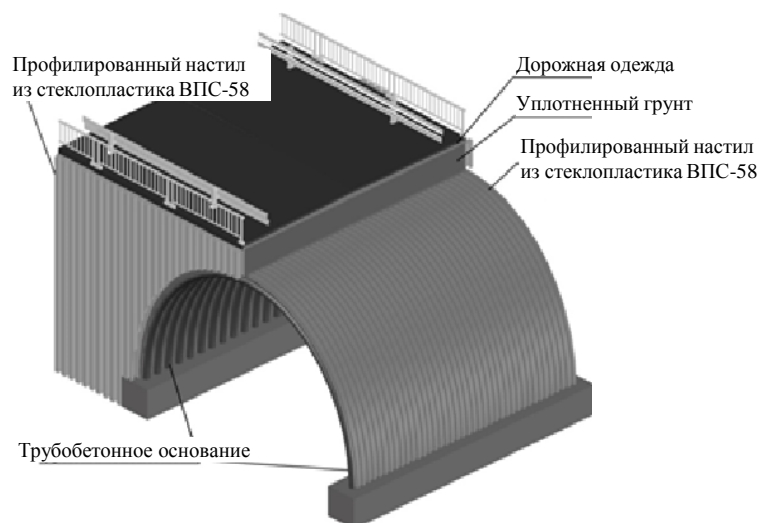


Рис. 1. Схема конструкции быстровозводимого мостового сооружения



Рис. 2. Использование профилированного настила из стеклопластика ВПС-58 в конструкции мостового сооружения в качестве порталной стенки (а) и слоя, перераспределяющего нагрузку от дорожного полотна на арочные конструкции (б)

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») [19].

Материалы и методы

Паспортизацию стеклопластика марки ВПС-58 на основе равнопрочной конструкционной стеклоткани, изготовленной из алюмоборосиликатных ровингов и эпоксивинилэфирного связующего холодного отверждения марки ВСВ-43, проводили в соответствии с СТО 1-595-30-407-2012 на трех партиях материала. Образцы для проведения исследований изготавливали таким образом, чтобы ось армирования наполнителем совпадала с осью приложенной нагрузки, т. е. в направлении 0 градусов. Направление приложения нагрузки при испытаниях на растяжение и сжатие схематично представлено на образце для проведения исследований при растяжении по ГОСТ 25.601-80 (рис. 3).

Количество слоев наполнителя в ПКМ рассчитывали исходя из толщины монослоя, определенного по ММ 1.595-25-295-2006. Для этого изготовлены плиты стеклопластика размером 300×300 мм с разным количеством слоев. Выявлено, что толщина монослоя составляет 0,45 мм. Для проведения исследований изготовлено 36 плит стеклопластика, толщина которых составляет 3,5–3,7 мм (8 слоев наполнителя).

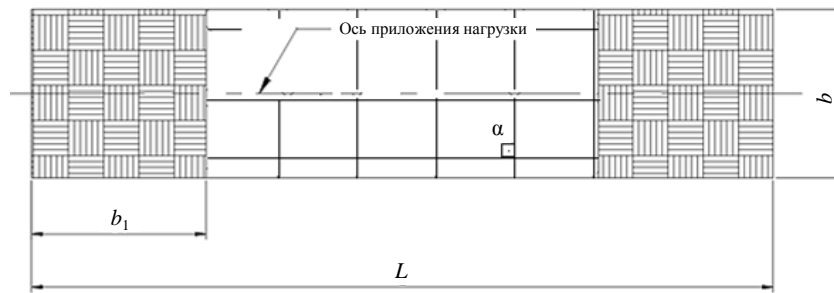


Рис. 3. Схематическое изображение образца стеклопластика с конструктивной укладкой: α – угол укладки армирующего наполнителя; L – длина образца; b – ширина образца; b_1 – длина зоны зажима

Образцы, подвергшиеся испытаниям без климатических воздействий (в исходном состоянии), отбирали в равной мере из трех партий связующего. Ось приложения нагрузки во всех образцах располагалась в направлении 0 градусов. Образцы для проведения экспозиции отбирали в произвольном порядке из оставшихся образцов.

В ходе проведения исследований в первую очередь определены плотность стеклопластика методом гидростатического взвешивания по ГОСТ 15139–69, составляющая 1930 ± 30 кг/м³, и температура стеклования методом динамического механического анализа по СТО 1.595-36-464–2015, составляющая 107 °С. Оценку влияния факторов нагружения на материал, представленную в табл. 1, проводили 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 стеклопластика ВПС-58

Вид нагружения	Нормативный документ	Количество испытанных образцов, шт.
Растяжение	ГОСТ 25.601–80	60
Сжатие	ГОСТ 25.602–80	
Изгиб	ГОСТ 4648–2014	
Малоцикловая усталость	ГОСТ 25.502–79	15
Длительная прочность	ОСТ 1 90068–79	10
Ползучесть	ОСТ 1 90075–79	

Для оценки влияния эксплуатационных факторов образцы стеклопластика выдерживали в климатических камерах (при повышенной температуре для определения теплового ресурса, в тепловлажностных условиях (температура $T = 60$ °С и влажность $\varphi = 85 \pm 2$ %; $T = 28$ °С и $\varphi = 98 \pm 2$ %), микологической камере и камере, имитирующей тропические условия), а также в жидкостях, непосредственный контакт с которыми возможен при эксплуатации профилированного настила: вода, автомобильные топлива и масла. Условия выдержки определяли исходя из факторов воздействия на материал при эксплуатации и на основании анализа научно-технической литературы [20–31].

