

Научная статья

УДК 678.067.5:551.58

DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-7-226-236

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ СТЕКЛОВАНИЯ СТЕКЛОПЛАСТИКА В УСЛОВИЯХ ВЛАЖНОГО ТРОПИЧЕСКОГО КЛИМАТА

Е.О. Валевин¹, В.О. Старцев¹, А.А. Скирта¹, М.Р. Павлов¹

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

Аннотация. Представлены экспериментальные результаты длительных натурных климатических испытаний конструкционного стеклопластика на основе эпоксидного связующего, применяемого в авиационной промышленности, в условиях влажного тропического климата. Исследовано изменение релаксационного поведения материала после воздействия условий влажного тропического климата в течение 5 лет. Проведен сравнительный анализ полученных данных с результатами исследования после экспозиции стеклопластика в условиях умеренно теплого климата с мягкой зимой в г. Геленджике (РФ).

Ключевые слова: стеклопластик, климатические испытания, температура стеклования, прочность, пластификация, тропический климат

Для цитирования: Валевин Е.О., Старцев В.О., Скирта А.А., Павлов М.Р. Исследование изменения температуры стеклования стеклопластика в условиях влажного тропического климата // Труды ВИАМ. 2026. № 7 (161). С. 226–236. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-7-226-236.

Scientific article

RESEARCH ON CHANGES IN THE GLASS TRANSITION TEMPERATURE OF FIBERGLASS UNDER TROPICAL HUMID CLIMATE

E.O. Valevin¹, V.O. Startsev¹, A.A. Skirta¹, M.R. Pavlov¹

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 research presents experimental results of long-term field climatic tests of structural fiberglass based on an epoxy binder used in the aviation industry in a tropical humid climate on Hainan Island (PRC). The change in relaxation behavior of materials after exposure to tropical humid climate conditions lasting for 5 years was investigated. A comparative analysis of the obtained data with the results after exposure in a moderately warm climate (Gelenzhik, Russian Federation) was carried out.

Keywords: fiberglass, climatic tests, glass transition temperature, strength, plasticization, tropical climate

For citation: Valevin E.O., Startsev V.O., Skirta A.A., Pavlov M.R. Research on changes in the glass transition temperature of fiberglass under tropical humid climate. *Trudy VIAM*, 2026, no. 7 (161), pp. 226–236. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-7-226-236.

Введение

Результаты исследований стойкости полимерных композиционных материалов (ПКМ) в различных климатических условиях, представленные в работах [1–7], показали, что относительная влажность и температура воздуха являются одними из основных факторов, влияющих на свойства неметаллических материалов. Условия влажного тропического климата, характеризующиеся высокими среднегодовыми значениями относительной влажности воздуха и количества выпадающих осадков в сочетании с высокими значениями среднегодовой температуры воздуха, являются наиболее агрессивными для полимерных материалов [8].

В работе [9] показано, что длительное воздействие только влажности может привести к снижению прочностных свойств ПКМ на 15 %. Термовлажностное воздействие на углепластик привело к снижению уровня прочностных свойств на 27 %, что сопровождалось уменьшением температуры стеклования [10]. В работах [2, 11–20] показано, что сорбированная в процессе климатических испытаний влага в значительной степени влияет на прочностные свойства ПКМ за счет пластификации полимерной матрицы и ослабления взаимодействия фаз на границе «волокно–матрица». Сорбированная влага приводит также к релаксации как внутренних, так и внешних напряжений [21]. Кроме того, сорбированная влага может привести к необратимым изменениям, связанным с гидролизом полимерной матрицы [22].

В работе [23] изменения прочностных свойств ПКМ после натурных климатических испытаний оценили при максимальном равновесном содержании влаги в материале, а также в высушенном состоянии для оценки обратимого воздействия сорбированной влаги. Показано, что исследования ПКМ в состоянии полного высушивания и предельного влагонасыщения позволяют выявить обратимость изменения свойств за счет десорбции влаги, а также диапазон значений исследуемой характеристики при воздействии климатических факторов с учетом максимального количества сорбированной влаги в материале.

Результаты исследования изменения температуры стеклования и прочностных свойств стеклопластика ВПС-48/7781 после 3 лет натурных климатических испытаний в различных климатических районах представлены в работе [24].

Цель данной работы – исследование изменения прочностных свойств и температуры стеклования стеклопластика ВПС-48/7781 после 5 лет натурных климатических испытаний в условиях влажного тропического климата с учетом максимального равновесного содержания влаги в материале и обратимости влияния влаги на релаксационное поведение в сравнении с результатами, полученными после натурных климатических испытаний в условиях умеренно теплого климата.

