

УДК 678.747.2

*Е.В. Николаев<sup>1</sup>, С.Л. Барботько<sup>1</sup>, Н.П. Андреева<sup>1</sup>, М.Р. Павлов<sup>1</sup>, Д.В. Гращенков<sup>1</sup>***КОМПЛЕКСНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ КЛИМАТИЧЕСКИХ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ФАКТОРОВ НА НОВОЕ ПОКОЛЕНИЕ ЭПОКСИДНОГО СВЯЗУЮЩЕГО И ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ЕГО ОСНОВЕ****Часть 4. Натурные климатические испытания полимерных композиционных материалов на основе эпоксидной матрицы**

DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-6-11-11

*Проведена оценка сохраняемости прочностных характеристик полимерных композиционных материалов (углепластика и стеклопластика на основе эпоксидного связующего) по результатам натурных испытаний в четырех климатических зонах. Выполнен расчет эффективных значений температуры и влажности воздуха для каждой зоны экспозиции. Показана взаимосвязь между изменением механических характеристик полимерных композиционных материалов и изменением профиля поверхности образцов, определяемого методом оптической микроскопии.*

*Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 18.3. «Моделирование и прогнозирование климатической стойкости» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [1].*

**Ключевые слова:** полимерные композиционные материалы, эпоксидное связующее, углепластик, стеклопластик, натурные климатические испытания, профиль поверхности.

*Stability of strength characteristics of polymeric composite materials (layered carbon fiber and fiberglass based on epoxy binder) by results of natural weathering tests in four climatic zones has been evaluated. Calculation of effective values of temperature and air humidity for each zone of exposure is carried out. The interrelation between change of mechanical characteristics of polymeric composite materials and change of surface profile of the samples determined by method of optical microscopy is shown.*

*The work is executed within implementation of the complex scientific direction 18.3. «Modeling and forecasting of climatic tolerance» («The strategic directions of development of materials and technologies of their processing for the period till 2030») [1].*

**Keywords:** polymeric composite materials, epoxy binding, layered carbon fiber, fiberglass, natural weathering test, surface profile.

---

<sup>1</sup>Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal state unitary enterprise «All-Russian scientific research institute of aviation materials» State research center of the Russian Federation] E-mail: admin@viam.ru

**Введение**

К обеспечению безопасности эксплуатации авиационной техники предъявляются жесткие требования. На материалах, предназначенных для изготовления конструкций авиационной техники, проводятся всесторонние испытания и исследования, особое место среди которых занимают натурные климатические испытания. Наиболее существенное влияние на техническое состояние техники оказывает не механический износ, а процессы коррозии и старения материалов под действием климатических факторов [2, 3].

Все разрабатываемые полимерные материалы и композиты на их основе проходят комплексные климатические испытания в лабораторных и натуральных условиях: только испытания в натуральных условиях позволяют с высокой степенью достоверности оценить стойкость материалов к синергетическому воздействию климатических факторов. В серии работ показано влияние климатических факторов в натуральных условиях на свойства полимерных композиционных материалов (ПКМ), разработанных во ФГУП «ВИАМ» [4–20]. Значения основных климатических параметров, усредненных за многолетний период (от 25 лет и более) для умеренно холодного (г. Москва), умеренно теплого (г. Геленджик), теплого влажного (г. Сочи) и очень холодного (г. Якутск) климата в местах экспозиции, представлены в табл. 1. Так, если точное значение температуры в изделии в случае перегрева неизвестно, то (согласно ГОСТ 15150–69) эффективные значения температуры и влажность воздуха принимаются как среднегодовые по ГОСТ 16350–80.

Таблица 1

**Основные климатические параметры представительных пунктов в местах экспозиции в соответствии с ГОСТ 16350–80**

Климатический параметр	Значения параметра в месте экспозиции			
	г. Москва	г. Геленджик*	г. Сочи**	г. Якутск
Температура окружающей среды, °С:				
– минимальная	-41	-24	-15	-64
– максимальная	37	39	40	38
– среднегодовая	4,6	13	14,6	-10,6
Среднегодовая относительная влажность воздуха, %	76	72	79	67
Суммарная солнечная радиация, МДж/м <sup>2</sup>	3243,1	4910,7	5111,8	3712
Количество осадков, мм	582	724	2788	202

\* Согласно ГОСТ 16350–80 представительным пунктом для умеренно теплого климата являются города Новороссийск и Одесса.

\*\* Согласно ГОСТ 16350–80 представительным пунктом для теплого влажного климата является г. Батуми.

Однако для прогнозирования срока службы технических изделий в условиях воздействия климатических факторов применяют эффективные значения температурно-влажностного комплекса согласно ГОСТ 15150–69.

Срок службы технических изделий рассчитывается по уравнению:

$$L = A \exp\left(-\frac{B}{T_3}\right) \varphi_3^{-n} C^{-m}, \quad (1)$$

где  $T_3$  – эффективное значение температуры воздуха, К;  $\varphi_3$  – эффективное значение относительной влажности воздуха, %;  $C$  – концентрация агрессивной среды воздуха, г/м<sup>3</sup> или %;  $A$ ,  $B$ ,  $n$ ,  $m$  – постоянные коэффициенты, зависящие от природы материала и условий применения, определяемые экспериментально для конкретного материала (группы, системы материалов) или изделия.

Коэффициент  $B$  рассчитывается по уравнению:

$$B = \frac{E_3}{R}, \quad (2)$$

где  $E_3$  – эффективная энергия активации процесса, вызывающего отказ изделия (или старение материала), определяемая экспериментально для конкретного материала (группы, системы материалов) или изделия;  $R$  – универсальная газовая постоянная.

Для случая, когда отсутствует воздействие агрессивных сред, принимают  $m=0$  и уравнение (1) принимает вид:

$$L=A\exp\left(-\frac{B}{T_3}\right)\varphi_3^{-n}. \quad (3)$$

Для расчета срока службы применяются эффективные значения температуры и относительной влажности воздуха. Расчет эффективного значения температуры воздуха проводится по уравнению (4), эффективное значение относительной влажности воздуха – по уравнению (5):

$$T_3 = \frac{-B}{2,303 \left( \lg \sum_{K_n} \exp(-B/T_n) - \lg K_n \right)}; \quad (4)$$

$$\varphi_3 = 10^{(1/n) \left[ \lg \sum_{K_n} \exp\left(-\frac{B}{T_n}\right) \varphi_n^n + \frac{B}{T_3} \lg K_n \right]}, \quad (5)$$

где  $T_n$  (К),  $\varphi_n$  (%) – значения, полученные при данном наблюдении в естественных условиях;  $K_n$  – количество значений данного воздействующего фактора или сочетаний факторов при периодических наблюдениях.

Для расчета эффективных значений температуры и относительной влажности воздуха берется обобщенное значение энергии активации, равное 63 кДж/моль, если не известна энергия активации процесса старения материала получаемая опытным путем.

### **Материалы и методы Объекты исследования**

*Углепластик ВКУ-39* – на основе эпоксидного связующего ВСЭ-1212 и углеродной ткани фирмы Rogher (арт. 3692) – конструкционный материал, переназначен для изготовления створок и наружного кожуха мотогондолы двигательной установки ПД-14.

*Стеклопластик ВПС-48/7781* – на основе эпоксидного связующего ВСЭ-1212 и стеклоткани фирмы Rogher (арт. 7781) – конструкционный материал, переназначен для средненагруженных конструкций изделий авиационной техники.