После экспозиции образцы испытывали на трехточечный изгиб по ГОСТ 4648–2014 при температуре 20 °С для определения сохраняемости прочностных характеристик после экспонирования и температуры стеклования. В ходе экспонирования проводили гравиметрические исследования путем взвешивания на аналитических весах для определения изменения массы стеклопластика. Испытано по пять образцов при воздействии каждого исследуемого фактора.

Тепловой ресурс определяли в соответствии с СТП 1-595-101–83. Для этого образцы помещали в термощкаф, где выдерживали при температуре 60 °С в течение 500, 1000, 1500, 2000 ч и при температуре 80 °С в течение 500, 1000 ч.

Тепловлажностные испытания проводили по ГОСТ 12020–72 (заменен на ГОСТ 12020–2018), ГОСТ 9.707–81, ГОСТ 4650–2014. Для этого образцы экспонировали в камере при $T = 60$ °С и $\varphi = 85$ % в течение 30 и 60 сут.

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

Испытания на грибостойкость проводили по ГОСТ 9.049–91 по методу 1. Для этого на образцы наносили суспензию, содержащую споры грибов *Aspergillius niger* van Tieghem, *Aspergillius terreus* Thorn, *Aspergillius oryzae* (Ahlburg) Cohn, *Penicillium funiculosum* Thom, *Penicillium cyclopium* Westling, *Penicillium chrysogenum* Thom, *Trichoderma viride* Pers ex Fr, *Chaetomium globosum* Kunze, *Paecilomyces varioti* Bainier. Далее зараженные образцы для испытаний помещали в камеру при $T = 28$ °С, $\varphi < 98 \pm 2$ % и подвергали испытаниям в течение 1, 2, 3 мес. После съема образцы дополнительно исследовали под микроскопом для определения степени поражения спорами грибов.

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, 30 сут при комнатной температуре (23 ± 2 °С). В ходе испытаний фиксировали изменение массы образцов. Далее образцы подвергали испытанию на изгиб при температуре 20 °С.

Выдержку в автомобильном топливе в течение 30 сут проводили по ГОСТ 12020–72, ГОСТ 4650–2014. Для этого образцы размещали в моторном масле вязкостью 4–8 и 20–24 мм²/с, бензине марки АИ-92, дизельном топливе марки Л и выдерживали в течение 30 сут.

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

Результаты и обсуждение

Результаты испытаний стеклопластика на растяжение представлены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты испытаний стеклопластика ВПС-58 на растяжение

Характеристика	Значения характеристик при температуре испытания, °С			
	–60	20	60	80
Предел прочности, МПа	$\frac{242-550}{429}$	$\frac{450-525}{500}$	$\frac{390-490}{443}$	$\frac{330-487}{425}$
Модуль упругости, ГПа	$\frac{20-25}{23}$	$\frac{24-26}{25}$	$\frac{16-22}{20}$	$\frac{17-22}{20}$
Относительное удлинение при разрыве, %	$\frac{1,2-2,4}{1,9}$	$\frac{1,8-2,2}{2,0}$	$\frac{2,1-2,5}{2,3}$	$\frac{1,5-2,4}{2,1}$
Коэффициент Пуассона	$\frac{0,12-0,15}{0,13}$	$\frac{0,14-0,19}{0,16}$	$\frac{0,11-0,14}{0,13}$	$\frac{0,10-0,13}{0,12}$
Примечание. В числителе приведен диапазон значений, в знаменателе – среднее арифметическое значение.				

Из представленных данных видно, что образцы стеклопластика удовлетворяют требованиям технического задания по прочности при растяжении. Наблюдается незначительное влияние температуры на прочностные и упругие характеристики материала (уровень сохранения свойств ≥ 85 %). Кроме того, зафиксировано увеличение относительного удлинения материала при возрастании температуры, обусловленное размягчением полимерной матрицы и, как следствие, повышением значений эластических

свойств материала. Кроме того, следует отметить незначительное изменение коэффициента Пуассона при варьировании температуры испытаний. Результаты испытаний на растяжение подтверждают работоспособность стеклопластика при приложении растягивающих напряжений в исследованном интервале температур.

