

Научная статья

УДК 678.747.2

DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-3-124-140

## ВЛИЯНИЕ НАТУРНОЙ ЭКСПОЗИЦИИ НА СВОЙСТВА И МИКРОСТРУКТУРУ УГЛЕПЛАСТИКА МАРКИ ВКУ-38ТП

А.В. Начаркина<sup>1</sup>, [И.В. Зеленина<sup>1</sup>](#), Е.В. Куршев<sup>1</sup>, А.А. Евдокимов<sup>1</sup>

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

**Аннотация.** Представлены результаты исследований влияния естественного старения в условиях климатических зон Москвы и Геленджика на структуру и свойства углепластика на основе фталонитрильного связующего и 3D-тканой преформы. Приведены результаты исследований деградации поверхности углепластика после естественного старения в различных условиях, а также физические показатели, такие как плотность, количество сорбированной влаги, влаго- и водопоглощение; упруго-прочностные характеристики углепластика после естественного старения в сравнении с исходными значениями до экспонирования.

**Ключевые слова:** полимерный композиционный материал (ПКМ), высокотемпературный углепластик, фталонитрильное связующее, естественное старение, водопоглощение, прочностные характеристики

**Для цитирования:** Начаркина А.В., Зеленина И.В., Куршев Е.В., Евдокимов А.А. Влияние натурной экспозиции на свойства и микроструктуру углепластика марки ВКУ-38ТП // Труды ВИАМ. 2026. № 3 (157). С. 124–140. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-3-124-140.

Scientific article

## THE INFLUENCE OF NATURAL EXPOSURE ON THE PROPERTIES AND MICROSTRUCTURE OF CARBON FIBER PLASTIC VKU-38TP

A.V. Nacharkina<sup>1</sup>, [I.V. Zelenina<sup>1</sup>](#), E.V. Kurshev<sup>1</sup>, A.A. Evdokimov<sup>1</sup>

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

**Abstract.** The article presents the study results on effect of natural aging in the climatic zones of Moscow and Gelendzhik on the structure and properties of carbon fiber based on phthalonitrile binder and 3D braided preform. Study results of carbon fiber surface degradation after natural aging under various conditions have been presented. Physical parameters such as density, amount of sorbed moisture, moisture and water absorption, stress-related properties of carbon fiber after natural aging compared to the initial values before exposure.

**Keywords:** polymer composite materials (PCM), high-temperature carbon plastics, phthalonitrile resin, natural aging, moisture absorption, water absorption, strength characteristics

**For citation:** Nacharkina A.V., Zelenina I.V., Kurshev E.V., Evdokimov A.A. The influence of natural exposure on the properties and microstructure of carbon fiber plastic VKU-38TP. *Trudy VIAM*, 2026, no. 3 (157), pp. 124–140. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-3-124-140.

## Введение

В настоящее время в России активно развивается рынок полимерных композиционных материалов (ПКМ), так как области их применения все больше расширяются и из ПКМ изготавливают высокоответственные конструкционные элементы техники в морской, авиационной, космической и других отраслях промышленности. Так, в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ проводится разработка высокотемпературных углепластиков с рабочими температурами до 350 °С и высоким уровнем сохранения упруго-прочностных характеристик в условиях эксплуатации, что позволяет применять их в самых ответственных элементах авиационной техники [1–3].

Например, термостойкие углепластики серии ВКУ-38 (ВКУ-38ТР, ВКУ-38ЖН, ВКУ-38ТП) на основе фталонитрильного связующего предназначены для элементов авиационных конструкций с рабочими температурами до 300 °С, в частности рабочего колеса центробежного компрессора (РКЦК). Углепластик марки ВКУ-38ТП, при изготовлении которого использована 3D-тканая преформа ортогональной структуры, планируется применить для изготовления элемента лопатки РКЦК. Изготовление РКЦК двигателя вертолета с использованием элементов из углепластика позволит снизить массу колеса и конструкции в целом по сравнению с традиционным вариантом, выполненным из титановых сплавов [4, 5].

Фталонитрильные связующие представляют собой особый наиболее термостойкий класс высокотемпературных связующих для ПКМ с температурой стеклования >400 °С. Хотя первые разработки фталонитрильных мономеров, олигомеров и связующих на их основе сделаны в 1970-х гг., работы по оптимизации их составов с целью увеличения термической стабильности и стойкости к повреждениям, снижения хрупкости и улучшения технологичности при переработке в пластики активно проводятся и в настоящее время [6–9].

Отличительной особенностью углепластика ВКУ-38ТП является не только высокая рабочая температура, но и углеродный наполнитель – преформа, которая за счет распределения волокон в ее объеме в трех направлениях позволяет получать углепластик стойкий к расслоению и ударным нагрузкам [10–14]. Подобного типа материалы на основе преформ успешно применяются за рубежом для изготовления лопаток авиационных двигателей такими фирмами, как Snecma (Франция), General Electric (США) и другими [15–17].

Для обеспечения безопасности летательных аппаратов к материалам, применяемым в наиболее ответственных узлах и агрегатах, предъявляются особые требования надежности и долговечности. При длительной эксплуатации летательных аппаратов и материалов в их составе на них (помимо физических нагрузок) оказывает воздействие множество факторов, наиболее значимым из которых является воздействие внешней среды. Хотя в реальных условиях для увеличения срока службы изделий, узлов и агрегатов широко применяются разнообразные меры защиты [18–21], полностью предотвратить воздействие внешних факторов невозможно, однако исследования свойств материалов после воздействия различных эксплуатационных факторов (или их имитации) позволяют прогнозировать реальные сроки эксплуатации.

В современных условиях жесткой конкуренции разработчики авиационной техники стремятся с максимальной точностью оценить долговечность создаваемых конструкций как на этапе проектирования, так и на этапе эксплуатации. Решение данной проблемы представляет собой весьма трудную техническую задачу в связи с необходимостью учета влияния на материалы множества одновременно действующих факторов. При климатическом воздействии в материале происходят необратимые процессы старения и деградации. Например, под влиянием циклических изменений температуры возникают внутренние напряжения, которые способствуют появлению микротрещин, со временем сливающихся и формирующих крупные дефекты в объеме матрицы или

на границе «матрица–волокно». Важным параметром также является сорбция воды, которая при перепаде температур ниже нуля усиливает внутренние напряжения, а при воздействии на поверхность материала осадков и ветра происходит активная деградация поверхностного слоя. При длительном воздействии климатических факторов упруго-прочностные характеристики ПКМ постепенно снижаются [22–24].

При оценке стойкости материалов к различным климатическим факторам проводят как ускоренные лабораторные испытания, так и испытания после длительного естественного старения [25]. При ускоренных лабораторных испытаниях воссоздают условия с интенсивным воздействием климатических факторов при эксплуатации и оценивают их влияние на структуру и свойства материала при экспозиции обычно от 1 до 9 мес. При длительных испытаниях проводят экспозицию материала в естественных условиях различных климатических зон продолжительностью от одного года и более. Данные, полученные после испытаний в естественных условиях, считаются более точными, так как полностью имитировать все климатические факторы при лабораторных испытаниях достаточно сложно, но при экспозиции в естественных условиях требуется гораздо больше времени для получения результатов исследования.

В предлагаемой работе рассматривается влияние длительного естественного старения в двух климатических зонах на структуру и свойства углепластика марки ВКУ-38ТП на основе фталонитрильного связующего и углеродной преформы с рабочей температурой до 300 °С.

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»).

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

### Материалы и методы

Объект исследований – углепластик марки ВКУ-38ТП в виде плит после трех и пяти лет экспозиции в натуральных условиях двух климатических зон (ГОСТ 16350–80) – умеренного климата (г. Москва) и умеренно теплого климата с мягкой зимой (г. Геленджик). Плиты углепластика (без дополнительного нанесения лакокрасочного покрытия) выставляли на стенды открытых площадок (ГОСТ 9.708–83) под углом 45 градусов к линии горизонта с ориентацией на юг (лицевая сторона). Высокотемпературный углепластик ВКУ-38ТП изготовлен из объемно-армированной углеродной преформы ортогонального переплетения с поверхностной плотностью 1,16 кг/м<sup>2</sup> и фталонитрильного связующего ВС-31 [4, 26].