Отверждение углепластика ВКУ-39 и стеклопластика ВПС-48/7781 осуществляется в вакууме по стандартному режиму.

*Связующее ВСЭ-1212* – расплавное эпоксидное связующее, состоящее из модифицированной дифункциональной эпоксидной смолы, полифункциональной смолы, аминного ароматического отвердителя и термопласта. В состав связующего также входят: эпоксидный диановый олигомер на основе 2,2-бис-(*n*-оксифенил)пропана марки ЭД-20, эпоксидный олигомер на основе резорцина УП-637 и новолачной смолы ЭН-6. Модификацию эпоксидных олигомеров проводили полиизоцианатом, представляющим собой олигомеризованный метилendifенилдиизоцианат. Полиизоцианат состоит из смеси изомеров 2,4'- и 4,4'-метилendifенилдиизоцианата, триизоцианатов и полиизоцианата. В качестве термопластичного модификатора использовали клеевой порошкообразный полиарилсульфон марки ПСФФ-30. Для получения полимерных матриц на основе модифицированных эпоксидных олигомеров использовали отвердитель 4,4'-диаминодифенилсульфон марки Aradur, который позволяет реализовать высокую теплостойкость и прочность отвержденных матриц.

*Стеклопластик СТ-69Н-15П* – на основе универсального эпоксидного связующего ЭДТ-69Н и полый стеклоткани Т-15П.

### **Образцы и примененные методы исследований**

Из отформованных панелей углепластика ВКУ-39 и стеклопластика ВПС-48/7781 размером 300×300×2,5 мм изготовили образцы размером:

- 15×5×2,5 мм – для определения прочности при изгибе по ASTM D7264/D7264M;
- 140×12×2,5 мм – для определения прочности при сжатии по ASTM D6641/D6641M.

Из отформованных панелей углепластика ВКУ-39 и стеклопластика ВПС-48/7781 размером 300×300×4 мм изготовили образцы размером 155×13×4 мм – для определения прочности при межслойном сдвиге по ASTM D2344/D2344M.

Тепловое старение проводили согласно СТП 1-595-11-101–83 и ММ1.595-20-461–2015.

Определение прочности при сжатии и межслойном сдвиге проводили на испытательной машине Тиратест 2200, при изгибе – на машине Тиратест 2300.

Определение значений блеска поверхности материалов проводили на блескомере REFO 60 в соответствии с DIN 67530.

Натурные климатические испытания проводили согласно ГОСТ 9.708–83.

### **Результаты и обсуждение**

#### **Расчет эффективных значений температуры и относительной влажности воздуха за период натурной экспозиции углепластика ВКУ-39 и стеклопластика ВПС-48/7781**

Образцы углепластика ВКУ-39 были выставлены на натурную экспозицию в соответствии с ГОСТ 9.708–83 весной 2014 г., а образцы стеклопластика ВПС-48/7781 – осенью 2013 г.

Для более точного определения эффективных величин температуры и относительной влажности воздуха использовали значения энергий активации процесса старения соответствующего материала, полученные в лабораторных условиях. В работе [21] произведен расчет энергии активации процесса старения углепластика ВКУ-39 и стеклопластика ВПС-48/7781. По результатам расчета энергия активации процесса старения для углепластика ВКУ-39 составила 113 кДж/моль, а для стеклопластика ВПС-48/7781: 55 кДж/моль. Затем данные значения применили для расчета эффективных значений температуры и относительной влажности воздуха за период экспозиции.

В табл. 2 приведены расчетные эффективные значения температуры и относительной влажности воздуха, а также значения дозы суммарной солнечной радиации и суммарного количества осадков за период экспозиции образцов углепластика ВКУ-39 по данным прямых измерений на климатической площадке за период экспозиции.

Таблица 2

**Значения климатических параметров за период экспозиции образцов углепластика ВКУ-39**

Климатический параметр	Значения параметра в месте экспозиции			
	г. Москва	г. Геленджик	г. Сочи	г. Якутск
Эффективное значение температуры, °С	6,7	14,9	14,9	-8,7
Эффективное значение относительной влажности воздуха, %	79,6	73,7	74,6	64,8
Суммарная солнечная радиация, МДж/м <sup>2</sup>	4668,4	5391	5452	3411,3
Количество осадков, мм	533,2	709,2	1567	240,8

На рис. 1 представлено сопоставление среднестатистических климатических параметров атмосферы по ГОСТ 16350–80 и за первый год экспозиции образцов углепластика ВКУ-39.

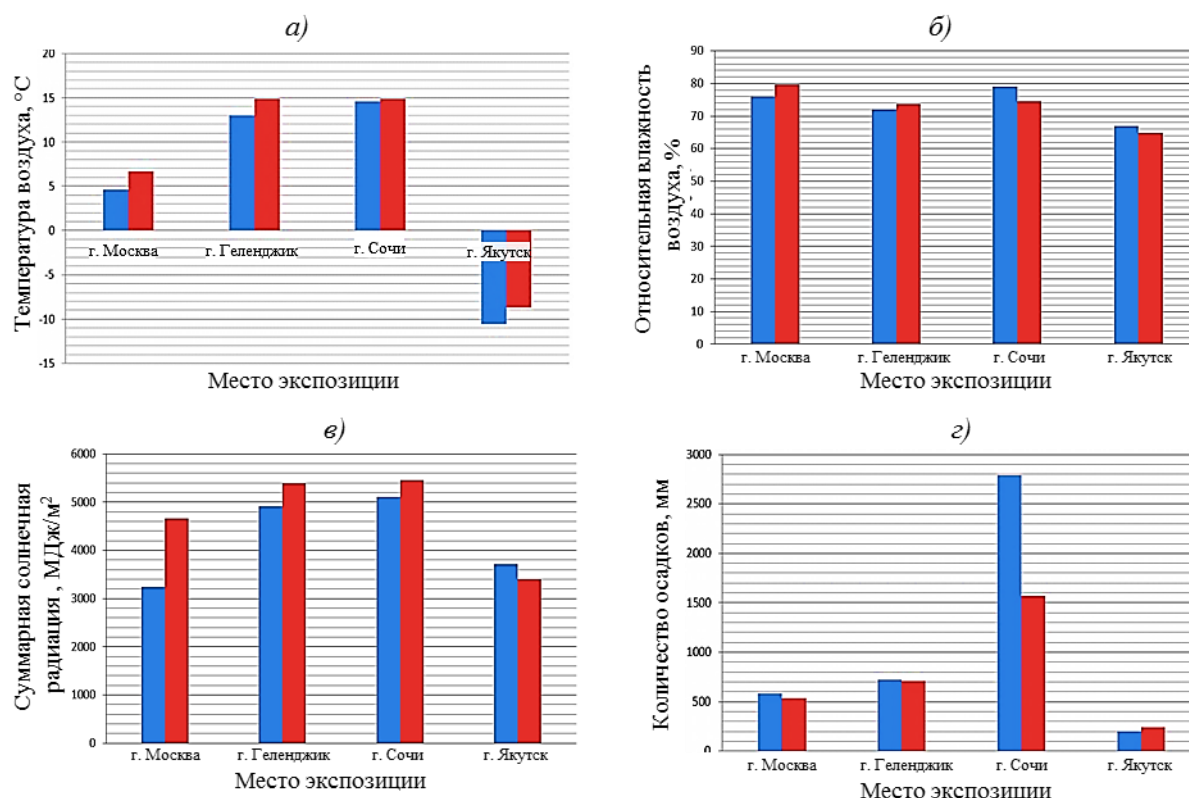


Рис. 1. Сопоставление климатических параметров атмосферы по ГОСТ 16350–80 (■) и прямых измерений (■) на климатических площадках за период экспозиции для образцов из углепластика ВКУ-39:

*а* – температура воздуха; *б* – относительная влажность воздуха; *в* – суммарная солнечная радиация; *г* – количество осадков

Значения температуры воздуха за период первого года экспозиции углепластика ВКУ-39 выше (по сравнению со среднестатистическими значениями для всех мест экспозиции образцов) на 0,3–2,1°С в зависимости от места экспозиции. Значения относительной влажности воздуха за первый год экспозиции углепластика ВКУ-39 немного выше среднестатистических значений для Москвы и Геленджика – на 3,6 и 1,7% соответственно, а для Сочи и Якутска – ниже на 4,4 и 2,2% соответственно. Количество суммарной солнечной радиации выше для Москвы, Геленджика и Сочи (по сравнению со среднестатистическими значениями) на 30; 9 и 6% соответственно, а для Якутска – на 8% ниже. Количество выпавших осадков за период экспозиции в Якутске выше на 39 мм по сравнению со среднестатистическими значениями, а для Москвы, Геленджика и Сочи (по ГОСТ 16350–80 представительный пункт – г. Батуми) – ниже на 49; 15 и 1221 мм соответственно.

В табл. 3 приведены расчетные эффективные значения температуры и относительной влажности воздуха, а также значения дозы суммарной солнечной радиации и суммарного количества осадков за первый год экспозиции образцов стеклопластика ВПС-48/7781, рассчитанные по данным прямых измерений на климатической площадке.

На рис. 2 представлено сопоставление среднестатистических климатических параметров атмосферы по ГОСТ 16350–80 и за первый год экспозиции образцов стеклопластика ВПС-48/7781.

Таблица 3

Значения климатических параметров за первый год экспозиции образцов стеклопластика ВПС-48/7781

Климатический параметр	Значения параметра в месте экспозиции			
	г. Москва	г. Геленджик	г. Сочи	г. Якутск
Эффективное значение температуры, °С	8,2	14,5	15,2	-5,8
Эффективное значение относительной влажности воздуха, %	77,4	74,1	75,3	64,5
Суммарная солнечная радиация, МДж/м <sup>2</sup>	4634,1	5256	5326	4262
Количество осадков, мм	489,8	686	1829	316,7

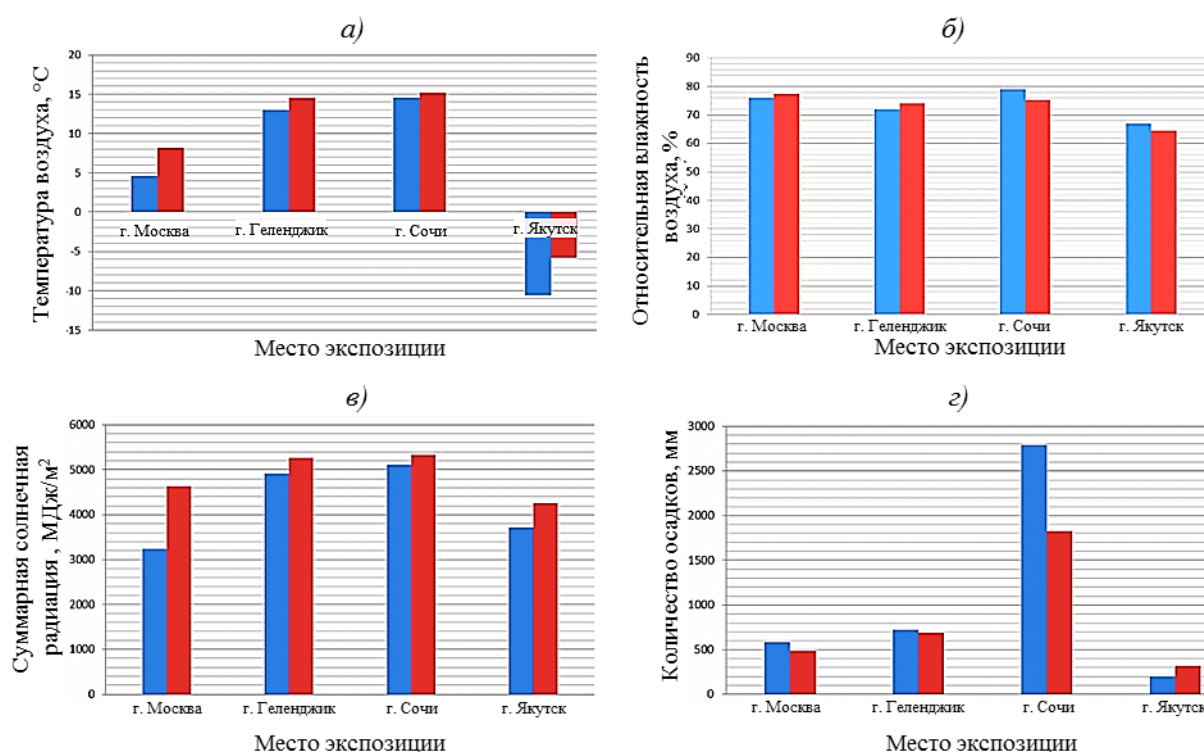


Рис. 2. Сопоставление климатических параметров атмосферы по ГОСТ 16350–80 (■) и прямых измерений (■) на климатической площадке за период экспозиции для образцов из стеклопластика ВПС-48/7781:

*a* – температура воздуха; *б* – относительная влажность воздуха; *в* – суммарная солнечная радиация; *з* – количество осадков

Значения температуры воздуха за период экспозиции стеклопластика ВПС-48/7781 выше (по сравнению со среднестатистическими значениями для всех мест экспозиции образцов): Москва – на 3,6°С; Геленджик – на 1,5°С; Сочи – на 0,6°С и Якутск – на 4,8°С. Значения относительной влажности воздуха по прямым измерениям немного выше для Москвы (1,4%) и Геленджика (1,9%) по сравнению со среднестатистическими значениями, а для Сочи и Якутска наблюдается некоторое снижение – на 4,3 и 3,5% соответственно. Количество суммарной солнечной радиации по прямым измерениям выше среднестатистических значений для всех мест экспозиции: для Москвы – на 43%, Геленджика – на 7%, Сочи – на 4%, Якутска – на 15%. Количество выпавших осадков за первый год экспозиции в Якутске выше на 115 мм по сравнению со среднестатистическими значениями, а для Москвы, Геленджика и Сочи (по ГОСТ 16350–80 представительный пункт – г. Батуми) – ниже на 92; 38 и 959 мм соответственно.

Различия эффективных значений температуры и относительной влажности воздуха для углепластика ВКУ-39 и стеклопластика ВПС-48/7781 связаны с различными энергиями активации процессов старения данных материалов, которые применяются при их расчете, а также сезона выставления образцов материалов на натурную экспозицию.

**Исследование изменения прочностных свойств углепластика ВКУ-39  
и стеклопластика ВПС-48/7781 за период натурной экспозиции  
образцов в различных климатических зонах**

Результаты изменения прочности при межслойном сдвиге, изгибе и сжатии для углепластика ВКУ-39 после 1 года экспозиции в различных климатических зонах представлены в табл. 4.