Результаты испытаний стеклопластика на сжатие представлены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты испытаний стеклопластика ВПС-58 на сжатие

Характеристика	Значения характеристик при температуре испытания, °С			
	-60	20	60	80
Предел прочности, МПа	$\frac{340-430}{384}$	$\frac{300-400}{343}$	$\frac{220-350}{299}$	$\frac{180-290}{261}$
Модуль упругости, ГПа	$\frac{26-31}{29}$	$\frac{26-30}{28}$	$\frac{24-30}{27}$	$\frac{24-26}{25}$
Коэффициент Пуассона	$\frac{0,11-0,13}{0,12}$	$\frac{0,13-0,16}{0,14}$	$\frac{0,11-0,17}{0,13}$	$\frac{0,11-0,14}{0,13}$

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

Из представленных данных видно, что образцы стеклопластика ВПС-58 удовлетворяют требованиям технического задания по прочности при сжатии. Наблюдается более сильное влияние температуры на прочностные характеристики (уровень сохранения свойств $\geq 76\%$) по сравнению с испытанием на растяжение, однако сохраняемость упругих свойств при повышенной температуре достаточно велика ($\geq 89\%$). Это дает основание полагать, что влияние температуры на упруго-прочностные свойства стеклопластика при сжатии незначительно. Кроме того, следует отметить практически одинаковые значения коэффициента Пуассона при изменении температуры испытаний. Результаты испытаний на сжатие также подтверждают работоспособность стеклопластика при приложении сжимающих напряжений в исследованном интервале температур.

Кроме испытаний на растяжение и сжатие, к которым предъявляли минимальные требования, проведены испытания на трехточечный изгиб. Данный вид нагружения является комплексным, требования по минимальным значениям в этом случае не предъявляются. Однако определение именно этого параметра нагружения важно для понимания механики совместной работы матрицы и армирующего наполнителя в ПКМ. Результаты испытаний стеклопластика на изгиб представлены в табл. 4.

Таблица 4

Результаты испытаний стеклопластика ВПС-58 на изгиб

Характеристика	Значения характеристик при температуре испытания, °С			
	-60	20	60	80
Предел прочности, МПа	$\frac{480-770}{638}$	$\frac{480-770}{601}$	$\frac{370-580}{476}$	$\frac{355-420}{396}$
Модуль упругости, ГПа	$\frac{18-26}{21}$	$\frac{20-25}{23}$	$\frac{17-25}{22}$	$\frac{17-24}{20}$

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

Из представленных данных видно, что уровень сохранения прочности стеклопластика при температуре 80 °С составляет 66 %. Поэтому, несмотря на удовлетворительные значения модуля упругости, рекомендовать стеклопластик ВПС-58 для изготовления несущих конструкций, работающих при температуре 80 °С, нельзя. Значения прочности и модуля упругости при температуре 60 °С оказались достаточными (уровень сохранения свойств составляет 79 %) для того, чтобы рекомендовать стеклопластик для изготовления несущих строительных конструкций, эксплуатируемых при температурах до 60 °С.

С целью определения прочностных характеристик стеклопластика при продолжительном статическом и динамическом нагружении проведены исследования длительной прочности и ползучести на базе 500 ч, а также малоциклового усталости при температуре 20 °С. Установлено, что длительная статическая прочность после приложения растягивающей нагрузки в течение 500 ч составляет 280 МПа, а динамическая прочность (предел выносливости на базе 10^4 циклов): 150 МПа. Результаты проведенных испытаний представлены в табл. 5.

Таблица 5

**Результаты испытаний стеклопластика ВПС-58
на ползучесть при растяжении ($\sigma_{\max} = 280$ МПа)**

$\sigma/\sigma_{\max}, \%$	Деформация, %, на базе времени, ч			
	0,1	10	100	500
50	0,618	0,632	0,655	0,673
70	0,940	0,964	0,986	1,022
90	1,327	1,359	1,375	1,481

Полученные данные подтверждают работоспособность стеклопластика ВПС-58 в длительном временном интервале при приложении нагрузки, близкой к максимально допустимой. Это позволяет изготавливать из него несущие конструкции, надежно воспринимающие получаемые нагрузки продолжительное время.

Вместе с механическим нагружением на конструкцию влияют и факторы внешней среды, такие как знакопеременные температуры, тепло и влага и др. [32–35]. В связи с этим для оценки влияния эксплуатационных факторов на свойства исследуемого ПКМ проведена выдержка образцов в различных средах (табл. 6–10).

Результаты испытаний стеклопластика после теплового старения приведены в табл. 6.

Таблица 6

Результаты испытаний образцов стеклопластика ВПС-58 после теплового старения

Характеристика	Температура экспозиции, °С	Значения характеристик при продолжительности экспозиции, ч				
		0	500	1000	1500	2000
Предел прочности при изгибе, МПа	60	<u>480–770</u>	<u>464–646</u> 536	<u>427–592</u> 540	<u>505–603</u> 575	<u>483–677</u> 547
	80	601	<u>470–625</u> 542	<u>446–678</u> 550	–	
Температура стеклования, °С	80	107	–			120

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

Уровень сохранения прочностных характеристик составляет от 89 до 95 %, причем их изменение не носит линейный характер при экспозиции как при 60 °С, так и при 80 °С. В целом, оценивая полученные значения, можно констатировать, что воздействие повышенных температур не оказывает существенного влияния на стеклопластик. Изменения массы образцов после выдержки при разных температурах не выявлено.