Объекты и методы

В качестве объектов исследования рассмотрены образцы стеклопластика марки ВПС-48/7781 на основе эпоксидного связующего марки ВСЭ-1212 и стеклоткани 7781 со схемой армирования наполнителя [0]. Данный стеклопластик рекомендуется для изготовления деталей конструкционного назначения, в том числе створок капота, обтекателя пилона, узлов реверсивного устройства мотогондолы двигателя ПД-14.

Образцы стеклопластика экспонировали в виде плит в течение 5 лет в условиях влажного тропического климата и умеренно теплого климата с мягкой зимой в г. Геленджике (РФ). Отличительной особенностью влажного тропического климата являются высокие среднегодовые значения температуры (26,4 °C) и относительной влажности (78 %) воздуха в сочетании с высокой среднегодовой дозой суммарной солнечной радиации (~5000 МДж/м²).

Релаксационное поведение (изменение теплофизических характеристик) стеклопластика исследовали методом термического механического анализа согласно ASTM E 228–85 на образцах в исходном состоянии и после натуральных климатических испытаний. Температуру стеклования (расстекловывания) определяли по кривым зависимости относительного удлинения образцов от температуры как точку пересечения касательных, построенных в области стеклообразного и высокоэластичного состояния материала. Измерения проводили перпендикулярно плоскости армирования образцов на термомеханическом анализаторе ТМА со скоростью нагрева 5 К/мин, нагрузкой 3 сН в среде гелия с расходом продувки 70 мл/мин.

После длительных натуральных климатических испытаний определяли значения пределов прочности при сжатии, сдвиге и изгибе при комнатной температуре и при 120 °С в соответствии с ASTM D6641–09, ASTM D2344–13 и ASTM D7264–15.

Результаты и обсуждение

В табл. 1 представлены значения температуры стеклования ($T_{ст}$), начала (T_n) и окончания (T_k) процесса расстекловывания стеклопластика в исходном состоянии и после 5 лет экспозиции в условиях влажного тропического и умеренно теплого климата. После 5 лет натурной экспозиции для стеклопластика ВПС-48/7781 наблюдается снижение температуры стеклования на $\leq 9\%$, температуры начала процесса расстекловывания – на 17–32 % независимо от климатических условий.

Таблица 1

Температуры стеклования, начала и окончания процесса расстекловывания стеклопластика в исходном состоянии и после 5 лет экспозиции

Условия экспозиции	Температура, °С, стеклопластика					
	в исходном состоянии			после 5 лет экспозиции		
	T_n	$T_{ст}$	T_k	T_n	$T_{ст}$	T_k
Умеренно теплый климат	<u>151–154</u>	<u>161–162</u>	<u>175–180</u>	<u>126–127</u>	<u>148–150</u>	<u>202–205</u>
	153	162	178	127	149	204
Влажный тропический климат	<u>155–160</u>	<u>167–171</u>	<u>181–185</u>	<u>107–108</u>	<u>154–155</u>	<u>196–201</u>
	158	169	183	108	155	199
Примечание. $T_{ст}$, T_n и T_k – температуры стеклования, начала и окончания процесса расстекловывания соответственно. В числителе указан диапазон значений, в знаменателе – среднее значение.						

Снижение температур стеклования и начала процесса расстекловывания свидетельствует об увеличении молекулярно-тепловой подвижности полимерной матрицы после воздействия климатических факторов. Кроме того, в процессе длительных натуральных климатических испытаний расширяется весь температурный диапазон процесса стеклования полимерной матрицы в стеклопластике. Данные изменения вызваны как сорбированной влагой, оказывающей пластифицирующий эффект, так и возможными процессами термофотоокислительной деструкции полимерных цепей в матрице ПКМ.

С целью исследования обратимости изменения температуры стеклования под воздействием климатических факторов, приводящих в первую очередь к сорбции/десорбции химически несвязанной воды, часть образцов в исходном состоянии и после длительных климатических испытаний дополнительно сушили при 60 °С и относительной влажности $<5\%$ до состояния, преимущественно свободного от несвязанной влаги. Часть образцов в исходном состоянии и после длительных климатических испытаний также подвергали кондиционированию в стационарных условиях при 60 °С и относительной влажности воздуха 85 % до равновесной влажности. В процессе сушки и

кондиционирования гравиметрическим методом определяется относительное изменение массы образцов, а критерием достижения необходимого состояния является стабилизация относительного изменения массы. Указанные режимы дополнительной обработки позволяют получить данные о состоянии материала в критических условиях воздействия тропического климата (длительное воздействие прямого солнечного излучения и осадков в виде дождя). Далее для образцов без дополнительной обработки (в «моментальном» состоянии), после сушки и кондиционирования определяли температуру стеклования методом термического механического анализа. В табл. 2 и 3 представлены результаты данных измерений для образцов стеклопластика после натурной экспозиции в течение 5 лет.