Таблица 4

**Сохраняемость прочностных характеристик углепластика ВКУ-39 после воздействия климатических факторов в натуральных условиях после 1 года экспозиции**

Свойства	Температура испытания, °С	Значения свойств в исходном состоянии*, МПа	Сохраняемость свойств, %, после экспозиции в климатической зоне			
			г. Москва	г. Геленджик	г. Сочи	г. Якутск
Предел прочности при изгибе	20	$\frac{970-1110}{1000}$	83	93	91	85
	120	$\frac{730-780}{760}$	93	87	87	86
Предел прочности при сжатии	20	$\frac{680-780}{720}$	90	96	100	92
	120	$\frac{490-580}{540}$	93	91	110	98
Предел прочности при межслойном сдвиге	20	$\frac{67-78}{73}$	110	110	109	109
	120	$\frac{44-47}{46}$	115	115	116	119

\* В числителе – минимальные и максимальные значения, в знаменателе – среднее.

Результаты натурной экспозиции показывают изменение прочностных характеристик под влиянием факторов климата в натуральных условиях различных климатических зон. Наиболее чувствительной характеристикой, как и при лабораторных испытаниях [22], является прочность при межслойном сдвиге. В течение 1 года натурной экспозиции величина данной характеристики для углепластика ВКУ-39 выросла на 10–19% в зависимости от температуры испытания. Подобный характер изменения прочности проявился и при испытаниях в лабораторных условиях [22], что объясняется структурными изменениями в полимерной матрице, происходящими под влиянием сорбированной влаги и повышенной температуры материала вследствие нагревания при действии солнечного излучения.

Изменение прочности при сжатии за первый год натурной экспозиции углепластика ВКУ-39 в различных климатических зонах составляет не более 10% от исходных значений.

Прочность при изгибе в период экспозиции снизилась на 10–17% в зависимости от условий экспозиции и температуры испытаний. Такое снижение объясняется механикой проведения испытаний на прочность при изгибе, так как это сложный вид нагружения, при котором одновременно присутствуют и растягивающие и сжимающие нагрузки. Разрушение образца начинается с внешних слоев материала, в которых за время экспозиции в натуральных условиях под влиянием климатических факторов произошло разрушение поверхностного слоя полимерной матрицы, эрозия поверхности и оголение волокон углеродного наполнителя. Вследствие этого часть армирующего наполнителя перестала выдерживать расчетную нагрузку, при этом их толщина учитывается при проведении расчетов прочности материала. При разрушении поверхности материала образуются напряжения и дефекты, которые являются источниками образования трещин, что также способствует снижению прочности.

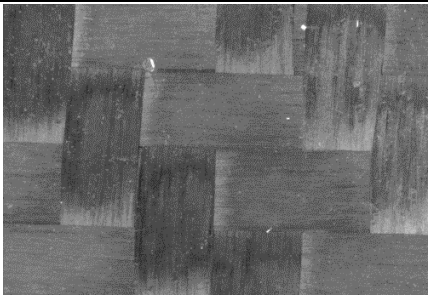
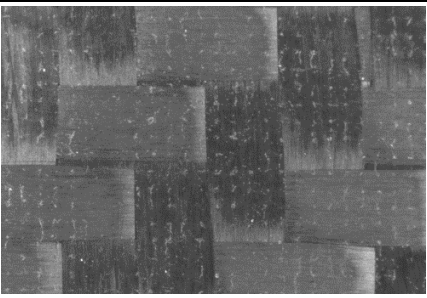
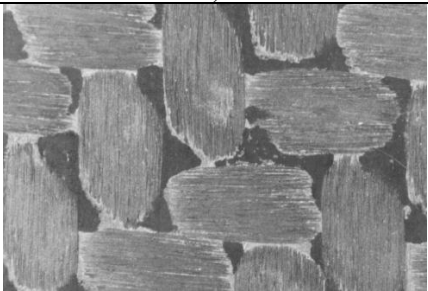
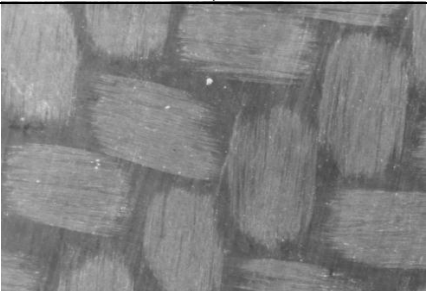
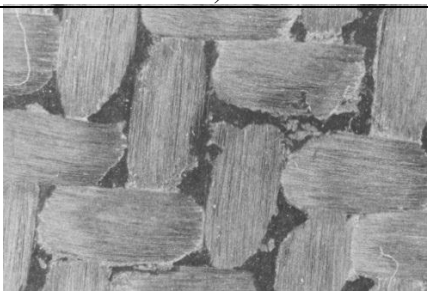
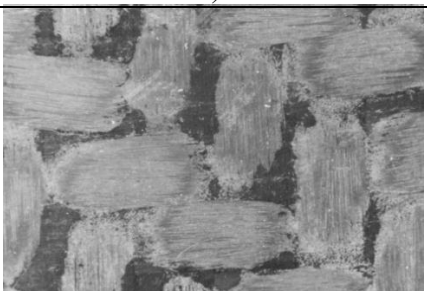
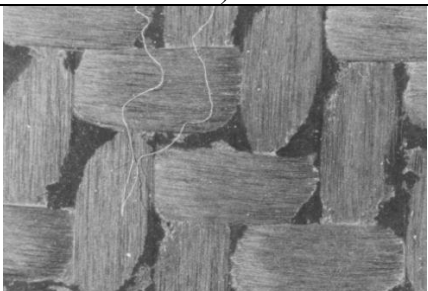
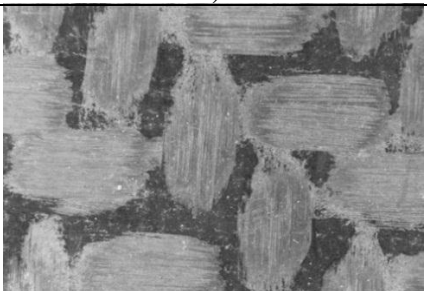
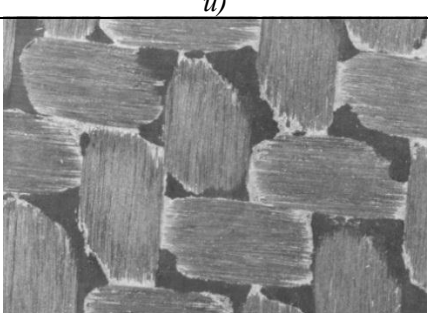
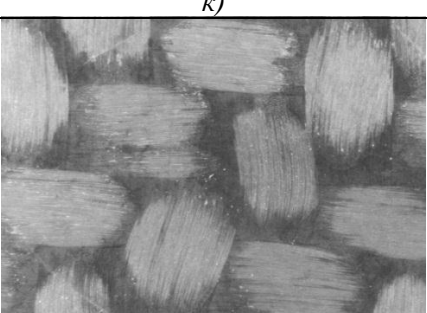
Климатическая зона (место экспозиции)	Лицевая сторона образца	Обратная сторона образца
Исходное состояние	<p style="text-align: center;"><i>а)</i></p> 	<p style="text-align: center;"><i>б)</i></p> 
Умеренно холодная (г. Москва)	<p style="text-align: center;"><i>в)</i></p> 	<p style="text-align: center;"><i>г)</i></p> 
Умеренно теплая (г. Геленджик)	<p style="text-align: center;"><i>д)</i></p> 	<p style="text-align: center;"><i>е)</i></p> 
Теплая влажная (г. Сочи)	<p style="text-align: center;"><i>ж)</i></p> 	<p style="text-align: center;"><i>з)</i></p> 
Очень холодная (г. Якутск)	<p style="text-align: center;"><i>и)</i></p> 	<p style="text-align: center;"><i>к)</i></p> 