Результаты испытаний образцов стеклопластика после экспозиции в тепловлажных условиях при $T = 60$ °С и $\phi = 85$ %, при $T = 28$ °С и $\phi = 85$ %, а также в микологической камере приведены в табл. 7 и 10. Фотография образца, пораженного спорами грибов после выдержки, представлена на рис. 4.

Результаты испытаний стеклопластика ВПС-58 после тепловлажностных испытаний и экспозиции в микологической камере

Характеристика	Условия экспозиции	Значения характеристик при продолжительности экспозиции, мес.			
		0	1	2	3
Предел прочности при изгибе, МПа	$T = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\varphi = 85\%$	480–770 601	<u>410–585</u> 519	<u>385–590</u> 492	–
	$T = 28\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\varphi = 98\%$		<u>461–603</u> 546	<u>526–583</u> 538	<u>448–621</u> 522
	$T = 28\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\varphi = 98\%$, споры грибов		<u>440–628</u> 521	<u>412–536</u> 497	<u>419–602</u> 499
Степень поражения, баллы	$\varphi = 98\%$, споры грибов	–	0		
Температура стеклования, $^{\circ}\text{C}$	$T = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\varphi = 85\%$	107	–	122	–
Примечание. В числителе приведен диапазон значений, в знаменателе – среднее арифметическое значение.					

Представленные данные свидетельствуют о достаточно высоком уровне сохранения свойств стеклопластика после выдержки в тепловлажностных условиях. Так, уровень сохранения свойств после выдержки в течение 2 мес. при $T = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $\varphi = 85\%$ составляет 81 %; после выдержки в течение 3 мес. при $T = 28\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $\varphi = 98\%$ достиг 86 %; в условиях поражения спорами грибов после 3 мес. выдержки находится на уровне 83 %. Следует отметить, что влияние микологических факторов на прочностные характеристики ПКМ более значительно, чем влияние, оказываемое тепловлажностными условиями выдержки, несмотря на визуальное отсутствие следов поражения (рис. 4).



Рис. 4. Фрагмент образца стеклопластика после выдержки в микологической камере

Результаты испытаний стеклопластика после выдержки в воде и камере тропического климата приведены в табл. 8 и 10.

В результате ускоренных климатических испытаний выявлено, что снижение уровня свойств после выдержки не превышает 18 %, что является хорошим показателем устойчивости стеклопластика к воздействию климатических факторов [36–39]. При этом максимальное снижение уровня свойств выявлено после выдержки при $T = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $\varphi = 85\%$. В некоторых случаях (после тепловых и тепловлажностных воздействий) увеличилась прочность при изгибе, что объясняется упрочнением структуры ПКМ вследствие воздействия повышенных температур и сшивки макромолекул матрицы в материале.

Таблица 8

**Результаты испытаний стеклопластика ВПС-58
после выдержки в воде и в камере тропического климата**

Характеристика	Условия экспозиции	Значения характеристик при продолжительности экспозиции, мес.			
		0	1	2	3
Предел прочности при изгибе, МПа	Вода при температуре 20 °С	480–770	<u>455–588</u> 502	–	
	Камера тропического климата	601	<u>424–580</u> 516	<u>427–701</u> 543	<u>445–598</u> 502
Температура стеклования, °С	Вода при температуре 20 °С	107	105	–	
	Камера тропического климата		–	113	

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

Результаты исследований влияния автомобильного топлива и масла на физико-механические показатели исследуемого стеклопластика представлены в табл. 9, 10 и на рис. 5.

Таблица 9

**Прочность при изгибе стеклопластика ВПС-58 после выдержки
в автомобильном топливе и масле**

Условия экспозиции	Предел прочности при изгибе стеклопластика, МПа	
	в исходном состоянии	после экспозиции
Бензин марки АИ-92	480–770 601	<u>472–649</u> 574
Дизельное топливо марки Л		<u>501–632</u> 556
Моторное масло вязкостью, мм ² /с: 4–8 20–24		<u>452–603</u> 533 <u>509–596</u> 566

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

Таблица 10

**Изменение массы образцов стеклопластика ВПС-58 после выдержки
в контактирующих жидкостях**

Условия экспозиции	Изменение массы, %, при продолжительности экспозиции, ч (сут)					
	24 (1)	120 (5)	240 (10)	480 (20)	720 (30)	1464 (61)
Тепловлажностные испытания	0,0754	0,1828	0,2012	0,2069	0,2081	0,2080
Вода при температуре 20 °С	<u>0,10–0,20</u> 0,16	<u>0,20–0,36</u> 0,28	<u>0,31–0,42</u> 0,38	<u>0,32–0,44</u> 0,39	<u>0,33–0,46</u> 0,40	–
Бензин марки АИ-92	<u>0,04–0,13</u> 0,09	<u>0,04–0,11</u> 0,08	<u>0,05–0,11</u> 0,08	<u>0,05–0,10</u> 0,07	<u>0,02–0,11</u> 0,06	
Дизельное топливо марки Л	<u>0,30–0,45</u> 0,39	<u>0,10–0,30</u> 0,23	<u>0,17–0,34</u> 0,24	<u>0,14–0,24</u> 0,19	<u>0,10–0,36</u> 0,16	
Моторное масло вязкостью, мм ² /с: 4–8 20–24	<u>0,52–0,73</u> 0,60	<u>0,52–0,76</u> 0,62	<u>0,31–0,90</u> 0,57	<u>0,31–0,87</u> 0,57	<u>0,19–0,85</u> 0,55	
	<u>0,61–0,77</u> 0,70	<u>0,57–0,68</u> 0,62	<u>0,58–0,64</u> 0,61	<u>0,44–0,62</u> 0,55	<u>0,49–0,65</u> 0,56	