На рис. 1 представлены плиты углепластика ВКУ-38ТП в исходном состоянии (1) и после пяти лет экспозиции в МЦКИ (г. Москва) (2) и ГЦКИ (г. Геленджик) (3).

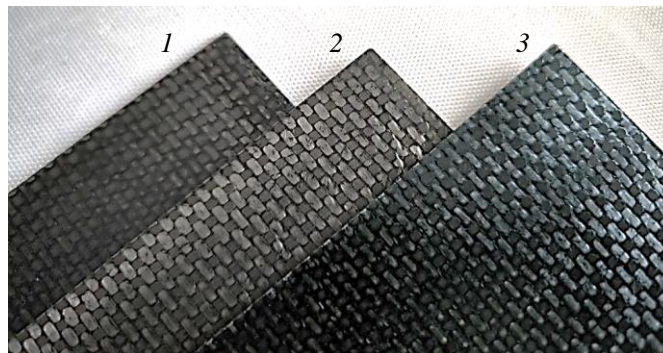


Рис. 1. Плиты углепластика марки ВКУ-38ТП в исходном состоянии (1) и после пяти лет экспозиции в МЦКИ (2) и ГЦКИ (3)

После завершения экспозиции из плит углепластика ВКУ-38ТП изготовили образцы и провели исследования таких свойств, как:

– толщина (ГОСТ Р 5682–2015), плотность (ГОСТ Р 57713–2017), водо- и влагопоглощение (ГОСТ 4650–2014);

– предел прочности и модуль хорды при статическом изгибе (ГОСТ Р 56810–2015), предел прочности при межслойном сдвиге (ГОСТ 57745–2017).

Микроструктуру образцов из углепластика исследовали методом сканирующей электронной микроскопии. Для выявления элементов тонкой структуры поверхностей исследуемых образцов, их подвергали ионно-плазменному травлению. Поверхности подготовленных образцов изучали с помощью сканирующего электронного микроскопа в режиме вторичных электронов.

### Результаты и обсуждение

В процессе длительного естественного старения на ПКМ оказывают влияние эксплуатационно-климатические факторы, такие как температура (с циклическими перепадами от минуса до плюса), влажность воздуха и осадки, что приводит к неизбежному влагонасыщению углепластика. При определении физических характеристик и прочностных свойств для сравнения исследовали образцы углепластика ВКУ-38ТП, хранившиеся в герметично упакованном виде в отопляемом помещении в течение пяти лет. При определении количества сорбированной влаги контрольные образцы (пять лет хранения в помещении) углепластика и образцы после экспозиции в естественных условиях сушили при температуре 100 °С до постоянной массы. Количество сорбированной влаги (среднее значение по пяти образцам), а также другие физические характеристики исследуемого углепластика в сравнении с паспортными значениями приведены в табл. 1.

Таблица 1

**Физические характеристики углепластиков после естественного старения**

Место экспозиции	Срок экспозиции, лет	Толщина, мм	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Количество сорбированной влаги, %
Без экспозиции (Дополнение № 3 к паспорту № 1887)	В исходном состоянии	2,40–2,50	1570±10	–
Хранение в помещении (контрольные образцы)	5	2,46–2,49	1567	0,31
МЦКИ (г. Москва)	3	2,47–2,53	1566	0,80
	5	2,45–2,51	1565	0,96
ГЦКИ (г. Геленджик)	3	2,41–2,48	1578	0,72
	5	2,40–2,45	1573	0,84

На фотографии (рис. 1) видна существенная разница состояния поверхностей плит углепластика ВКУ-38ТП в исходном состоянии и после экспозиции, причем поверхность углепластика, выставленного в МЦКИ (г. Москва) после пяти лет повреждена и загрязнена гораздо сильнее, чем поверхность углепластика, выставленного в ГЦКИ (г. Геленджик).

Для детального исследования поверхностей углепластика проведены микроструктурные исследования, результаты которых приведены на рис. 2–4. Микроструктурные исследования широко используются для оценки состояния полимерной матрицы как на поверхности материала, так и в его объеме после воздействия различных

внешних факторов: естественного или искусственного старения, теплового или тепловлажностного старения и т. п. [27–29].

На рис. 2 представлена микроструктура поверхности углепластика ВКУ-38ТП в исходном состоянии.

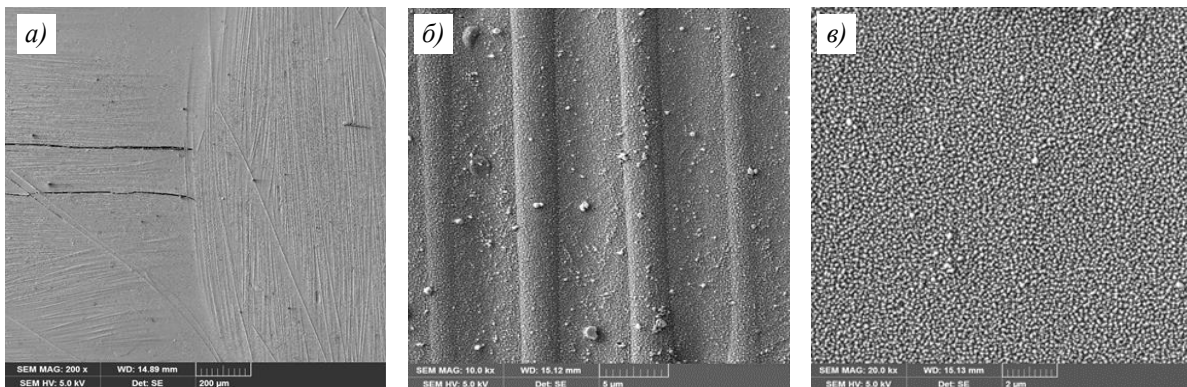


Рис. 2. Микроструктура ( $\times 200$  (а);  $\times 10000$  (б);  $\times 20000$  (в)) поверхности углепластика ВКУ-38ТП в исходном состоянии

Видно, что микроструктурные исследования поверхности углепластика ВКУ-38ТП в исходном состоянии выявили наличие сетки микротрещин. Это связано как с высокой хрупкостью самой полимерной матрицы, склонной к растрескиванию настолько, что проводятся работы по модификации смол и композитов на их основе для повышения жесткости и устойчивости к повреждениям [30–32], так и со структурной особенностью углеродного наполнителя. Использование технологии трехмерного ткачества объемной преформы с высокой плотностью наполнения приводит к увеличению внутренних напряжений при формовании углепластика, что способствует образованию микротрещин в отвержденном связующем. Поверхности углеродных волокон полностью покрыты пленкой матрицы, матрица равномерно располагается между моноволоконками в углеродном жгуте, что свидетельствует о хорошей пропитке (рис. 2, б), структура матрицы однофазная (рис. 2, в).

На рис. 3 приведены фотографии микроструктуры лицевых поверхностей углепластика ВКУ-38ТП после натурной экспозиции в МЦКИ – в условиях умеренного климата с промышленной атмосферой г. Москвы.

После трех лет длительного старения в МЦКИ на лицевой поверхности углепластика ВКУ-38ТП можно отметить значительные изменения в виде уменьшения толщины слоя полимерной матрицы и ее эрозии (рис. 3, а–в). Уменьшается количество трещин на поверхности композита (рис. 3, а), что связано с частичным удалением матрицы с поверхности. Матрица на поверхностях углеродных волокон разрушается, слой истончается и микротрещины становятся менее заметны, наблюдается разрушение и выкрашивание матрицы между углеродными волокнами (рис. 3, б). Существенно меняется структура матрицы на микроуровне – она становится двухфазной (рис. 3, в). Наблюдается преобладание более крупной фазы в структуре материала.

После пяти лет длительного старения в МЦКИ с лицевой поверхности углепластика ВКУ-38ТП практически полностью удаляется полимерная матрица с поверхностей углеродных волокон и частично – между ними (рис. 3, г, д). Матрица между волокнами разрушается в виде фрагментов и происходит их выкрашивание (рис. 3, д). Структура матрицы – двухфазная, наблюдается как крупная фаза, так и более мелкая (рис. 3, е).