Рис. 3. Поверхность образцов ( $\times 10$ ) из углепластика ВКУ-39 в исходном состоянии и после 1 года экспозиции в различных климатических зонах

На рис. 3 представлены лицевая и обратная сторона образцов углепластика ВКУ-39 после натурной экспозиции в различных климатических зонах. В исходном состоянии углеродная ткань покрыта слоем полимерной матрицы и поверхность углепластика представляет собой гомогенную систему. После 1 года натурной экспозиции вне зависимости от климатической зоны наружный слой углеродного наполнителя лицевой поверхности образцов обнажается в результате воздействия климатических факторов и абразивной эрозии полимерной матрицы под действием переносимого ветром песка (пыли, снега) и атмосферных осадков. На обратной стороне образцов степень эрозионных повреждений ниже, чем на лицевой, вследствие отсутствия прямого воздействия солнечного излучения и атмосферных осадков. При этом стоит отметить, что конструкция стенда не экранирует тыльную сторону, т. е. на нее обеспечивается эрозионное воздействие песка (пыли), переносимого ветром.

Результаты изменения прочности при межслойном сдвиге, изгибе и сжатии для стеклопластика ВПС-48/7781 после 1 года экспозиции представлены в табл. 5.

Таблица 5

**Сохраняемость прочностных характеристик стеклопластика ВПС-48/7781 после воздействия климатических факторов в натуральных условиях после 1 года экспозиции**

Свойства	Температура испытания, °С	Значения свойств в исходном состоянии*, МПа	Сохраняемость свойств, %, после экспозиции в климатической зоне			
			г. Москва	г. Геленджик	г. Сочи	г. Якутск
Предел прочности при изгибе	20	<u>570–610</u> 580	98	93	97	100
	120	<u>490–570</u> 530	100	96	87	94
Предел прочности при сжатии	20	<u>580–690</u> 630	92	97	95	102
	120	<u>400–520</u> 460	98	93	98	98
Предел прочности при межслоевом сдвиге	20	<u>87–100</u> 95	81	81	85	88
	120	<u>65–66</u> 66	76	73	73	79

\* В числителе – минимальные и максимальные значения, в знаменателе – среднее.

После проведения натурной экспозиции изменения прочности при сжатии стеклопластика ВПС-48/7781 составляют не более 10% от исходных значений – аналогично углепластику ВКУ-39. Изменения прочности при изгибе стеклопластика ВПС-48/7781 меньше, чем для углепластика ВКУ-39. Необходимо отметить, что уровень нагрева образцов углепластика при проведении натурной экспозиции может превышать температуру воздуха до 40°C, а стеклопластика – до 20°C. Различия в максимальной температуре поверхности образцов при проведении натурной экспозиции может привести к различиям в скорости структурных изменений в полимерной матрице.

Прочность при межслойном сдвиге у стеклопластика ВПС-48/7781 уменьшилась на 19–24% от исходного значения, в то время как для углепластика ВКУ-39 наблюдается рост значений на 10–19%. Разница между изменением прочности при межслойном сдвиге у стеклопластика ВПС-48/7781 и углепластика ВКУ-39 на основе одной и той же полимерной матрицы может быть объяснена различиями в межфазном слое, который зависит от природы наполнителя и его взаимодействия с полимерной матрицей, а также способностью стеклянных волокон проводить солнечное УФ излучение вглубь материала.

На рис. 4 представлены лицевая и обратная сторона образцов стеклопластика ВПС-48/7781 после натурной экспозиции в различных климатических зонах. Наружный слой стекловолоконной ткани, также как и для углеродной ткани, покрытой слоем полимерной матрицы, после 1 года натурной экспозиции в различных климатических зонах обнажается в результате воздействия климатических факторов и абразивной эрозии полимерной матрицы под действием песка (пыли), переносимого ветром, и атмосферных осадков.


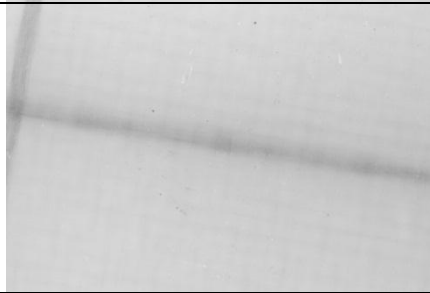
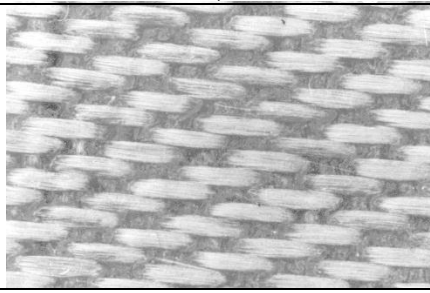
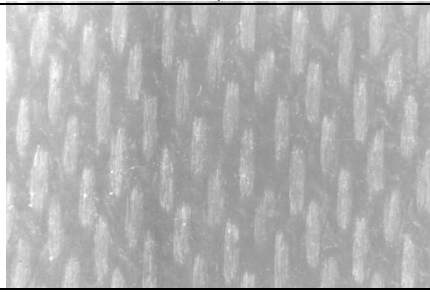
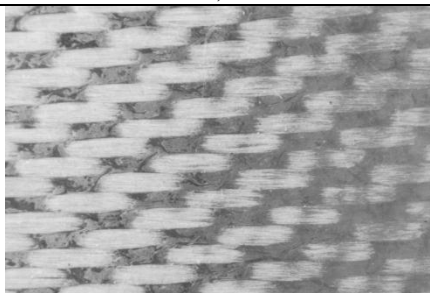
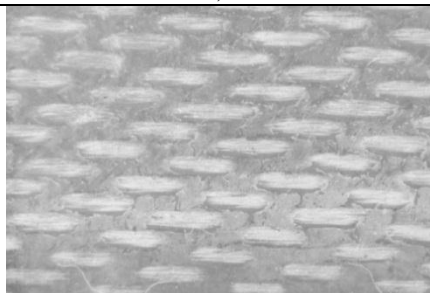
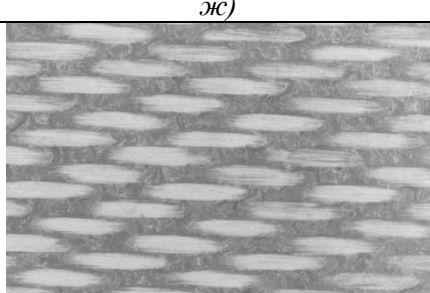
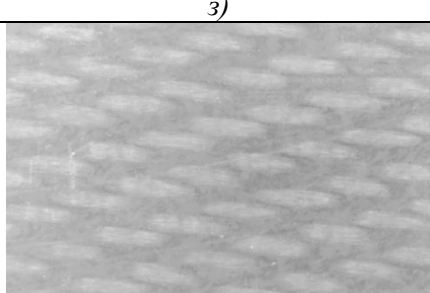
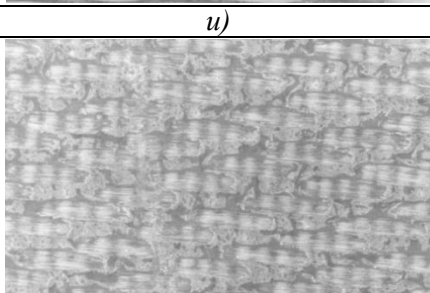
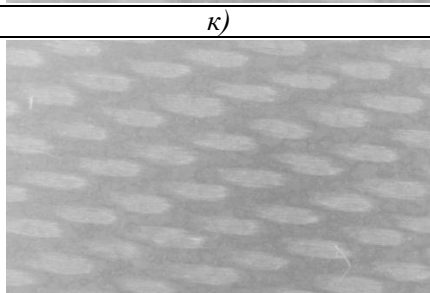
Климатическая зона (место экспозиции)	Лицевая сторона образца	Обратная сторона образца
Исходное состояние	<i>а)</i>	<i>б)</i>
		