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

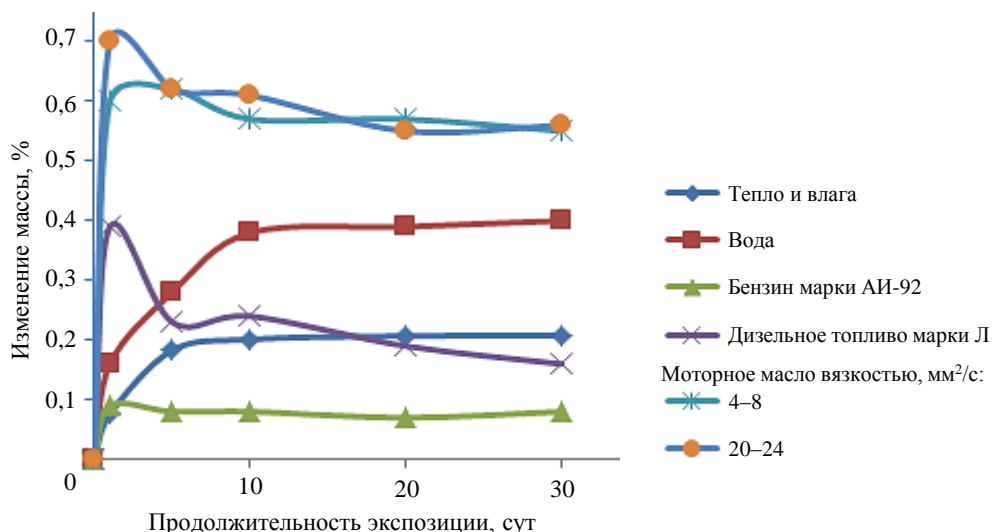


Рис. 5. Зависимости изменения массы образцов стеклопластика ВПС-58 от продолжительности выдержки в различных средах

Установлено, что влияние моторного масла на ПКМ наиболее существенно как с точки зрения увеличения массы после выдержки (на 0,7 %), так и исходя из сохраняемости прочностных характеристик (88 %). Влияние бензина марки АИ-92 и дизельного топлива марки Л на прочность при изгибе оказалось сопоставимым: уровень сохранения свойств составил 95 и 92 % соответственно. Полученные данные свидетельствуют о незначительном влиянии автомобильных горюче-смазочных материалов на стеклопластик ВПС-58, что позволяет использовать его в том числе для изготовления конструкций, применяемых при строительстве автодорожных объектов.

Заключения

В результате всесторонних исследований определены физико-механические характеристики стеклопластика ВПС-58, а также выявлено влияние на них эксплуатационных факторов. Показано, что упруго-прочностные характеристики стеклопластика позволяют использовать его для изготовления несущих строительных конструкций, работоспособных в интервале температур от -60 до $+60$ °С. При этом физико-механические характеристики ПКМ значительно превышают минимально допустимые значения, что в свою очередь позволяет уменьшить толщину и массу конструкции при обеспечении необходимой несущей способности. Это благоприятно отражается на массогабаритных характеристиках и стоимости сооружения.

Влияние эксплуатационных факторов на физико-механические характеристики ПКМ незначительно. Максимальное влияние на прочностные характеристики оказала экспозиция в тепловлажностных условиях при $T = 60$ °С и $\varphi = 85$ % (уровень сохранения свойств составил 82 %). Максимальное увеличение массы стеклопластика (0,7 %) выявлено после выдержки в моторном масле вязкостью 20–24 мм²/с. Для снижения влияния факторов экспозиции на поведение материала в процессе эксплуатации можно рекомендовать нанесение на поверхность изделия защитного лакокрасочного материала.

Список источников

1. Каблов Е.Н., Чурсова Л.В., Бабин А.Н., Мухаметов Р.Р., Панина Н.Н. Разработки ФГУП «ВИАМ» в области расплавных связующих для полимерных композиционных материалов // Полимерные материалы и технологии. 2016. Т. 2. № 2. С. 37–42.