Таблица 2

**Средние значения температуры стеклования, начала и окончания процесса
расстекловывания стеклопластика после высушивания**

Условия экспозиции	Температура, °С, стеклопластика					
	в исходном состоянии			после 5 лет экспозиции		
	T_n	$T_{ст}$	T_k	T_n	$T_{ст}$	T_k
Умеренно теплый климат	160	164	176	136	170	190
Влажный тропический климат	165	170	182	147	190	247
Примечание. $T_{ст}$, T_n и T_k – температуры стеклования, начала и окончания процесса расстекловывания соответственно.						

Таблица 3

**Средние значения температуры стеклования, начала и окончания процесса
расстекловывания стеклопластика после предельного влагонасыщения**

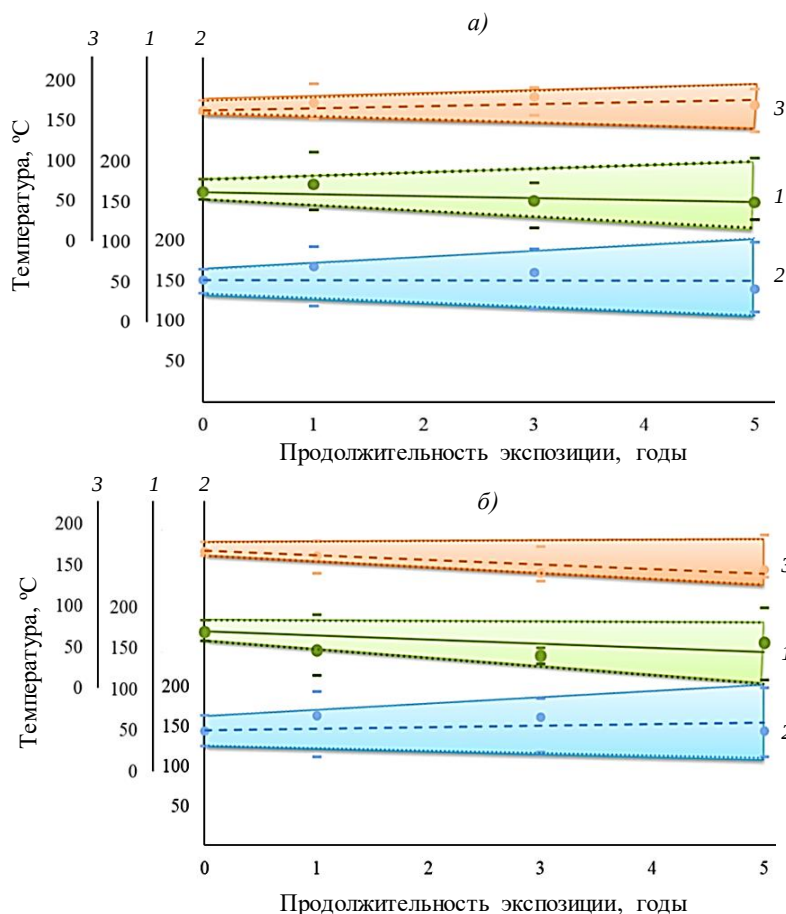
Условия экспозиции	Температура, °С, стеклопластика					
	в исходном состоянии			после 5 лет экспозиции		
	T_n	$T_{ст}$	T_k	T_n	$T_{ст}$	T_k
Умеренно теплый климат	135	152	165	112	141	199
Влажный тропический климат	125	145	163	111	144	198
Примечание. $T_{ст}$, T_n и T_k – температуры стеклования, начала и окончания процесса расстекловывания соответственно.						

Аналогичные исследования проведены для данного стеклопластика после экспозиции в течение 1 и 3 лет. Обобщенные изменения релаксационного поведения стеклопластика в «моментальном» состоянии, т. е. после съема с климатических испытаний, и в состояниях после последующих сушки и увлажнения после длительных натурных климатических испытаний в условиях влажного тропического и умеренно теплого климата представлены на рисунке.