Умеренно холодная (г. Москва)	<i>в)</i>	<i>г)</i>
		
Умеренно теплая (г. Геленджик)	<i>д)</i>	<i>е)</i>
		
Теплая влажная (г. Сочи)	<i>ж)</i>	<i>з)</i>
		
Очень холодная (г. Якутск)	<i>и)</i>	<i>к)</i>
		

Рис. 4. Поверхность образцов ( $\times 10$ ) из стеклопластика ВПС-48/7781 в исходном состоянии и после 1 года экспозиции в различных климатических зонах

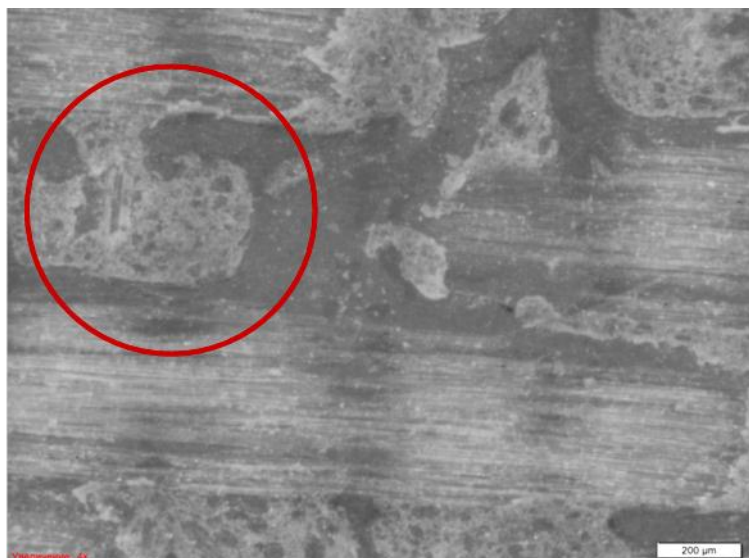


Рис. 5. Лицевая поверхность ( $\times 80$ ) образца стеклопластика ВПС-48/7781 после натурной экспозиции в г. Якутске

Как видно на рис. 5, на лицевой стороне образца, прошедшего натурную экспозицию в г. Якутске, наблюдаются остатки продеструктировавшей полимерной матрицы в зоне переплетения стекловолокна. Характер деструкции обратной стороны образцов стеклопластика ВПС-48/7781 аналогичен характеру деструкции углепластика ВКУ-39.

***Исследование изменения морфологии образцов стеклопластика ВПС-48/7781 и углепластика ВКУ-39 после одного года экспозиции в различных климатических зонах***

Проведено исследование морфологии поверхности образцов стеклопластика ВПС-48/7781 и углепластика ВКУ-39 с помощью исследовательского микроскопа Olympus (система SZX-10 с программно-аппаратным комплексом Stream), а также блескомера REFO 60.

Определение морфологии поверхности проводили при двух увеличениях ( $\times 10$  и  $\times 30$ ). С помощью программно-аппаратного комплекса Stream определяли рельеф поверхности образца – на рис. 6 представлен пример определения рельефа образца по сечению поверхности.

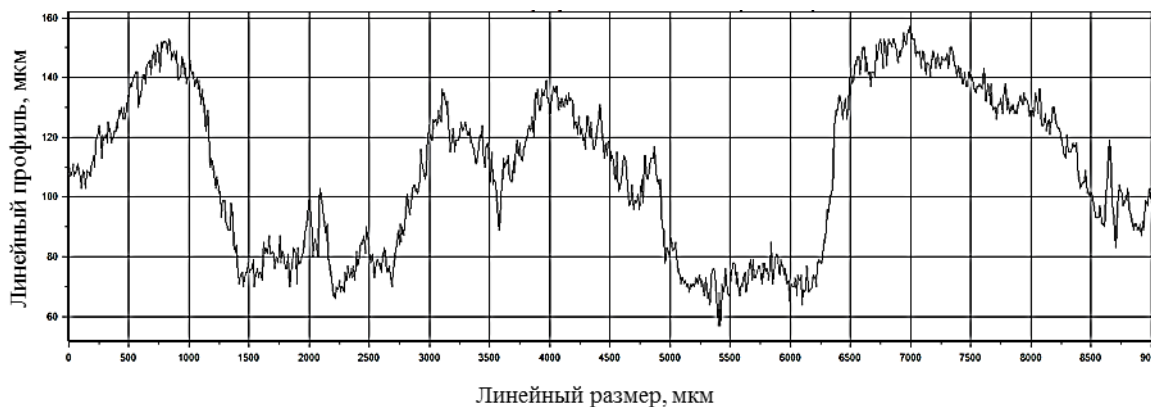


Рис. 6. Линейный профиль поверхности стеклопластика ВПС-48/7781 после 1 года экспозиции в умеренно теплой климатической зоне (г. Геленджик)

На одном образце выделяются несколько областей поверхности, для которых делаются микрофотографии, и определяются линейные профили поверхности. Для одного линейного профиля поверхности при указанном увеличении измеряются порядка 1000 значений глубины профиля, необходимых для проведения статистической обработки. Проводится статистическая обработка результатов измерений в программном обеспечении Microsoft Excel.

В исходном состоянии лицевая сторона образца углепластика ВКУ-39 имеет ровную поверхность без наличия дефектов, средняя глубина профиля поверхности составляет 12 мкм. Обратная сторона имеет более шероховатую поверхность, что обусловлено технологией формования образца, средняя глубина профиля поверхности составляет 16 мкм.

Проведено исследование влияния условий натурной экспозиции в течение 1 года на глубину эрозии углепластика ВКУ-39 (рис. 7, а).

После воздействия климатических факторов в течение 1 года экспозиции в различных климатических зонах показано, что изменение профиля поверхности для углепластика ВКУ-39 происходит в большей степени на лицевой поверхности образца. Степень изменения профиля поверхности для различных мест экспозиции лежит в ряду: Сочи→Геленджик→Москва→Якутск, что коррелирует с эффективными значениями температуры воздуха и значениями суммарной солнечной радиации. Эффективная влажность воздуха для данного материала имеет второстепенное значение, поскольку, как было показано в работе [23], в исследуемой полимерной матрице не протекают процессы гидролиза. Атмосферные осадки также имеют второстепенное значение, однако они усиливают процессы эрозии за счет смыва продуктов деструкции и слоя оседающей пыли с поверхности образца.