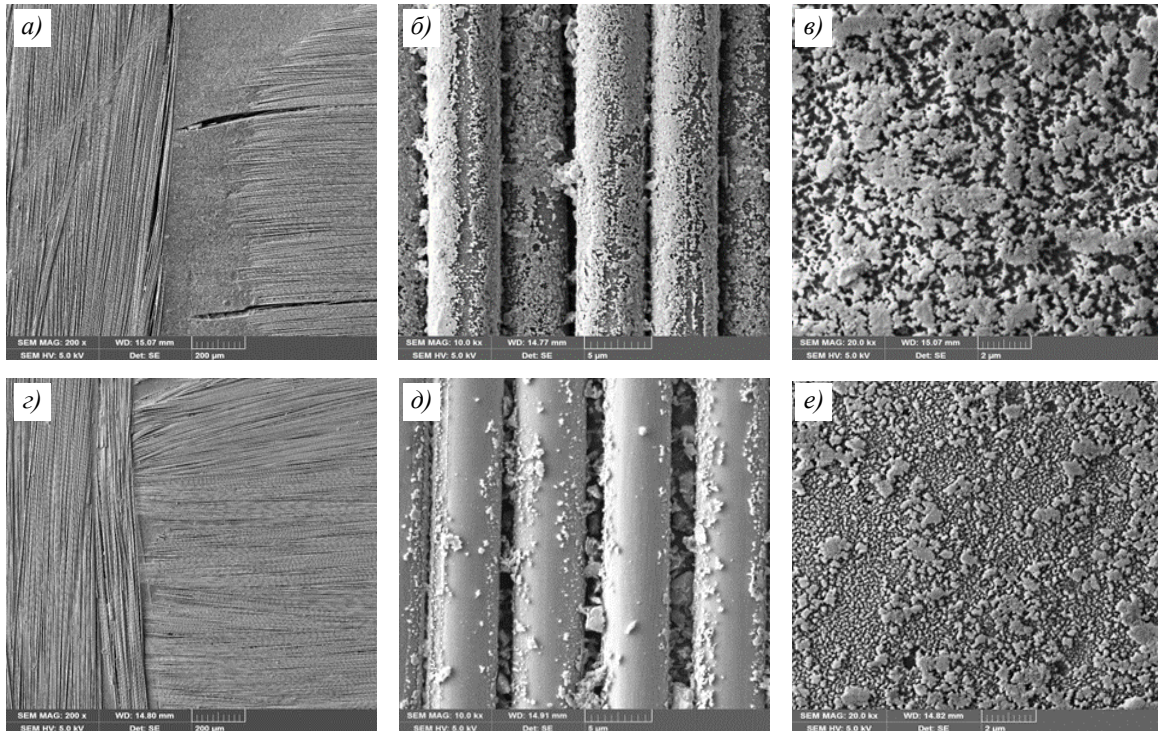


Рис. 3. Микроструктуры ( $\times 200$  (а, з);  $\times 10000$  (б, д);  $\times 20000$  (в, е)) лицевых поверхностей углепластика ВКУ-38ТП после трех (а–в) и пяти лет (з–е) экспозиции в МЦКИ

На рис. 4 представлены фотографии микроструктуры лицевых поверхностей углепластика ВКУ-38ТП после натурной экспозиции в ГЦКИ – в условиях умеренно теплого климата с мягкой зимой г. Геленджика.

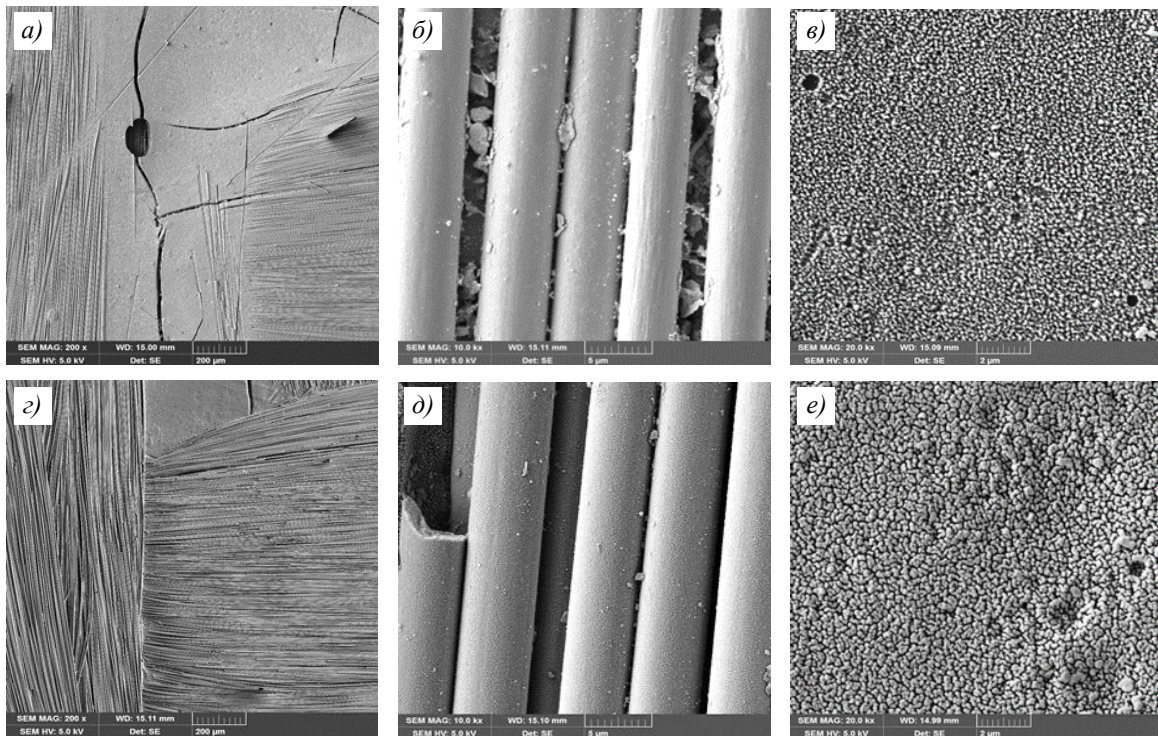


Рис. 4. Микроструктуры ( $\times 200$  (а, з);  $\times 10000$  (б, д);  $\times 20000$  (в, е)) лицевых поверхностей углепластика ВКУ-38ТП после трех (а–в) и пяти лет (з–е) экспозиции в ГЦКИ

В углепластике ВКУ-38ТП после трех лет длительного старения в ГЦКИ на лицевой поверхности выявлены крупные воздушные включения и сетка микротрещин (рис. 4, *а*). На поверхностях волокон отсутствует пленка матрицы, между волокнами матрица разрушается в виде фрагментов и выкрашивается (рис. 4, *б*). Структура матрицы однофазная с множественными микропорами (рис. 4, *в*). Лицевая поверхность углепластика ВКУ-38ТП после пяти лет старения в ГЦКИ претерпевает самые значительные изменения в виде эрозии полимерной матрицы с полным оголением углеродных волокон и удалением матрицы между ними (рис. 4, *г, д*). Происходит также разрушение отдельных углеродных волокон (рис. 4, *д*). Структура матрицы однофазная, микропористая, со следами вторичной эрозии (рис. 4, *е*).

Следует отметить существенную разницу в состоянии микрофазовой структуры углепластика ВКУ-38ТП в исходном состоянии (рис. 2, *в*) и после старения в климатических условиях МЦКИ (рис. 3, *в, е*) и ГЦКИ (рис. 4, *в, е*). У углепластика в исходном состоянии (рис. 2, *в*) и углепластика, экспонировавшегося в условиях умеренно теплого климата с мягкой зимой (рис. 4, *в, е*), структура полимерной матрицы однофазная, различающаяся размерами агрегатов микродисперсных частиц. У углепластика, экспонировавшегося в условиях умеренно теплого климата г. Геленджика, наблюдается увеличение размеров агрегатов микродисперсных частиц, связанное, по-видимому, с насыщением молекулами воды полимерной матрицы [33–35].