Следует обратить внимание на тот факт, что диапазон температур начала и окончания процесса расстекловывания образцов стеклопластика в увлажненном и высушенном состояниях расширяется при увеличении продолжительности натурной экспозиции в условиях влажного тропического климата. Изменение температуры в этих двух областях значений свидетельствует о значительном влиянии свободной сорбированной влаги и, как следствие, обратимости процесса пластификации полимерной матрицы при натурных климатических испытаниях.

Область температур стеклования в «моментальном» состоянии частично включает значения двух диапазонов (для образцов в увлажненном и высушенном состояниях), характеризует все изменения, произошедшие в полимерной матрице и на границе раздела фаз «волокно–матрица», влияющие на релаксационное поведение стеклопластика, и свидетельствует о снижении температуры стеклования после длительной

натурной экспозиции. Данное снижение может быть вызвано увеличивающимся со временем пластифицирующим действием сорбированной влаги и накоплением необратимых изменений в материале под действием всего комплекса климатических факторов. Аналогичные изменения релаксационного поведения установлены для образцов после экспозиции в умеренно теплом климате, однако по сравнению с результатами, полученными для образцов после экспозиции во влажном тропическом климате, угол наклона аппроксимирующей прямой и диапазон температур начала и окончания процесса расстекловывания меньше.



Температура стеклования стеклопластика после 5 лет натуральных климатических испытаний в условиях влажного тропического (а) и умеренно теплого (б) климата в «моментальном» (1), увлажненном (2) и высушенном (3) состояниях после натуральных климатических испытаний

Одним из основных факторов, вызывающих снижение температуры стеклования образцов ПКМ, является сорбированная в процессе натуральных испытаний влага. Данный тезис проанализирован на основе результатов определения содержания влаги в образцах стеклопластика в исходном состоянии (до натурной экспозиции) и после экспозиции, которое проводили по ГОСТ 11736–78 титрованием по методу К. Фишера. Результаты исследования представлены в табл. 4.

После 5 лет натурной экспозиции в условиях умеренно теплого климата содержание влаги в стеклопластике ВПС-48/7781 увеличилось относительно исходного значения с 0,31 до 0,52 %. При экспозиции в условиях влажного тропического климата произошли более значительные изменения: содержание влаги увеличилось с 0,32 до 0,68 %.

Таблица 4

**Содержание влаги в образцах стеклопластика
после 5 лет натуральных климатических испытаний**

Условия экспозиции	Массовая доля влаги, %, в стеклопластике	
	в исходном состоянии	после 5 лет экспозиции
Умеренно теплый климат	$\frac{0,29-0,32}{0,31}$	$\frac{0,51-0,53}{0,52}$
Влажный тропический климат	$\frac{0,31-0,32}{0,32}$	$\frac{0,66-0,70}{0,68}$
Примечание. В числителе указан диапазон значений, в знаменателе – среднее значение.		

Относительное изменение массы образцов при высушивании, определенное гравиметрическим методом, после экспозиции в условиях умеренно теплого и влажного тропического климата составило 0,76 и 0,93 % соответственно. Эти значения превышают величины массовой доли влаги для этих же образцов, определенные методом титрования по К. Фишеру. Наиболее вероятной причиной расхождения результатов является то, что при длительных процессах непрерывной сушки (несколько суток) из стеклопластика удаляется не только сорбированная влага, но и образовавшиеся в результате деструкции полимерной матрицы низкомолекулярные соединения. При этом разница массовой доли влаги в образцах, экспонированных в условиях умеренно теплого и влажного тропического климата, составила 0,16 %, а разница относительного изменения массы образцов достигла 0,17 %. Несмотря на разницу абсолютных значений массовой доли влаги и относительного изменения массы, определенных соответственно титрованием по К. Фишеру и гравиметрически, при сопоставлении результатов климатических испытаний в различных районах земного шара, полученных двумя описанными методами, достигнута высокая сходимость. Параллельное применение метода титрования и гравиметрического метода позволяет получить более полную картину о состоянии образцов после климатических испытаний.

Относительное изменение массы при достижении равновесной влажности для образцов, экспонированных в условиях умеренно теплого и влажного тропического климата, составило 0,86 и 0,77 % соответственно. До начала кондиционирования в условиях повышенной влажности образцы предварительно высушили до постоянной массы (состояние преимущественно свободное от влаги и низкомолекулярных продуктов деструкции), поэтому величина относительного изменения массы при достижении равновесной влажности может быть принята в качестве предельного содержания влаги в материале для данных условий кондиционирования.