Изменение рельефа поверхности с обратной стороны образца углепластика ВКУ-39 связано с процессом деструкции полимерной матрицы при воздействии температуры и эрозии под действием песка (пыли), переносимого ветром.

В исходном состоянии лицевая сторона образца стеклопластика ВПС-48/7781 имеет ровную поверхность без дефектов, средняя глубина профиля поверхности составляет 3,26 мкм. Обратная сторона имеет более шероховатую поверхность, что обусловлено технологией формования образца, и средняя глубина профиля поверхности составляет 5,6 мкм.

Проведено исследование влияния условий натурной экспозиции в течение 1 года на глубину эрозии стеклопластика ВПС-48/7781 (рис. 7, б). Для стеклопластика ВПС-48/7781 наблюдается аналогичная картина (как и для углепластика ВКУ-39) по изменению рельефа поверхности образцов с лицевой и обратной стороны.

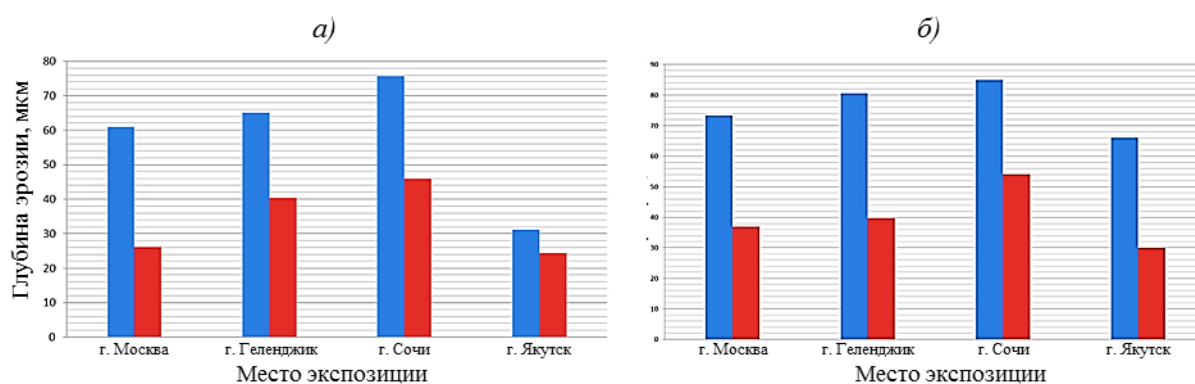


Рис. 7. Глубина эрозии поверхности углепластика ВКУ-39 (а) и стеклопластика ВПС-48/7781 (б) после 1 года экспозиции в различных климатических зонах:

■ – лицевая сторона; ■ – обратная сторона

Анализируя различия изменения рельефа поверхности лицевой и обратной сторон для углепластика и стеклопластика, можно сделать вывод о большей подверженности стеклопластика воздействию солнечного излучения. Несмотря на то что для черной поверхности углепластика величина локального перегрева больше, деструкция матрицы в стеклопластике ВПС-48/7781 идет быстрее. Причиной этого является большая глубина проникновения коротковолновой части солнечного излучения в материал стеклопластика. В качестве примера данного процесса представлен снимок разлома образца стеклопластика СТ-69Н-15П после 1 года натурной экспозиции в г. Москве (рис. 8).

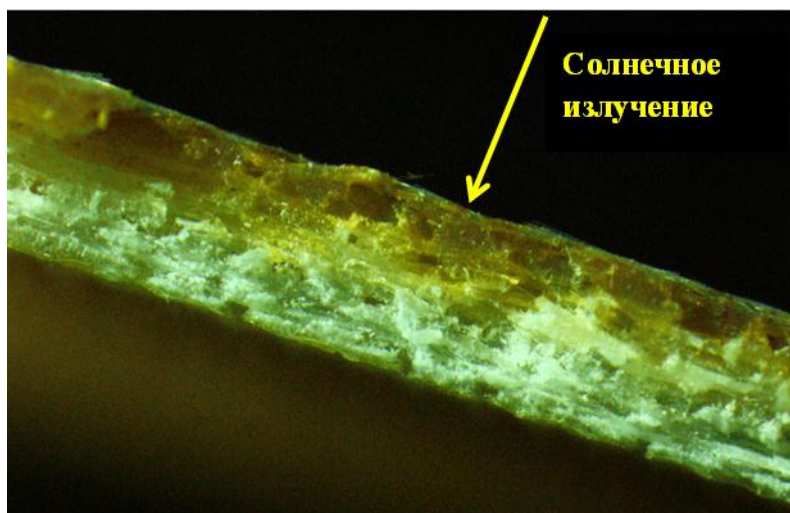


Рис. 8. Излом образца стеклопластика после 1 года натурной экспозиции в условиях умеренно холодной климатической зоны (г. Москва)

В течение 1 года экспозиции под действием УФ излучения в стеклопластике произошли структурные изменения, термическая и фотохимическая деструкция, о чем свидетельствует изменение цвета образца по его толщине.

Общая толщина образца стеклопластика СТ-69Н-15П, на котором проводилось исследование, составляла 2 мм. Толщина продеструктивированного слоя (более темные участки на изломе) достигает 1 мм. В данном слое под действием УФ излучения образуются участки связующего с повышенной степенью сшивки. Неоднородность полимерной матрицы по физико-механическим параметрам приводит к образованию значительных внутренних напряжений, которые в дальнейшем служат источниками образования микротрещин на поверхности материала.

Вторым фактором, приведшим к более высокой степени разрушения поверхностного слоя стеклопластика по сравнению с углепластиком, являются атмосферные осадки. Образовавшиеся под действием солнечного излучения трещины в полимерной матрице позволяют жидким конденсированным осадкам (дождевой воде, которая образует пленку на лицевой поверхности образца) проникать непосредственно к поверхности стекловолокна. Наличие влаги на поверхности стекловолокна приводит к образованию новых и развитию имеющихся дефектов в волокне. Происходит набухание стеклянных волокон и гидролиз их поверхности [24]. При этом разрушаются адгезионные слои, обеспечивающие адгезию полимерной матрицы к стекловолокну. Вследствие деструкции межфазного слоя «стекловолокно–полимерная матрица» и наблюдаются столь глубокие эрозионные повреждения стеклопластиков.

Углеволокно отличается от стекловолокна большей химической инертностью [24]. Ультрафиолетовая составляющая солнечного спектра полностью поглощается

верхним слоем углеродных волокон и практически не проникает во внутренние объемы полимерной матрицы. Вода и разбавленные водные растворы на углеродное волокно практически не действуют, поэтому разница в деструкции лицевой и обратной сторон у углепластика значительно меньше, чем у стеклопластика. Данное явление наблюдается во всех местах экспозиции и особенно выражено для Якутска: наименьшие значения дозы суммарной солнечной радиации и суммарного количества осадков приводят к минимальному различию степени деструкции поверхности лицевой и обратной сторон у образцов углепластика после 1 года экспозиции.

### Заключение

Результатами прямых измерений климатических параметров атмосферы на испытательных площадках подтверждено, что наибольшие значения воздействующих климатических факторов зарегистрированы для г. Сочи. Результаты определения механических свойств подтверждают, что воздействие климатических факторов как на стеклопластик ВПС-48/7781, так и на углепластик ВКУ-39 возрастает в ряду: Сочи→Геленджик→Москва→Якутск.