При экспозиции углепластика ВКУ-38ТП в условиях умеренного климата с промышленной атмосферой полимерная матрица претерпевает серьезные изменения: структура матрицы становится двухфазной (рис. 3, *в, е*). Это, по-видимому, связано с наличием в промышленной атмосфере г. Москвы вредных, химически активных примесей и микрочастиц, негативно влияющих на полимерную матрицу и приводящих не только к эрозии связующего на поверхности пластика, но и к изменению фазового состава его структуры.

На рис. 5 приведена микроструктура тыльных поверхностей углепластика ВКУ-38ТП после трех и пяти лет естественного старения.

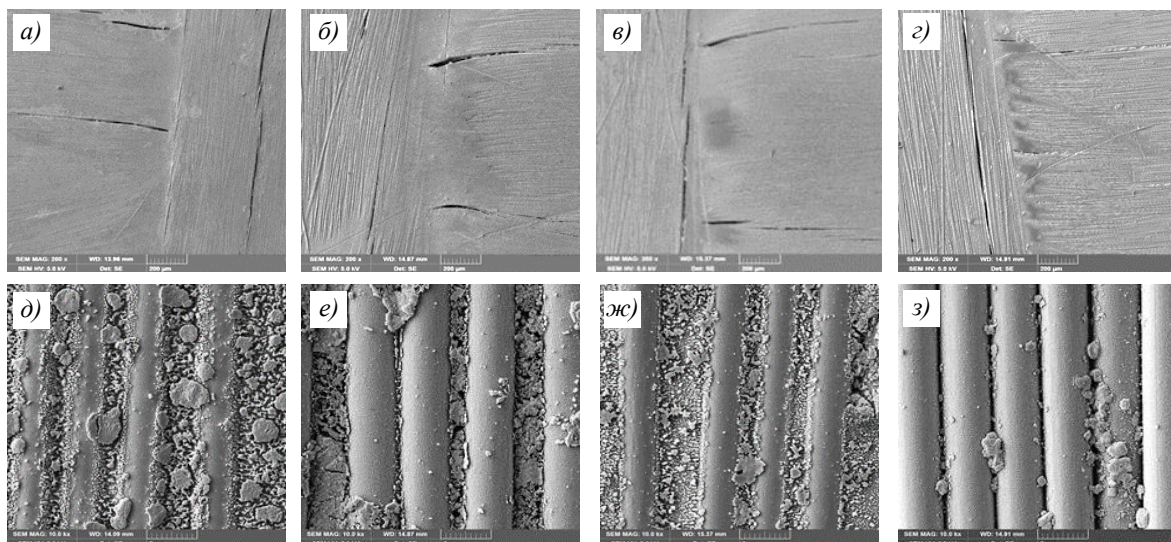


Рис. 5. Микроструктуры ( $\times 200$  (*а–г*);  $\times 10000$  (*д–з*)) тыльных поверхностей углепластика ВКУ-38ТП после экспозиции в МЦКИ (три года – *а, д*; пять лет – *б, е*) и ГЦКИ (три года – *в, ж*; пять лет – *г, з*)

Тыльная поверхность углепластика ВКУ-38ТП после трех лет старения в МЦКИ изменяется не столь значительно, как лицевая (рис. 3, *в*): слой полимерной матрицы истончается гораздо меньше, углеродные волокна оголяются частично, матрица между

волокнами сохраняется (рис. 5, а, д). Микроструктура матрицы двухфазная, вторая фаза – в виде округлых частиц с плотной структурой (рис. 5, д). После пяти лет экспозиции в МЦКИ на тыльной поверхности наблюдается оголение углеродных волокон при сохранении матрицы между ними (рис. 5, б, е).

После трех лет экспозиции в ГЦКИ на тыльной поверхности образца волокна частично оголены, а пространство между ними заполнено матрицей (рис. 5, в, ж). С увеличением срока экспозиции до пяти лет (рис. 5, з, з) полимерная матрица на тыльной поверхности пластика деградирует и истончается, углеродные волокна практически оголены, между ними видны остатки деградированного связующего.

Из приведенных данных видно, что тыльная сторона углепластика в меньшей степени подвержена разрушительному воздействию внешних факторов естественного старения (солнечный свет, осадки, ветер и т. п.), так как их прямое воздействие отсутствует. Следует также отметить, что после экспозиции в ГЦКИ износ поверхности заметен на микрофотографиях гораздо существенней, чем после экспозиции в МЦКИ. Полученные результаты согласуются с данными, приведенными в работе [36], посвященной исследованиям при помощи методов оптической микроскопии и профилометрии лицевой и оборотной (тыльной) сторон углепластиков на основе эпоксидных связующих при естественном старении. Показано, что рельеф поверхности на лицевой стороне углепластиков отличается от рельефа поверхности оборотной стороны, что объясняется более сильной деградацией полимерной матрицы на лицевой стороне углепластика.

Для изготовления углепластика ВКУ-38ТП в качестве армирующего наполнителя использована тканая преформа высокой плотности, поэтому затруднительно произвести расслоение пластика и оценить состояние матрицы внутри материала. Однако проведенные ранее исследования [6, 7, 37] слоистых углепластиков на основе фталонитрильного связующего ВС-31 и углеродной ткани показали, что сильная деградация связующего при естественном старении даже после пяти лет экспозиции ограничивается монослоем, оставляя фталонитрильное связующее в межслойном пространстве практически без изменений.

Деградация поверхности углепластиков в процессе естественного старения, как правило, влияет на их сорбционные свойства [38–40], поэтому исследовали влаго- и водопоглощение углепластика ВКУ-38ТП. Перед этим испытанием образцы обезжиривали и термостатировали до постоянной массы. Для определения водопоглощения образцы углепластика с незащищенными торцами помещали в дистиллированную воду при температуре  $23 \pm 3$  °С, а для определения влагопоглощения – в эксикатор над дистиллированной водой.

Кривые влаго- и водопоглощения углепластика ВКУ-38ТП после естественного старения приведены на рис. 6 и 7.

Деградация поверхности (изменение рельефа, пористость, микротрещины и другие дефекты) углепластика приводит к изменению характера кривой влагопоглощения. У образца углепластика в исходном состоянии насыщение влагой идет медленнее и более равномерно (рис. 6, кривая 1). Равновесное влагонасыщение (1,12 %) достигается через 45–50 сут. У углепластиков после экспозиции как в МЦКИ (рис. 6, кривые 2 и 3), так и в ГЦКИ (рис. 6, кривые 4 и 5) максимальное влагонасыщение 80–90 % от общего привеса влаги достигается к ~10 сут, а затем к 30–35 сут наблюдается выход кривых на равновесное влагонасыщение. Наибольшая скорость поглощения влаги наблюдается в течение первых трех суток, что связано с такими дефектами поверхности углепластика, как поры и микротрещины, которые максимально насыщаются влагой в первую очередь.

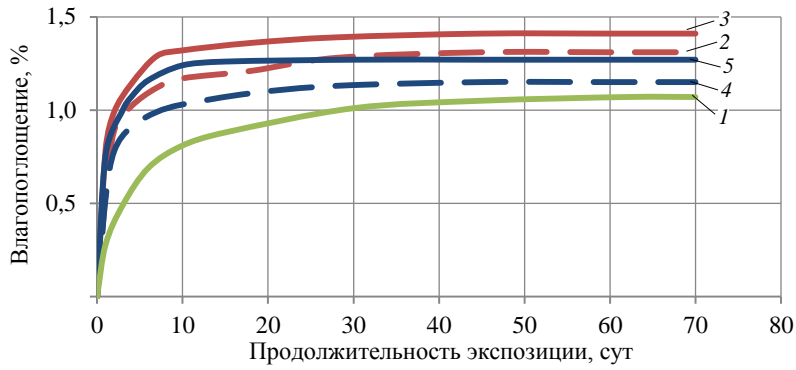


Рис. 6. Влагопоглощение углепластика ВКУ-38ТП в исходном состоянии (1) и после естественного старения в МЦКИ в течение трех (2) и пяти лет (3) и в ГЦКИ в течение трех (4) и пяти лет (5)

Количество сорбированной влаги возрастает с увеличением длительности старения и составляет:

для МЦКИ		для ГЦКИ	
3 года.....	1,31 %	3 года.....	1,19 %
5 лет.....	1,42 %;	5 лет.....	1,32 %;

что превышает влагопоглощение исходного углепластика на 0,19 и 0,3 % (МЦКИ) и 0,07 и 0,2 % (ГЦКИ) в течение трех и пяти лет соответственно.