Таким образом, результаты определения температуры стеклования и диапазона температур начала и окончания процесса расстекловывания образцов в состоянии, преимущественно свободном от влаги, и состоянии равновесного влагосодержания являются крайними точками для климатически состаренного стеклопластика ВПС-48/7781 при изменении климатических условий эксплуатации изготовленных из него изделий.

Несмотря на разницу значений массовой доли влаги и относительного изменения массы образцов после экспозиции в различных климатических условиях, изменения температуры стеклования составляют ~8 %. Из этого можно сделать вывод, что на изменение температуры стеклования и релаксационное поведение ПКМ после натуральных климатических испытаний влияет не только сорбированная влага, но и другие климатические факторы, например температура воздуха и доза солнечной радиации, различающиеся в наибольшей степени.

Для оценки необратимых изменений в полимерной матрице стеклопластика, вызванных как сорбированной влагой, так и другими факторами климатического старения, определены значения средней молекулярной массы. Для этого полимерные компоненты

образцов стеклопластика экстрагировали в диоксане и анализировали на жидкостном хроматографе методом гель-проникающей (эксклюзионной) хроматографии. Экстракцию проводили путем обработки образцов в ультразвуковой ванне Сапфир УЗВ-2,8 в течение 30 мин с периодическим перемешиванием. Очистку полученных экстрактов от нерастворимых компонентов проводили путем фильтрования через мембранные фильтры с диаметром пор 0,45 мкм. Значения средней молекулярной массы полимерной основы анализируемого образца стеклопластика ВПС-48/7781 после 5 лет экспозиции представлены в табл. 5.

Таблица 5

**Молекулярная масса полимерной матрицы в стеклопластике
после 5 лет натурных климатических испытаний**

Показатель	Значение показателя для стеклопластика		
	в исходном состоянии	после 5 лет экспозиции в условиях	
		умеренно теплого климата	влажного тропического климата
Среднечисловая молекулярная масса M_n , а.е.м	10220	5675	5320
Средневесовая молекулярная масса M_w , а.е.м	31080	25220	25190

Уменьшение молекулярной массы свидетельствует о прошедших процессах деструкции и гидролиза молекулярных цепей под действием климатических факторов (температуры, ультрафиолетового излучения и сорбированной влаги). Наибольшие изменения определены для образцов после экспозиции в условиях влажного тропического климата. Полученные результаты в сочетании с величинами относительного изменения массы образцов при сушке, значениями содержания влаги в материале и изменениями температуры стеклования могут свидетельствовать о том, что более высокие уровни воздействующих климатических факторов в условиях влажного тропического климата приводят к более значительным необратимым изменениям в материале.

Установленные изменения теплофизических характеристик после натурной экспозиции в сочетании с результатами исследований после полного высушивания и при предельном влагонасыщении, а также результаты определения содержания влаги по методу К. Фишера свидетельствуют о значительном вкладе сорбированной влаги в процесс изменения релаксационного поведения полимерной матрицы в ПКМ, в первую очередь в условиях влажного тропического климата, где наблюдаются большие среднегодовые значения относительной влажности и количества осадков.

Снижение температуры начала процесса расстекловывания свидетельствует об увеличении молекулярной подвижности полимерной матрицы после воздействия климатических факторов. Данные изменения вызваны как сорбированной влагой, оказывающей пластифицирующий эффект, так и возможными процессами термической и фотоокислительной деструкции ответвлений полимерных цепей, приводящих к уменьшению молекулярной массы полимерных молекул и увеличению температурной подвижности менее тяжелых молекул полимерной матрицы. Более того, для образцов после 5 лет натурной экспозиции (как в высушенном, так и в предельно увлажненном состоянии) наблюдается расширение области расстекловывания, что может свидетельствовать об увеличении молекулярно-тепловой подвижности после экспозиции. Существенная деградация поверхности образцов стеклопластика, сопровождающаяся оголением армирующих волокон и увеличением истинной площади поверхности, приводит к интенсификации процесса сорбции влаги, что под действием температуры и ультрафиолетового излучения вызывает изменение центральных слоев и влияет на механические характеристики ПКМ.