Показано, что среднестатистические данные климатических параметров не достаточно отражают реальную картину воздействия климатических факторов непосредственно на текущую экспозицию. Таким образом, подтверждена необходимость постоянной оценки климатических параметров на климатических станциях и показана возможность оценки эффективных температур и относительной влажности воздуха при наличии результатов данных лабораторных климатических испытаний.

Результаты определения механических свойств после экспозиции образцов углепластика ВКУ-39 и стеклопластика ВПС-48/7781 подтвердили результаты лабораторных испытаний: наиболее чувствительной характеристикой является прочность при межслойном сдвиге. Различия в характере изменения прочности при межслойном сдвиге для исследуемых материалов в процессе экспозиции связаны с различным влиянием природы наполнителя на процессы деструкции межфазного слоя «наполнитель–полимерная матрица».

Результаты измерения рельефа поверхности коррелируют с результатами прямых измерений атмосферных параметров и механических свойств исследованных материалов.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. №1 (34). С. 3–33.
2. Каблов Е.Н., Старцев О.В., Кротов А.С., Кириллов В.Н. Климатическое старение композиционных материалов авиационного назначения. II. Релаксация исходной структурной неравномерности и градиент свойств по толщине // *Деформация и разрушение материалов*. 2010. №12. С. 40–46.
3. Кириллов В.Н., Ефимов В.А. Проблемы исследования климатической стойкости авиационных неметаллических материалов // *75 лет. Авиационные материалы. Избранные труды «ВИАМ» 1932–2007: юбилейный науч.-технич. сб.* М.: ВИАМ, 2007. С. 379–388.
4. 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.
5. 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.

6. 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. №5. С. 412–423.
7. Ефимов В.А., Шведкова А.К., Коренькова Т.Г., Кириллов В.Н. Исследование полимерных конструкционных материалов при воздействии климатических факторов и нагрузок в лабораторных и натуральных условиях // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2013. №1. Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 01.02.2016).
8. 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. 34–40.
9. Кириллов В.Н., Вапиров Ю.М., Дрозд Е.А. Исследование атмосферной стойкости полимерных композиционных материалов в условиях атмосферы теплого влажного и умеренно теплого климата // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №4. С. 31–38.
10. Кириллов В.Н., Ефимов В.А., Николаев Е.В., Шведкова А.К., Коренькова Т.Г., Деев И.С. К вопросу о методике проведения натуральных климатических испытаний полимерных композиционных материалов // *Сб. докл. VIII науч. конф. по гидроавиации «Гидроавиасалон-2010»*. М., 2010. Ч. II. С. 102–106.
11. Кириллов В.Н., Ефимов В.А., Шведкова А.К., Алексахин В.Н., Зуев А.В., Николаев Е.В. Исследование влияния климатических факторов и механического нагружения на структуру и механические свойства углепластика КМУ-11ТР // *Сб. докл. VIII науч. конф. по гидроавиации «Гидроавиасалон-2010»*. М., 2010. Ч. II. С. 111–115.
12. Николаев Е.В., Кириллов В.Н., Ефимов В.А., Гращенков Д.В. Московский центр климатических испытаний ФГУП «ВИАМ» – региональный центр испытаний материалов в представительной зоне умеренного климата // *Сб. докладов IX науч. конф. по гидроавиации «Гидроавиасалон-2012»*. М., 2012. Ч. II. С. 202–208.
13. Ефимов В.А., Кириллов В.Н., Добрянская О.А., Николаев Е.В., Шведкова А.К. Методические вопросы проведения натуральных климатических испытаний полимерных композиционных материалов // *Авиационные материалы и технологии*. 2010. №4. С. 25–31.
14. Кириллов В.Н., Ефимов В.А., Шведкова А.К., Николаев Е.В. Исследование влияния климатических факторов и механического нагружения на структуру и механические свойства ПКМ // *Авиационные материалы и технологии*. 2011. №4. С. 41–45.
15. Кириллов В.Н., Ефимов В.А., Барботько С.Л., Николаев Е.В. Методические особенности проведения и обработки результатов климатических испытаний полимерных композиционных материалов // *Пластические массы*. 2013. №1. С. 37–41.
16. Кириллов В.Н., Ефимов В.А., Гуняев Г.М., Кривонос В.В., Вапиров Ю.М. Особенности поведения неметаллических материалов в морских условиях // *Геленджик-96: сб. докл.* М., 1996. С. 124–129.
17. Кириллов В.Н., Ефимов В.А., Вапиров Ю.М., Ханин А.Г. Влияние влаги на свойства полимерных композиционных материалов // *Геленджик-98: сб. докл.* М.: ВИАМ, 1998. С. 208–211.
18. Кириллов В.Н., Ефимов В.А., Кислякова В.И., Баритко Н.В., Савенкова А.В., Сытый Ю.В., Костельцев В.В., Вапиров Ю.М. Влияние воздействия влажного субтропического климата на свойства неметаллических материалов // *Сб. докл. IV науч. конф. по гидроавиации «Гидроавиасалон-2002»*. М.: ВИАМ, 2002. С. 214–221.
19. Вапиров Ю.М., Кириллов В.Н., Кривонос В.В. Закономерности изменения свойств полимерных композитов конструкционного назначения при длительном климатическом старении в свободном и нагруженном состояниях // *В сб. докл. VI науч. конф. по гидроавиации «Гидроавиасалон-2006»*. М.: ВИАМ, 2006. Ч. II. С. 103–108.
20. Кириллов В.Н., Ефимов В.А., Мазаев П.Ю. Методика обработки результатов натуральных испытаний материалов // *Сб. докл. VI науч. конф. по гидроавиации «Гидроавиасалон-2006»*. М.: ВИАМ, 2006. Ч. II. С. 117–123.

- 
21. Николаев Е.В., Барботько С.Л., Андреева Н.П., Павлов М.Р. Комплексное исследование воздействия климатических и эксплуатационных факторов на новое поколение эпоксидного связующего и полимерных композиционных материалов на его основе. Часть 3. Расчет энергии активации и теплового ресурса полимерных композиционных материалов на основе эпоксидной матрицы // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2016. №5. Ст. 11 URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 16.05.2016). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-5-11-11.
  22. Николаев Е.В., Барботько С.Л., Андреева Н.П., Павлов М.Р. Комплексное исследование воздействия климатических и эксплуатационных факторов на новое поколение эпоксидного связующего и полимерных композиционных материалов на его основе. Часть 2. Обоснование выбора режимов и проведение теплового старения полимерных композиционных материалов на основе эпоксидной матрицы // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2016. №1. Ст. 10. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 01.02.2016). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-1-10-10.
  23. Николаев Е.В., Барботько С.Л., Андреева Н.П., Павлов М.Р. Комплексное исследование воздействия климатических и эксплуатационных факторов на новое поколение эпоксидного связующего и полимерных композиционных материалов на его основе. Часть 1. Исследование влияния сорбированной влаги на эпоксидную матрицу и углепластик на ее основе // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2015. №12. Ст. 11. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 01.02.2016). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-12-11-11.
  24. Пластики конструкционного назначения (реактопласты) / под. ред. Е.Б. Тростянской. М.: Химия, 1974. 304 с.