2. Каблов Е.Н., Лаптев А.Б., Прокопенко А.Н., Гуляев А.И. Релаксация полимерных композиционных материалов под длительным действием статической нагрузки и климата (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2021. № 4 (65). Ст. 08. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 05.10.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-70-80.
3. Путилина П.М., Куцевич К.Е., Исаев А.Ю. Полимерные композиционные материалы на основе углеродных и стеклянных волокон для изготовления деталей беспилотных летательных аппаратов и перспективы их развития // *Труды ВИАМ*. 2023. № 8 (126). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 11.12.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-8-85-99.
4. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения и цифровые технологии их переработки // *Вестник Российской академии наук*. 2020. Т. 90. № 4. С. 331–334.
5. Перепелкин К.Е. Армирующие волокна и волокнистые полимерные композиты. М.: Научные основы и технологии, 2009. 386 с.
6. Михайлин Ю.А. Конструкционные полимерные композиционные материалы. М.: Научные основы и технологии, 2010. 822 с.
7. Евдокимов А.А., Петрова А.П., Раскутин А.Е. и др. Полимерные композиционные материалы для применения в строительной индустрии // *Сб. тез. VIII Всерос. молодежного научного форума «OpenScience 2021»*. Гатчина: НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, 2021. С. 124.
8. Власенко Ф.С., Раскутин А.Е. Применение полимерных композиционных материалов в строительных конструкциях // *Труды ВИАМ*. 2013. № 8. Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 11.12.2024).
9. Евдокимов А.А., Имаметдинов Э.Ш., Малаховский С.С. Усиление строительных конструкций из бетона системой внешнего армирования из углепластика // *Труды ВИАМ*. 2020. № 10 (92). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 11.12.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-10-73-80.
10. Евдокимов А.А., Венедиктова М.А., Вахрушева Я.А. и др. Опыт применения полимерных материалов при возведении арочных быстровозводимых мостовых сооружений // *Материалы Междунар. науч.-практ. конф. «Материаловедение, формообразующие технологии и оборудование»*. Симферополь: КФУ, 2024. С. 127–136.
11. Ткачук А.И., Загора А.Г., Донецкий К.И., Евдокимов А.А. Связующие для полимерных композиционных материалов, применяемых при строительстве быстровозводимых мостовых сооружений // *Труды ВИАМ*. 2020. № 12 (94). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 11.12.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-12-67-74.
12. Коган Д.И., Чурсова Л.В., Петрова А.П. Анализ технологий производства изделий из непрерывно армированных полимерных композиционных материалов безавтоклавными способами изготовления (обзор) // *Композиционные материалы*. 2011. № 11. С. 2–6.
13. Седов Л.Н., Михайлова З.В. Ненасыщенные полиэфирсы. М.: Химия, 1977. 232 с.
14. Большаков В.А., Антюфеева Н.В. Оценка модели процесса отверждения клеевого связующего в препреге // *Авиационные материалы и технологии*. 2023. № 4 (73). Ст. 07. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 20.10.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-4-66-77.
15. Бобылев В.А. Специальные эпоксидные смолы для клеев и герметиков // *Клеи. Герметики. Технологии*. 2005. № 5. С. 8–11.
16. Ткачук А.И., Донецкий К.И., Терехов И.В., Караваяев Р.Ю. Применение термореактивных связующих для изготовления полимерных композиционных материалов методами безавтоклавного формования // *Авиационные материалы и технологии*. 2021. № 1 (62). Ст. 03. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 21.12.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-22-33.
17. Евдокимов А.А., Раскутин А.Е., Мишкин С.И. и др. Арочные мосты с применением углепластиковых арочных элементов // *Конструкции из композиционных материалов*. 2019. № 2 (154). С. 22–29.
18. Михалдыкин Е.С. Применение трубобетонных конструкций с оболочкой из полимерных композиционных материалов при строительстве малых мостов: дис. ... канд. техн. наук. М., 2021. 111 с.