Таблица 6

**Изменение прочностных характеристик стеклопластика ВПС-48/7781
после 5 лет натуральных климатических испытаний**

Характеристика	Изменение характеристик, %, после экспозиции в условиях	
	умеренно теплого климата	влажного тропического климата
Предел прочности при сжатии при температуре, °С: 20 120	–23,9 –22,2	–20,6 –35,8
Предел прочности при сдвиге при температуре, °С: 20 120	–13,1 –23,5	–31,5 –45,5
Предел прочности при изгибе при температуре, °С: 20 120	–17,2 –26,0	–27,5 –36,1

Существенные необратимые изменения в материале в условиях влажного тропического климата подтверждаются также результатами оценки изменения средней молекулярной массы, вызвавшего в свою очередь изменение прочностных свойств конструкционного стеклопластика. Так, в табл. 6 представлены изменения прочностных характеристик стеклопластика после 5 лет натурной экспозиции в условиях влажного тропического и умеренно теплого климата. Полученные результаты свидетельствуют о больших изменениях прочностных свойств после воздействия климатических условий влажного тропического климата, что также подтверждает более агрессивное воздействие данного климата на ПКМ. Наибольшие изменения установлены для значений, определенных при повышенной рабочей температуре. Однако следует отметить, что даже после 5 лет натурной экспозиции в условиях с повышенными среднегодовыми значениями относительной влажности и температуры воздуха стеклопластик, незащищенный лакокрасочным покрытием, обладает высокой сохраняемостью механических характеристик.

Заключения

Проведенные исследования позволяют сделать выводы, что сорбированная в процессе натуральных климатических испытаний влага в сочетании с другими климатическими факторами приводит к снижению температуры стеклования, увеличению диапазона температур стеклования и уменьшению температуры начала процесса расстекловывания полимерной матрицы.

Установленные изменения температуры стеклования после натурной экспозиции в сочетании с результатами исследования после полного высушивания и при предельном влагонасыщении, а также данные по содержанию влаги в образцах стеклопластика свидетельствуют о значительном вкладе сорбированной влаги в процесс старения полимерной матрицы в первую очередь в условиях влажного тропического климата, где наблюдаются большие среднегодовые значения относительной влажности и количества осадков. В состоянии предельного равновесного влагосодержания после длительной натурной экспозиции наблюдаются значения температуры стеклования на 5–7 % меньше по сравнению с результатами для образцов после климатических испытаний без увлажнения и на 13–15 % меньше исходных значений.

Однако не только сорбция влаги в процессе натурной экспозиции приводит к изменению релаксационного поведения полимерной матрицы и, как следствие, прочностных свойств. Необратимые изменения в полимерной матрице под действием таких климатических факторов, как температура воздуха и солнечная радиация, в сочетании с пластифицирующим и гидролизующим действием влаги также оказывают значительное влияние на свойства материалов.