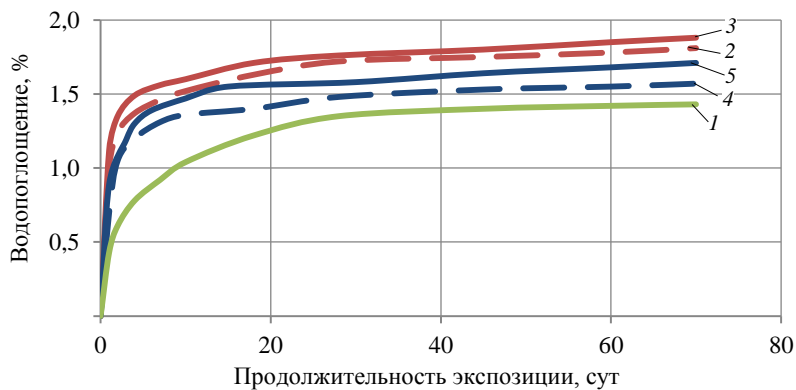


Рис. 7. Водопоглощение углепластика ВКУ-38ТП в исходном состоянии (1) и после естественного старения в МЦКИ в течение трех (2) и пяти лет (3) и в ГЦКИ в течение трех (4) и пяти лет (5)

Аналогичным образом деградация поверхности в процессе естественного старения сказывается на водопоглощении углепластика ВКУ-38ТП – меняется характер кривых 2–5 (рис. 7) водопоглощения. На образцах углепластика после длительной экспозиции максимальный привес, составляющий 75–80 % от равновесного, наблюдается после пяти суток водопоглощения (рис. 7, кривые 2–5), тогда как у углепластика в исходном состоянии (рис. 7, кривая 1) 75 % насыщения водой происходит только на 10 сут. Наибольшая скорость водонасыщения (так же, как и при влагопоглощении) наблюдается в течение первых трех суток. Водопоглощение углепластика после естественного старения через 60 сут составляет:

для МЦКИ (рис. 7, кривые 2 и 3)		для ГЦКИ (рис. 7, кривые 4 и 5)	
3 года.....	1,81 %	3 года.....	1,55 %
5 лет.....	1,86 %;	5 лет.....	1,364 %.

Это больше, чем у углепластика в исходном состоянии (1,46 %) на 0,35–0,40 % после старения в условиях МЦКИ (умеренного климата с промышленной атмосферой) и на 0,09–0,18 % в условиях ГЦКИ (умеренно теплого климата с мягкой зимой).

В табл. 2 приведены упруго-прочностные свойства углепластика ВКУ-38ТП в исходном состоянии и после трех и пяти лет экспозиции в МЦКИ и ГЦКИ, а также для сравнения – паспортные данные и свойства углепластика, испытанного после пяти лет хранения в помещении в упакованном виде.

Таблица 2

**Упруго-прочностные свойства\* углепластика после естественного старения**

Место и срок экспозиции	Температура испытаний, °С	Предел прочности при изгибе, МПа	Модуль хорды, ГПа	Предел прочности при межслойном сдвиге, МПа
Без экспозиции (Дополнение № 3 к паспорту № 1887)	23±3	<u>480–520</u> 494	<u>47–54</u> 51	<u>46–55</u> 50
	200	<u>410–480</u> 444	<u>53–56</u> 54	<u>39–48</u> 42
	300	<u>390–460</u> 437	<u>44–57</u> 51	<u>31–37</u> 34
Хранение в помещении в течение пяти лет (контрольные образцы)	23±3	<u>492–515</u> 507	<u>48–52</u> 50	<u>47–53</u> 49
	300	<u>415–456</u> 440	<u>49–54</u> 52	<u>31–35</u> 33
МЦКИ в течение трех лет	23±3	<u>475–540</u> 505	<u>44–47</u> 45	<u>35–41</u> 38
	200	<u>440–470</u> 453	<u>43–48</u> 46	<u>27–33</u> 30
	300	<u>400–465</u> 435	<u>52–57</u> 54	<u>26–31</u> 28
МЦКИ в течение пяти лет	23±3	<u>425–500</u> 462	<u>44–52</u> 48	<u>26–34</u> 30
	200	<u>410–430</u> 422	<u>46–48</u> 47	<u>22–29</u> 25
	300	<u>385–415</u> 395	<u>49–60</u> 55	<u>20–27</u> 22
ГЦКИ в течение трех лет	23±3	<u>455–510</u> 485	<u>46–48</u> 47	<u>34–43</u> 40
	200	<u>425–470</u> 445	<u>48–50</u> 49	<u>32–36</u> 34
	300	<u>350–440</u> 390	<u>53–59</u> 57	<u>23–26</u> 24
ГЦКИ в течение пяти лет	23±3	<u>360–500</u> 436	<u>56–61</u> 58	<u>27–29</u> 28
	200	<u>385–460</u> 410	<u>58–62</u> 60	<u>24–25</u> 25
	300	<u>315–450</u> 377	<u>55–63</u> 59	<u>20–23</u> 22

\* В числителе – диапазон значений, в знаменателе – среднее значение.

При сравнении паспортных данных и свойств углепластика, испытанного после пяти лет хранения в помещении в упакованном виде (табл. 2), видно, что полученные характеристики укладываются в разброс значений свойств, указанных в дополнении к паспорту.

На рис. 8 и 9 приведены данные по сохранению свойств углепластика ВКУ-38ТП после экспозиции в условиях естественного старения при различных температурах для сравнения со значениями, приведенными в дополнении к паспорту (табл. 2).

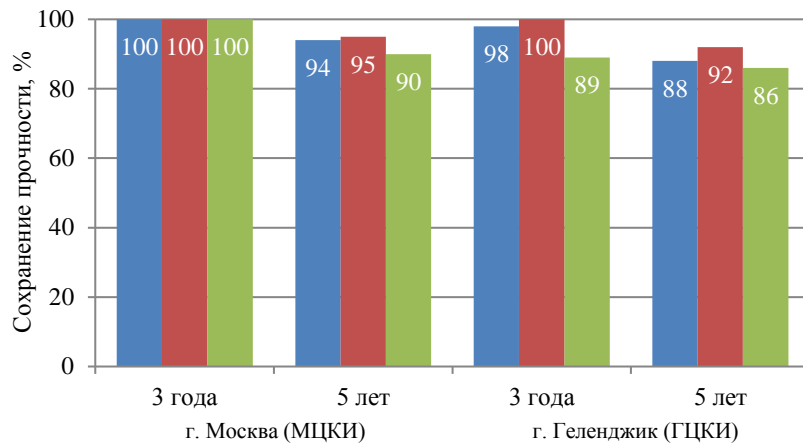


Рис. 8. Сохранение прочности при изгибе углепластика ВКУ-38ТП после естественного старения при температурах испытаний 23±3 (■), 200 (■), 300 °C (■)

Из данных, приведенных в табл. 2 и на рис. 8, видно, что прочность при изгибе после длительного старения по отношению к исходным значениям изменяется незначительно при температурах испытаний 23±3, 200 и 300 °C. После трех лет экспозиции в МЦКИ сохранение прочности при изгибе при всех температурах испытаний составляет 100 %, а после пяти лет экспозиции составляет: 93 % при температуре 23±3 °C, 95 % при температуре 200 °C и 90 % при температуре 300 °C. Модуль хорды после экспозиции при температурах испытаний 23±3 и 200 °C снижается на 6–11 %, а при температуре испытаний 300 °C возрастает до уровня исходного значения 51 ГПа. Сохранение прочности при изгибе после натурной экспозиции в ГЦКИ несколько ниже, чем в МЦКИ и составляет: 89–100 % после трех лет и 86–92 % после пяти лет. Сохранение значений модуля хорды выше – при температурах 23±3 и 200 °C снижается до 92–98 %, а при температуре 300 °C превосходит уровень исходного значения (51 ГПа) и составляет 57 и 59 ГПа.