19. 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.
20. Старцев В.О. Старение полимерных композиционных материалов в морской воде (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2023. № 1 (70). Ст. 12. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 21.12.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-1-148-170.
21. Sherriff M., Knibbs R.W., Langley P.G. Mechanism for the action of tackifying resins in pressure-sensitive adhesives // Journal of Applied Polymer Science. 1973. Vol. 17. P. 3423–3438.
22. Hata T., Tsukatani T., Mizumachi H. Holding power (tb) and sliding friction coefficient of pressure sensitive adhesives // Journal of the Adhesion Society Japan. 1994. Vol. 30. P. 307–312.
23. Allen K.W. A review of contemporary views of theories of adhesion // The Journal of Adhesion. 1987. Vol. 21. P. 261–277.
24. Leong Y.C., Lee L.M.S., Gan S.N. The viscoelastic properties of natural rubber pressure-sensitive adhesive using acrylic resin as a tackifier // Journal of Applied Polymer Science. 2003. Vol. 88. P. 2118–2123.
25. Fujita M., Takemura A., Ono H. et al. Effects of miscibility and viscoelasticity on shear creep resistance of natural-rubber-based pressure-sensitive adhesives // Journal of Applied Polymer Science. 2000. Vol. 75. P. 1535–1545.
26. Fujita M., Kajiyama M., Takemura A. et al. Miscibility between natural rubber and tackifiers. I. Phase diagrams of the blends of natural rubber with rosin and terpene resins // Journal of Applied Polymer Science. 1987. Vol. 64. P. 2191–2197.
27. Fujita M., Kajiyama M., Takemura A. et al. Miscibility between natural rubber and tackifiers. II. Phase diagrams of the blends of natural rubber and petroleum resins // Journal of Applied Polymer Science. 1998. Vol. 67. P. 221–229.
28. Fujita M., Kajiyama M., Takemura A. et al. Effects of miscibility on peel strength of natural-rubber-based pressure-sensitive adhesives // Journal of Applied Polymer Science. 1998. Vol. 70. P. 777–784.
29. Whitehouse R.S., Counsell P.J.C. Composition of rubber/resin adhesive films: 1. Surface composition as determined by ATR-IR spectroscopy // Polymer. 1976. Vol. 17. P. 699–704.
30. Sherriff M. Peel adhesion and viscoelasticity of rubber-resin blends // Journal of Applied Polymer Science. 1980. Vol. 18. P. 2597–2608.
31. Афанасьев Д.В., Ощепков М.Ю. Безавтоклавные технологии // Композитный мир. 2010. № 5. С. 28–37.
32. 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.
33. 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.
34. Старцев В.О. Климатическая стойкость полимерных композиционных материалов и защитных покрытий в умеренно-теплом климате: дис. ... д-ра техн. наук. М., 2018. 297 с.
35. Старцев В.О., Валева Е.О., Гуляев А.И. Влияние старения поверхности полимерных композиционных материалов на их механические свойства // Труды ВИАМ. 2020. № 8 (90). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 11.12.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-8-64-76.
36. Вольнов О.И., Дудукин Д.О. Стеклопластик. История развития, технология производства, формообразование деталей и современное применение // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. 2014. № 5 (107). С. 400–404.
37. Петрова А.П., Исаев А.Ю., Лукина Н.Ф., Смирнов О.И. Влияние армирующего волокнистого наполнителя на свойства эпоксидно-полисульфидного клея ВК-36 // Клеи. Герметики. Технологии. 2022. № 8. С. 2–7.

38. Застрогина О.Б., Серкова Е.А., Сарычев И.А., Вавилова М.И. Влияние винифлекса российского и китайского производства на свойства связующего ВФТ и стеклотекстолита на его основе // *Авиационные материалы и технологии*. 2020. № 3 (60). С. 3–9. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-3-3-9.
39. 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.

References

1. Kablov E.N., Chursova L.V., Babin A.N., Mukhametov R.R., Panina N.N. Developments of FSUE VIAM in the field of melt binders for polymer composite materials. *Polimernye materialy i tekhnologii*, 2016, vol. 2, no. 2, pp. 37–42.
2. 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: October 05, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-70-80.
3. Putilina P.M., Kutsevich K.E., Isaev A.Yu. Carbon fiber-reinforced and glass fiber-reinforced polymer composites for the manufacture of components for unmanned aerial vehicles and their developing prospects. *Trudy VIAM*, 2023, no. 8 (126), paper no. 08. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: December 11, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-8-85-99.
4. Kablov E.N. New Generation Materials and Digital Technologies for Their Processing. *Vestnik Rossiyskoy akademii nauk*, 2020, vol. 90, no. 4, pp. 331–334.
5. Perepelkin K.E. *Reinforcing Fibers and Fiber Polymer Composites*. Moscow: Scientific Foundations and Technologies, 2009, 386 p.
6. Mikhaylin Yu.A. *Structural Polymer Composite Materials*. Moscow: Scientific Foundations and Technologies, 2010, 822 p.
7. Evdokimov A.A., Petrova A.P., Raskutin A.E. et al. Polymer Composite Materials for Application in the Construction Industry. *Reports VIII All-Rus. Youth Scientific Forum «OpenScience 2021»*. Gatchina: NRC «Kurchatov Institute» – PNPI, 2021, p. 124.
8. Vlasenko F.S., Raskutin A.E. Applying FRP in building structures. *Trudy VIAM*, 2013, no. 8, paper no. 03. Available at: <http://viam-works.ru> (accessed: December 11, 2024).
9. Evdokimov A.A., Imametdinov E.Sh., Malakhovskiy S.S. Strengthening concrete building structure via reinforcement external system from carbon plastic. *Trudy VIAM*, 2020, no. 10 (92), paper no. 08. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: December 11, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-10-73-80.
10. Evdokimov A.A., Venediktova M.A., Vakhrusheva Ya.A., et al. Experience of using polymeric materials in the construction of prefabricated arched bridge structures. *Proc. of the Int. Sc. and Pract. Conf. «Materials Science, Form-Generating Technologies and Equipment»*. Simferopol: KFU, 2024, pp. 127–136.
11. Tkachuk A.I., Zagora A.G., Donetsk K.I., Evdokimov A.A. Polymeric matrixes for composite materials used in the construction of quickly built bridge structures. *Trudy VIAM*, 2020, no. 12 (94), paper no. 07. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: December 11, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-12-67-74.
12. Kogan D.I., Chursova L.V., Petrova A.P. Analysis of production technologies for continuously reinforced polymer composite materials using non-autoclave manufacturing methods (review). *Kompozitsionnye materialy*, 2011, no. 11, pp. 2–6.
13. Sedov L.N., Mikhailova Z.V. *Unsaturated polyesters*. Moscow: Khimiya, 1977, 232 p.
14. Bolshakov V.A., Antyufeeva N.V. Evaluation of the curing process model of the adhesive binder in prepreg. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 4 (73), paper no. 07. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: October 20, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-4-66-77.