Список источников

1. Каблов Е.Н., Старцев О.В., Кротов А.С., Кириллов В.Н. Климатическое старение композиционных материалов авиационного назначения. III. Значимые факторы старения // Деформация и разрушение материалов. 2011. № 1. С. 19–27.
2. Николаев Е.В. Сохраняемость служебных характеристик полимерных композиционных материалов для мотогондолы авиационных двигателей при воздействии климатических и эксплуатационных факторов: дис. ... канд. техн. наук. М.: ВИАМ, 2016. 123 с.
3. Sookay N.K., Klemperer C.J., Verijenko V.E. Environmental testing of advanced epoxy composites // Composite Structures. 2003. Vol. 62. P. 429–433.
4. Stifel P. Effect of long term outdoor exposure on composite materials // 20th Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference. St. Louis, 1979. P. 273–274.
5. Nishizaki I., Sasaki I., Tomiyama T. Outdoor exposure tests of pultruded CFRP plates // Proceedings of the 6th International Conference on FRP Composites in Civil Engineering (CICE 2012). Rome, 2012. Paper 11-096. P. 1–8.
6. Pérez-Pacheco E., Cauich-Cupul J.I., Valadez-González A., Herrera-Franco P.J. Effect of moisture absorption on the mechanical behavior of carbon fiber/epoxy matrix composites // Journal of Materials Science. 2013. Vol. 48. P. 1873–1882.
7. Gao C., Zhou C. Moisture absorption and cyclic absorption–desorption characters of fibre-reinforced epoxy composites // Journal of Materials Science. 2019. Vol. 54. No. 11. P. 8289–8301.
8. Велигодский И.М., Коваль Т.В., Курносов А.О., Мараховский П.С. Исследование климатической стойкости образцов стеклопластика после натурной экспозиции в различных климатических зонах // Труды ВИАМ. 2022. № 11 (117). С. 134–148. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 27.09.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-11-134-148.
9. Кириллов В.Н., Ефимов В.А. Проблемы исследования климатической стойкости авиационных неметаллических материалов // 75 лет. Авиационные материалы. Избранные труды «ВИАМ». М.: ВИАМ, 2007. С. 379–388.
10. Liu X., Su Q., Zhu J., Song X. The Aging Behavior and Life Prediction of CFRP Rods under a Hygrothermal Environment // Polymers. 2023. Vol. 15. No. 11. Art. 2490.
11. Старцев В.О., Старцев О.В., Зеленева Т.О., Варданян А.М. Влияние осадков на изменение массы образцов полимерных композиционных материалов в открытых климатических условиях // Авиационные материалы и технологии. 2024. № 1 (74). С. 136–154. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 27.09.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-1-136-154.
12. Каблов Е.Н., Старцев О.В., Кротов А.С., Кириллов В.Н. Климатическое старение композиционных материалов авиационного назначения. I. Механизмы старения // Деформация и разрушение материалов. 2010. № 11. С. 19–27.
13. Каблов Е.Н., Старцев О.В., Кротов А.С., Кириллов В.Н. Климатическое старение композиционных материалов авиационного назначения. II. Релаксация исходной структурной неравновесности и градиент свойств по толщине // Деформация и разрушение материалов. 2010. № 12. С. 40–46.
14. Heinrick M., Crawford B., Milani A.S. Degradation of Fibreglass Composites under Natural Weathering Conditions // MOJ Polymer Science. 2017. Vol. 1. No. 1. P. 18–24.
15. 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.
16. Каблов Е.Н., Старцев В.О., Лаптев А.Б. Старение полимерных композиционных материалов: учеб. пособие. М.: НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, 2023. 520 с.
17. Bonniau P., Bunsell A.R. A comparative study of water absorption theories applied to glass epoxy composites // Journal of Composite Materials. 1981. Vol. 15. No. 5. P. 272–293.
18. Кириллов В.Н., Кавун Н.С., Ракитина В.П. и др. Исследования влияния тепло-влажностного воздействия на свойства эпоксидных стеклопластиков // Пластические массы. 2008. № 9. С. 14–17.
19. Ageing of composites / Ed. R. Martin. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2008. 544 p.

20. Старцев О.В., Перепечко И.И., Старцева Л.Т., Машинская Г.П. Структурные изменения в пластифицированном сетчатом аморфном полимере // Высокомолекулярные соединения. Сер.: Б. 1983. Т. 25. № 6. С. 457–461.
21. 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: 14.11.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-70-80.
22. Mitsushima H. Strength degradation of GFRP by water // Proceedings of 22 Congress of Materials Research. Kyoto, 1979. P. 241–245.
23. 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: 09.09.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-5-110-118.
24. Старцев О.В., Скирта А.А., Старцев В.О., Валиев Е.О., Двирная Е.В. Сравнение свойств углепластиков и стеклопластиков на основе связующего ВСЭ-1212 после экспонирования в различных климатических зонах // Труды ВИАМ. 2024. № 7 (137). С. 77–92. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 09.09.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-7-77-92.