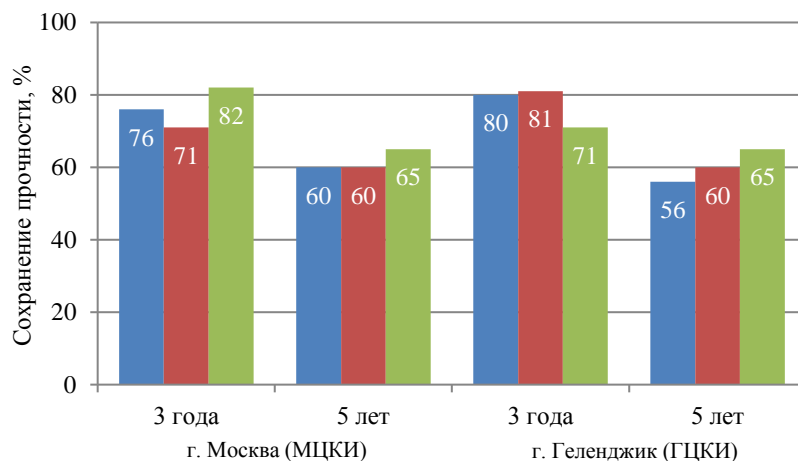


Рис. 9. Сохранение прочности при межслойном сдвиге углепластика ВКУ-38ТП после естественного старения при температурах испытаний 23±3 (■), 200 (■), 300 °C (■)

Изменения прочности при межслойном сдвиге после экспозиции (табл. 2, рис. 9) несколько больше, чем при изгибе. Сохранение прочности после трех лет экспозиции в МЦКИ составляет: 76 % при температуре  $23\pm 3$  °С, 71 % при температуре 200 °С и 82 % при температуре 300 °С. После пяти лет старения эти показатели еще ниже – сохранение прочности 60 и 65 %. Сохранение прочности при межслойном сдвиге после трех лет экспозиции в ГЦКИ несколько выше и составляет: 80 % при температурах  $23\pm 3$  и 200 °С и 71 % при температуре 300 °С. После пяти лет экспозиции в ГКЦИ сохранение прочности при межслойном сдвиге снижается и составляет 56–65 %.

### Заключения

Проведенные исследования подтверждают стойкость углепластика ВКУ-38ТП к воздействию факторов естественного старения в течение пяти лет в различных климатических условиях (г. Москва – умеренный климат, г. Геленджик – умеренно теплый климат с мягкой зимой). Несмотря на существенную деградацию поверхности углепластика ВКУ-38ТП в процессе длительного естественного старения (особенно после пяти лет экспозиции на открытых площадках), сохранение прочностных характеристик составляет: 86–100 % при изгибе и 56–80 % при межслойном сдвиге. Уровень влаго- и водопоглощения возрастает не более чем на 0,4 %, а с учетом того, что для ПКМ в конструкциях дополнительно используются лакокрасочные покрытия, обеспечивающие защиту от воздействия внешних факторов, можно говорить о высокой надежности углепластика ВКУ-38ТП и гарантировать достаточный срок службы материала в изделиях авиационной техники.

### Список источников

1. Каблов Е.Н., Антипов В.В. Роль материалов нового поколения в обеспечении технологического суверенитета Российской Федерации // Вестник Российской академии наук. 2023. Т. 93. № 10. С. 907–916.
2. Старцев В.О., Антипов В.В., Славин А.В., Горбовец М.А. Современные отечественные полимерные композиционные материалы для авиастроения (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2023. № 2 (71). С. 122–144. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 31.01.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-122-144.
3. Гуняева А.Г., Курносое А.О., Славин А.В. Опыт применения полимерных композиционных материалов разработки НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ в двигательных установках для самолетов гражданского назначения // Авиационные материалы и технологии. 2024. № 4 (77). С. 82–94. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 31.01.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-4-82-94.
4. Евдокимов А.А., Гуляев И.Н., Зеленина И.В. Исследование физико-механических свойств и микроструктуры объемно-армированного углепластика // Труды ВИАМ. 2019. № 4 (76). С. 38–47. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 11.02.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-4-38-47.
5. Saleh M.N., Soutis C. Recent advancements in mechanical characterisation of 3D woven composites // Mechanics of Advanced Materials and Modern Processes. 2017. No. 3. P. 1–17. DOI: 10.1186/s40759-017-0027-z.
6. Gao M., Wu Q., Li T. et al. Rediscovering phthalonitrile resins: a novel liquid monomer towards high-performance resins // Polymer Chemistry. 2024. Vol. 15. Is. 21. P. 2157–2166. DOI: 10.1039/d4py00100a.
7. Domingues D.D., Jones H.N., Keller T.M. The effect of curing additive on the mechanical properties of phthalonitrile-carbon fiber composites // Polymer Composites. 2004. Vol. 25. No. 5. P. 554–561.
8. Wang Z., Zhou X., Zheng K. et al. Achieving high heat resistance for phthalonitrile/boron blends through formation of protective phases derived from boron powder // Composites Communications. 2024. Vol. 45. P. 101777. DOI: 10.1016/j.coco.2023.101777.

9. Yang Z., Gu Y., Liu Y. et al. Thermal-oxidative aging mechanism of carbon fiber reinforced self-catalytic phthalonitrile resin matrix composite laminates at 450 °C ~500 °C // *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2025. Vol. 190. P. 108689. DOI: 10.1016/j.compositesa.2024.108689.
10. Богомолов П.И., Козлов И.А., Бируля М.А. Обзор современных технологий изготовления объемно-армирующих преформ для перспективных композиционных материалов // *Технико-технологические проблемы сервиса*. 2017. № 1. С. 22–27.
11. Сергеев В.Т. Разработка структуры и технологии изготовления многослойной комбинированной ткани из углеродных и кварцевых нитей: автореферат дис. ... канд. техн. наук. М., 2014. 16 с.
12. Белинис П.Г., Донецкий К.И., Лукьяненко Ю.В., Рогожников В.Н., Майер Ю., Быстрикова Д.В. Объемно-армирующие цельнотканые преформы для изготовления полимерных композиционных материалов (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2019. № 4 (57). С. 18–26. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-4-18-26.
13. Белинис П.Г., Лукьяненко Ю.В., Рогожников В.Н., Цыкун Р.Г., Донецкий К.И. Конструкционная многослойная тканая преформа для изготовления фрагмента интегральной панели летательного аппарата // *Авиационные материалы и технологии*. 2023. № 3 (72). С. 114–124. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 31.01.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-3-114-124.
14. Хуснуллина А.Р. Обзор современных технологий изготовления цельнотканых объемно-армированных преформ, применяемых для изготовления полимерных композиционных материалов // *Материалы юбилейной XX Всерос. с междунар. участием науч.-практ. конф. с элементами научной школы для студентов и молодых ученых (Казань, 13–15 мая 2024 г)*. Казань, 2024. С. 322–325.
15. Мекхэм М. Snesma и ее партнер АЕС создают новую технологию изготовления композитных лопаток // *АТО*. 2012. № 131. URL: <http://www.ato.ru/content/snesma-i-ee-partner-aec-sozdayut-novuyu-tehnologiyu-izgotovleniya-kompozitnyh-lopatok> (дата обращения: 16.05.2025).
16. Новиков А.С., Каримбаев Т.Д., Луппов А.А., Афанасьев Д.В., Мезенцев М.А. Инновации при применении композиционных материалов в авиационных двигателях // *Двигатель*. 2015. № 2 (98). С. 6–9.
17. Каримбаев Т.Д., Луппов А.А., Афанасьев Д.В. Рабочие лопатки вентиляторов из углепластика для перспективных двигателей. Достижения и проблемы // *Двигатель*. 2011. № 6. С. 4–9.
18. Кондрашов Э.К., Кузнецова В.А., Лебедева Т.А., Семенова Л.В. Основные направления повышения эксплуатационных, технологических и экологических характеристик лакокрасочных покрытий для авиационной техники // *Российский химический журнал*. 2010. Т. LIV. № 1. С. 96–102.
19. Shunmugapriya K., Kale Shirish S., Gouda G., Jayapal P. Paints for aerospace applications // *Aerospace Materials and Material Technologies*. 2017. Vol. 1. P. 539–562.
20. Zhang Ti., Zhang Te., He Y. et al. Corrosion and aging of organic aviation coatings: A review // *Chinese Journal of Aeronautics*. 2023. Vol. 36. No. 4. P. 1–35.
21. Старцев О.В., Коваль Т.В., Двирная Е.В., Корниенко Г.В., Велигодский И.М. Исследование свойств углепластика с покрытиями после 8 и 13 лет старения в умеренно теплом климате. Часть 3. Состояние полимерной матрицы композита // *Труды ВИАМ*. 2025. № 4 (146). С. 96–106. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 15.02.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-4-96-106.
22. Каблов Е.Н., Старцев В.О. Системный анализ влияния климата на механические свойства полимерных композиционных материалов по данным отечественных и зарубежных источников (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2018. № 2 (51). С. 47–58. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-2-47-58.
23. Абрамова М.Г., Луценко А.Н., Варченко Е.А. Об особенностях подтверждения соответствия климатической стойкости материалов авиационного назначения на всех этапах жизненного цикла (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2020. № 1 (58). С. 86–94. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-86-94.