15. Bobylev V.A. Special epoxy resins for adhesives and sealants. *Klei. Germetiki. Tekhnologii*, 2005, no. 5, pp. 8–11.
16. 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), paper no. 03. Available at: <https://www.journal.viam.ru> (accessed: December 21, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-22-33.
17. Evdokimov A.A., Raskutin A.E., Mishkin S.I. et al. Arched bridges using carbon fiber arch elements. *Konstruktsii iz kompozitsionnykh materialov*, 2019, no. 2 (154), pp. 22–29.
18. Mikhaldykin E.S. *Use 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.
19. 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.
20. Startsev V.O. The degradation of polymer composite materials in seawater (review). *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 1 (70), paper no. 12. URL: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: December 21, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-1-148-170.
21. Sherriff M., Knibbs R.W., Langley P.G. Mechanism for the action of tackifying resins in pressure-sensitive adhesives. *Journal of Applied Polymer Science*, 1973, vol. 17, pp. 3423–3438.
22. Hata T., Tsukatani T., Mizumachi H. Holding power (tb) and sliding friction coefficient of pressure sensitive adhesives. *Journal of the Adhesion Society Japan*, 1994, vol. 30, pp. 307–312.
23. Allen K.W. A review of contemporary views of theories of adhesion. *The Journal of Adhesion*, 1987, vol. 21, pp. 261–277.
24. Leong Y.C., Lee L.M.S., Gan S.N. The viscoelastic properties of natural rubber pressure-sensitive adhesive using acrylic resin as a tackifier. *Journal of Applied Polymer Science*, 2003, vol. 88, pp. 2118–2123.
25. Fujita M., Takemura A., Ono H. et al. Effects of miscibility and viscoelasticity on shear creep resistance of natural-rubber-based pressure-sensitive adhesives. *Journal of Applied Polymer Science*, 2000, vol. 75, pp. 1535–1545.
26. Fujita M., Kajiyama M., Takemura A. et al. Miscibility between natural rubber and tackifiers. I. Phase diagrams of the blends of natural rubber with rosin and terpene resins. *Journal of Applied Polymer Science*, 1987, vol. 64, pp. 2191–2197.
27. Fujita M., Kajiyama M., Takemura A. et al. Miscibility between natural rubber and tackifiers. II. Phase diagrams of the blends of natural rubber and petroleum resins. *Journal of Applied Polymer Science*, 1998, vol. 67, pp. 221–229.
28. Fujita M., Kajiyama M., Takemura A. et al. Effects of miscibility on peel strength of natural-rubber-based pressure-sensitive adhesives. *Journal of Applied Polymer Science*, 1998, vol. 70, pp. 777–784.
29. Whitehouse R.S., Counsell P.J.C. Composition of rubber/resin adhesive films: 1. Surface composition as determined by ATR-IR spectroscopy. *Polymer*, 1976, vol. 17, pp. 699–704.
30. Sherriff M. Peel adhesion and viscoelasticity of rubber-resin blends. *Journal of Applied Polymer Science*, 1980, vol. 18, pp. 2597–2608.
31. Afanasyev D.V., Oshchepkov M.Yu. Non-autoclave technologies. *Kompozitniy mir*, 2010, no. 5, pp. 28–37.
32. 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.
33. 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.
34. Startsev V.O. *Climatic resistance of polymer composite materials and protective coatings in a moderately warm climate*: thesis, Dr of Sc. (Tech.). Moscow, 2018, 297 p.

35. 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), paper no. 07. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: December 11, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-8-64-76.
36. Volnov O.I., Dudukin D.O. Fiberglass. History of development, production technology, shaping of parts and modern application. *Trudy NGTU im. R.E. Alekseeva*, 2014, no. 5 (107), pp. 400–404.
37. Petrova A.P., Isaev A.Yu., Lukina N.F., Smirnov O.I. Influence of reinforcing fiber filler on the properties of epoxy-polysulfide adhesive VK-36. *Klei. Germetiki. Tekhnologii*, 2022, no. 8, pp. 2–7.
38. Zastrogina O.B., Serkova E.A., Sarychev I.A., Vavilova M.I. Influence of Russian and Chinese vinylflex on the properties of the VFT binder and fiberglass based on it. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 3 (60), pp. 3–9. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-3-3-9.
39. Petrova A.P., Malysheva G.V. *Adhesives, adhesive binders and adhesive prepregs*: textbook. Ed. E.N. Kablov. Moscow: VIAM, 2017, 472 p.

Информация об авторах

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

Вешкин Евгений Алексеевич, начальник УНТИЦ, 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

Баранников Александр Александрович, начальник лаборатории, 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

Evgeniy A. Veshkin, Head of USTC, 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

Alexander A. Barannikov, Head of Laboratory, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 13.02.2025; одобрена и принята к публикации после рецензирования 18.02.2025.

The article was submitted 13.02.2025; approved and accepted for publication after reviewing 18.02.2025.