References

1. Kablov E.N., Startsev O.V., Krotov A.S., Kirillov V.N. Climatic aging of composite materials for aviation purposes. III. Significant factors of aging. *Deformatsiya i razrushenie materialov*, 2011, no. 1. pp. 19–27.
2. Nikolaev E.V. *Maintenance of service characteristics of polymer composite materials for aircraft engine nacelles when exposed to climatic and operational factors*: thesis, Cand. of Sc. (Tech.). Moscow: VIAM, 2016, 123 p.
3. Sookay N.K., Klemperer C.J., Verijenko V.E. Environmental testing of advanced epoxy composites. *Composite Structures*, 2003, vol. 62, pp. 429–433.
4. Stifel P. Effect of long term outdoor exposure on composite materials. *20th Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference*. St. Louis, 1979, pp. 273–274.
5. Nishizaki I., Sasaki I., Tomiyama T. Outdoor exposure tests of pultruded CFRP plates. *Proceedings of the 6th International Conference on FRP Composites in Civil Engineering (CICE 2012)*. Rome, 2012, paper 11-096, pp. 1–8.
6. Pérez-Pacheco E., Cauich-Cupul J.I., Valadez-González A., Herrera-Franco P.J. Effect of moisture absorption on the mechanical behavior of carbon fiber/epoxy matrix composites. *Journal of Materials Science*, 2013, vol. 48, pp. 1873–1882.
7. Gao C., Zhou C. Moisture absorption and cyclic absorption–desorption characters of fibre-reinforced epoxy composites. *Journal of Materials Science*, 2019, vol. 54, no. 11, pp. 8289–8301.
8. Veligodskiy I.M., Koval T.V., Kurnosov A.O., Marakhovskiy P.S. Study of resistance of glass fiber reinforced plastic to natural weathering in different climatic conditions. *Trudy VIAM*, 2022, no. 11 (117), pp. 134–148. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: September 27, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-11-134-148.
9. Kirillov V.N., Efimov V.A. Problems of studying the climatic resistance of aviation non-metallic materials. *75 years. Aviation materials. Selected works of «VIAM»*. Moscow: VIAM, 2007, pp. 379–388.
10. Liu X., Su Q., Zhu J., Song X. The Aging Behavior and Life Prediction of CFRP Rods under a Hygrothermal Environment. *Polymers*, 2023, vol. 15, no. 11, art. 2490.
11. Startsev V.O., Startsev O.V., Zeleneva T.O., Vardanyan A.M. Influence of precipitation on changes in the mass of samples of polymeric composite materials in open climatic conditions. *Aviation materials and technologies*, 2024, no. 1 (74), pp. 136–154. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: September 27, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-1-136-154.
12. Kablov E.N., Startsev O.V., Krotov A.S., Kirillov V.N. Climatic aging of composite materials for aviation purposes. I. Aging mechanisms. *Deformatsiya i razrusheniye materialov*, 2010, no. 11, pp. 19–27.

13. Kablov E.N., Startsev O.V., Krotov A.S., Kirillov V.N. Climatic aging of composite materials for aviation purposes. II. Relaxation of the initial structural nonequilibrium and the gradient of properties across the thickness. *Deformatsiya i razrusheniye materialov*, 2010, no. 12, pp. 40–46.
14. Heinrick M., Crawford B., Milani A.S. Degradation of Fibreglass Composites under Natural Weathering Conditions. *MOJ Polymer Science*, 2017, vol. 1, no. 1, pp. 18–24.
15. 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.
16. Kablov E.N., Startsev V.O., Laptev A.B. *Aging of polymer composite materials*: textbook. Moscow: NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, 2023, 520 p.
17. Bonniau P., Bunsell A.R. A comparative study of water absorption theories applied to glass epoxy composites. *Journal of Composite Materials*, 1981, vol. 15, no. 5, pp. 272–293.
18. Kirillov V.N., Kavun N.S., Rakitina V.P. et al. Studies of the influence of heat and humidity on the properties of epoxy fiberglass. *Plasticheskie massy*, 2008, no. 9, pp. 14–17.
19. *Ageing of composites*. Ed. R. Martin. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2008. 544 p.
20. Startsev O.V., Perepechko I.I., Startseva L.T., Mashinskaya G.P. Structural changes in plasticized cross-linked amorphous polymer. *Vysokomolekulyarnye soyedineniya. Ser.: B*, 1983, vol. 25, no. 6, pp. 457–461.
21. 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: November 14, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-70-80.
22. Mitsushima H. Strength degradation of GFRP by water. *Proceedings of 22 Congress of Materials Research*. Kyoto, 1979, pp. 241–245.
23. 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: September 09, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-5-110-118.
24. Startsev O.V., Skirta A.A., Startsev V.O., Valevin E.O., Dvirnaya E.V. Comparison of the properties of carbon fiber reinforced plastics and glass fiber reinforced plastics based on the VSE-1212 binder after exposure to different climatic zones. *Trudy VIAM*, 2024, no. 7 (137), pp. 77–92. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: September 09, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-7-77-92.

Информация об авторах

Валевин Евгений Олегович, заместитель начальника лаборатории, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Старцев Валерий Олегович, начальник лаборатории, д.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Скирта Александра Андреевна, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Павлов Михаил Рашитович, ведущий научный сотрудник, к.х.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Evgeny O. Valevin, Deputy Head of Laboratory, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Valery O. Startsev, Head of Laboratory, Doctor of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Aleksandra A. Skirta, Leading Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Mikhail R. Pavlov, Leading Researcher, Candidate of Sciences (Chem.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 11.12.2025; получена после доработки 20.03.2026; одобрена и принята к публикации после рецензирования 03.04.2026.

The article was submitted 11.12.2025; received in revised form 20.03.2026; approved and accepted for publication after reviewing 03.04.2026.