24. 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: 14.05.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-70-80.
25. Лаптев А.Б., Павлов М.Р., Новиков А.А., Славин А.В. Современные тенденции развития испытаний материалов на стойкость к климатическим факторам (обзор). Часть 1. Испытания новых материалов // Труды ВИАМ. 2021. № 1 (95). С. 114–122. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 20.04.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-1-114-122.
26. Мухаметов Р.Р., Шимкин А.А., Гуляев А.И., Кучеровский А.И. Фталонитрильное связующее для термостойких композитов // Материаловедение. 2015. № 11. С. 48–53.
27. Liu L., Du M., Liu F. Recent advances in interface microscopic characterization of carbon fiber-reinforced polymer composites // *Frontiers in Materials*. 2023. Vol. 10. P. 1–18.
28. Tandon G.P., Ragland W.R., Shoepner G.A. Using Optical Microscopy to Monitor Anisotropic Oxidation Growth in High-Temperature Polymer Matrix Composites // *Journal of composite materials*. 2009. Vol. 43. No. 5. P. 583–603.
29. Деев И.С., Куршев Е.В., Лонский С.Л. Влияние длительного климатического старения на микроструктуру поверхности эпоксидных углепластиков // Вопросы материаловедения. 2018. № 3. С. 157–169.
30. Guo H., Chen Z., Yang X. et al. Self-promoted curing phthalonitrile with high glass transition temperature for advanced composites // *Journal of Polymer Research*. 2012. Vol. 19. No. 7. P. 1–8.
31. Han B., Li Y., Wan J. et al. Progress in high temperature resistant phthalonitrile resins and their composites for aerospace applications // *Reactive and Functional Polymers*. 2025. Vol. 214. P. 106293. DOI: 10.1016/j.reactfunctpolym.2025.106293.
32. Feng J., Wang D., Hu J. et al. Optimizing the thermal properties of fiber reinforced phthalonitrile composites // *Journal of Applied Polymer Science*. 2023. Vol. 141. Is. 2. DOI: 10.1002/app.54772.
33. Валевин Е.О., Зеленина И.В., Мараховский П.С., Гуляев А.И., Бухаров С.В. Исследование тепловлажностного воздействия на фталонитрильную матрицу // Материаловедение. 2015. № 9 (222). С. 15–19.
34. Валевин Е.О. Влияние тепловлажностного воздействия на свойства термостойких полимерных композиционных материалов на основе фталонитрильной матрицы: дис. ... канд. техн. наук. М., 2018. 130 с.
35. Куршев Е.В., Лонский С.Л., Егоров Ю.А., Зеленина И.В. Исследование изменений микроструктуры и химического состава полиимидного углепластика после воздействия имитируемых эксплуатационных факторов // Вопросы материаловедения. 2024. № 4. С. 88–102.
36. Старцев В.О., Валевин Е.О., Гуляев А.И. Влияние старения поверхности полимерных композиционных материалов на их механические свойства // Труды ВИАМ. 2020. № 8 (90). С. 64–76. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 11.02.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-8-64-76.
37. Гуляев И.Н., Зеленина И.В., Валевин Е.О., Хасков М.А. Влияние климатического старения на свойства высокотемпературных углепластиков // Труды ВИАМ. 2021. № 2 (96). С. 39–51. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 12.02.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-2-39-51.
38. Сальников В.Г., Старцев О.В., Лебедев М.П. и др. Влияние суточных и сезонных изменений относительной влажности и температуры на влагонасыщение углепластика в открытых климатических условиях // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2022. № 5. С. 2–10. DOI: 10.31044/1994-6260-2022-0-5-2-10.
39. Панин С.В. Исследование изменения рельефа поверхности и влагопереноса в полимерных композиционных материалах в процессе климатического старения: дис. ... канд. техн. наук. М., 2015. 131 с.
40. Валевин Е.О., Старцев В.О., Зеленина И.В. Термическое старение, деградация поверхности и влагоперенос в углепластике марки ВКУ-38ТР // Труды ВИАМ. 2020. № 6–7 (89). С. 118–128. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 06.04.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-67-118-128.

## References

1. Kablov E.N., Antipov V.V. The role of new generation materials in ensuring the technological sovereignty of the Russian Federation. *Vestnik Rossiyskoy akademii nauk*, 2023, vol. 93, no. 10, pp. 907–916.
2. Startsev V.O., Antipov V.V., Slavin A.V., Gorbovets M.A. Modern domestic polymer composite materials for aviation industry (review). *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 2 (71), pp. 122–144. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: January 31, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-122-144.
3. Gunyaeva A.G., Kurnosov A.O., Slavin A.V. Experience in the use of polymer composite materials developed by NRC «Kurchatov Institute» – VIAM in engines for civil aircraft. *Aviation materials and technologies*, 2024, no. 4 (77), pp. 82–94. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: January 31, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-4-82-94.
4. Evdokimov A.A., Gulyaev I.N., Zelenina I.V. Investigation of the physicomechanical properties and microstructure of volume-reinforced carbon fiber reinforced plastic. *Trudy VIAM*, 2019, no. 4 (76), pp. 38–47. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: February 11, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-4-38-47.
5. Saleh M.N., Soutis C. Recent advancements in mechanical characterisation of 3D woven composites. *Mechanics of Advanced Materials and Modern Processes*, 2017, no. 3, pp. 1–17. DOI: 10.1186/s40759-017-0027-z.
6. Gao M., Wu Q., Li T. et al. Rediscovering phthalonitrile resins: a novel liquid monomer towards high-performance resins. *Polymer Chemistry*, 2024, vol. 15, is. 21, pp. 2157–2166. DOI: 10.1039/d4py00100a.
7. Domingues D.D., Jones H.N., Keller T.M. The effect of curing additive on the mechanical properties of phthalonitrile-carbon fiber composites. *Polymer Composites*, 2004, vol. 25, no. 5, pp. 554–561.
8. Wang Z., Zhou X., Zheng K. et al. Achieving high heat resistance for phthalonitrile/boron blends through formation of protective phases derived from boron powder. *Composites Communications*, 2024, vol. 45, p. 101777. DOI: 10.1016/j.coco.2023.101777.
9. Yang Z., Gu Y., Liu Y. et al. Thermal-oxidative aging mechanism of carbon fiber reinforced self-catalytic phthalonitrile resin matrix composite laminates at 450 °C ~500 °C. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2025, vol. 190, p. 108689. DOI: 10.1016/j.compositesa.2024.108689.
10. Bogomolov P.I., Kozlov I.A., Birulya M.A. Review of modern technologies for the manufacture of volumetric-reinforcing preforms for advanced composite materials. *Tekhniko-tekhnologicheskije problemy servisa*, 2017, no. 1, pp. 22–27.
11. Sergeev V.T. *Development of the structure and manufacturing technology of multilayer combined fabric from carbon and quartz threads*: thesis abstract, Cand. Sc. (Tech.). Moscow, 2014, 16 p.
12. Belinis P.G., Donetskiy K.I., Lukyanenko Yu.V., Rogozhnikov V.N., Mayer Yu., Bystrikova D.V. Volume reinforcing solid-woven preforms for manufacturing of polymer composite materials (review). *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2019, no. 4 (57), pp. 18–26. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-4-18-26.
13. Belinis P.G., Lukyanenko Yu.V., Rogozhnikov V.N., Tsykun R.G., Donetskiy K.I. Design research on a structural multilayer woven preform of an integral panel fragment for aircraft. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 3 (72), pp. 114–124. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: January 31, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-3-114-124.
14. Khusnullina A.R. Review of modern technologies for the manufacture of solid-woven volume-reinforced preforms used for the production of polymer composite materials. *Proceedings of the XX All-Rus. with int. participation scientific and practical conference with elements of a scientific school for students and young scientists* (Kazan, May 13–15, 2024). Kazan, 2024, pp. 322–325.
15. Mekham M. *Snecma and its partner AES create a new technology for the manufacture of composite blades*. Available at: <http://www.ato.ru/content/snecma-i-ee-partner-aec-sozdayut-novuyu-tehnologiyu-izgotovleniya-kompozitnyh-lopatok> (accessed: May 16, 2025).

16. Novikov A.S., Karimbaev T.D., Luppov A.A., Afanasyev D.V., Mezentsev M.A. Innovations in the Application of Composite Materials in Aircraft Engines. *Dvigatel*, 2015, no. 2 (98), pp. 6–9.
17. Karimbaev T.D., Luppov A.A., Afanasyev D.V. Carbon Fiber Fan Blades for Advanced Engines. Achievements and Challenges. *Dvigatel*, 2011, no. 6, pp. 4–9.
18. Kondrashov E.K., Kuznetsova V.A., Lebedeva T.A., Semenova L.V. Main Directions for Improving the Performance, Technological, and Environmental Characteristics of Paint and Varnish Coatings for Aircraft Equipment. *Rossiyskiy khimicheskiy zhurnal*, 2010, vol. LIV, no. 1, pp. 96–102.
19. Shunmugapriya K., Kale Shirish S., Gouda G., Jayapal P. Paints for aerospace applications. *Aerospace Materials and Material Technologies*, 2017, vol. 1, pp. 539–562.
20. Zhang Ti., Zhang Te., He Y. et al. Corrosion and aging of organic aviation coatings: A review. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2023, vol. 36, no. 4, pp. 1–35.
21. Startsev O.V., Koval T.V., Dvirnaya E.V., Kornienko G.V., Veligodsky I.M. Research of the properties of carbon fiber reinforced plastic with coatings after 8 and 13 years of aging in a moderately warm climate. Part 3. Condition of the polymer matrix of a composite. *Trudy VIAM*, 2025, no. 4 (146), pp. 96–106. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: February 15, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-4-96-106.
22. Kablov E.N., Startsev V.O. Systematical analysis of the climatic influence on mechanical properties of the polymer composite materials based on domestic and foreign sources (review). *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2018, no. 2 (51), pp. 47–58. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-2-47-58.
23. Abramova M.G., Lutsenko A.N., Varchenko E.A. Concerning the aspects of validation of climate resistance of airborne materials at all life cycle stages (review). *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 1 (58), pp. 86–94. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-86-94.
24. 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: May 14, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-70-80.
25. Laptev A.B., Pavlov M.R., Novikov A.A., Slavin A.V. Current trends in the development of testing materials for resistance to climate factors (review). Part 1. Testing of new materials. *Trudy VIAM*, 2021, no. 1 (95), pp. 114–122. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: April 20, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-1-114-122.
26. Mukhametov R.R., Shimkin A.A., Gulyaev A.I., Kucherovsky A.I. Phthalonitrile binder for heat-resistant composites. *Materialovedenie*, 2015, no. 11, pp. 48–53.
27. Liu L., Du M., Liu F. Recent advances in interface microscopic characterization of carbon fiber-reinforced polymer composites. *Frontiers in Materials*, 2023, vol. 10, pp. 1–18.
28. Tandon G.P., Ragland W.R., Shoepner G.A. Using Optical Microscopy to Monitor Anisotropic Oxidation Growth in High-Temperature Polymer Matrix Composites. *Journal of composite materials*, 2009, vol. 43, no. 5, pp. 583–603.
29. Deev I.S., Kurshev E.V., Lonskiy S.L. The influence of long-term climatic aging on the surface microstructure of epoxy carbon fiber reinforced plastics. *Voprosy materialovedeniya*, 2018, no. 3, pp. 157–169.
30. Guo H., Chen Z., Yang X. et al. Self-promoted curing phthalonitrile with high glass transition temperature for advanced composites. *Journal of Polymer Research*, 2012, vol. 19, no. 7, pp. 1–8.
31. Han B., Li Y., Wan J. et al. Progress in high temperature resistant phthalonitrile resins and their composites for aerospace applications. *Reactive and Functional Polymers*, 2025, vol. 214, p. 106293. DOI: 10.1016/j.reactfunctpolym.2025.106293.
32. Feng J., Wang D., Hu J. et al. Optimizing the thermal properties of fiber reinforced phthalonitrile composites. *Journal of Applied Polymer Science*, 2023, vol. 141, is. 2. DOI: 10.1002/app.54772.
33. Valevin E.O., Zelenina I.V., Marakhovsky P.S., Gulyaev A.I., Bukharov S.V. Study of heat and humidity effects on a phthalonitrile matrix. *Materialovedenie*, 2015, no. 9 (222), pp. 15–19.
34. Valevin E.O. *Effect of heat and humidity effects on the properties of heat-resistant polymer composite materials based on a phthalonitrile matrix*: thesis, Cand. Sc. (Tech.). Moscow, 2018, 130 p.

35. Kurshev E.V., Lonskiy S.L., Egorov Yu.A., Zelenina I.V. Study of changes in the microstructure and chemical composition of polyimide carbon fiber reinforced plastic after exposure to simulated operational factors. *Voprosy materialovedeniya*, 2024, no. 4, pp. 88–102.
36. Startsev V.O., Valevin E.O., Gulyaev A.I. The influence of polymer composite materials' surface weathering on its mechanical properties. *Trudy VIAM*, 2020, no. 8 (90), pp. 64–76. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: February 11, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-8-64-76.
37. Gulyev I.N., Zelenina I.V., Valevin E.O., Khaskov M.A. Influence of climatic ageing on the properties of high-temperature carbon fiber reinforced plastics. *Trudy VIAM*, 2021, no. 2 (96), pp. 39–51. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: February 12, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-2-39-51.
38. Salnikov V.G., Startsev O.V., Lebedev M.P. et al. Effect of Daily and Seasonal Changes in Relative Humidity and Temperature on Moisture Saturation of Carbon Fiber Reinforced Plastics in Open Climate Conditions. *Vse materialy. Entsiklopedicheskiy spravochnik*, 2022, no. 5, pp. 2–10. DOI: 10.31044/1994-6260-2022-0-5-2-10.
39. Panin S.V. *Study of Changes in Surface Relief and Moisture Transfer in Polymer Composite Materials during Climatic Aging*: thesis, Cand. Sc. (Tech.). Moscow, 2015, 131 p.
40. Valevin E.O., Startsev V.O., Zelenina I.V. Thermal aging, surface degradation and water transfer in carbon fiber reinforced plastic VKU-38TR. *Trudy VIAM*, 2020, no. 6–7 (89), pp. 118–128. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: April 06, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-67-118-128.

*Информация об авторах*

**Начаркина Анастасия Витальевна**, инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Зеленина Ирина Викторовна**, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Куршев Евгений Васильевич**, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

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

*Information about the authors*

**Anastasia V. Nacharkina**, Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Irina V. Zelenina**, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Evgeny V. Kurshev**, Leading Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

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

Статья поступила в редакцию 21.08.2025; одобрена и принята к публикации после рецензирования 02.09.2025.  
The article was submitted 21.08.2025; approved and accepted for publication after reviewing 02.09.2025.