

УДК 678

*И.Н. Гуляев<sup>1</sup>, И.В. Зеленина<sup>1</sup>, Е.О. Валевин<sup>1</sup>, М.А. Хасков<sup>1</sup>***ВЛИЯНИЕ КЛИМАТИЧЕСКОГО СТАРЕНИЯ  
НА СВОЙСТВА ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ УГЛЕПЛАСТИКОВ**

DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-2-39-51

*Представлены результаты исследований свойств серии высокотемпературных углепластиков на основе фталонитрильного связующего после длительной экспозиции в различных климатических зонах: умеренный климат, умеренно теплый климат с мягкой зимой, теплый влажный климат, очень холодный климат. Исследовано состояние поверхности углепластиков, определены их термостойкость и водопоглощение. После экспозиции углепластики показали высокое сохранение свойств от уровня исходных значений: 80–90% – при комнатной температуре испытаний и 60–75% – при температуре 300 °С.*

**Ключевые слова:** высокотемпературный углепластик, фталонитрильное связующее, климатические зоны, прочностные характеристики, водопоглощение.

*I.N. Gulyev<sup>1</sup>, I.V. Zelenina<sup>1</sup>, E.O. Valevin<sup>1</sup>, M.A. Khaskov<sup>1</sup>***INFLUENCE OF CLIMATIC AGEING ON THE PROPERTIES  
OF HIGH-TEMPERATURE CARBON FIBER REINFORCED PLASTICS**

*Presents the results of research of the properties of a series of high-temperature carbon plastics based on phthalonitrile resin after long-term exposure in various climatic zones: temperate climate, moderately warm climate with mild winters, warm humid climate, very cold climate are presented. The state of the surface of carbon fiber reinforced plastics has been investigated, their thermal stability and water absorption have been determined. After exposure, CFRPs showed high retention of properties from the level of the initial values: 80–90% at room temperature of tests and 60–75% at a temperature of 300 °C.*

**Keywords:** high-temperature carbon plastics, phthalonitrile resin, climatic zones, strength characteristics, water absorption.

<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**

В настоящее время разработчики авиационной техники при проектировании современных конкурентоспособных изделий с улучшенной весовой эффективностью, а также для обеспечения требуемого уровня их упруго-прочностных характеристик широко используют полимерные композиционные материалы (ПКМ) [1, 2].

Вопросам старения ПКМ в естественных условиях различных климатических зон придается огромное значение [3–5]. К ПКМ, используемым в изделиях авиационной техники, высокие требования предъявляются не только к комплексу свойств, но и к их стабильности в процессе эксплуатации техники, а для особо ответственных деталей из ПКМ – требования по сохранению их заданного уровня значений, как в обычных условиях эксплуатации, так и в неблагоприятных климатических условиях. Существенное влияние на ПКМ в процессе длительной эксплуатации изделий оказывают следующие

климатические факторы: температура, относительная влажность воздуха, атмосферные осадки, солнечная радиация и циклическое изменение температуры окружающего воздуха, которые могут вызвать снижение прочностных характеристик материалов [6–9].

Особенно высокие требования предъявляются к весовым и удельным характеристикам силовых установок. Снижение массы двигателя может быть достигнуто в результате эффективного использования армированных композиционных материалов (а именно – их уникальных свойств) и новых конструктивных решений [10–14]. Дальнейшее увеличение доли ПКМ в перспективных изделиях аэрокосмической техники происходит также благодаря увеличению рабочей температуры данных материалов, что позволяет внедрять их в теплонагруженные элементы конструкций. В связи с этим во всем мире, в том числе и в России, спрос на высокотемпературные материалы, в частности на углепластики, повысился [15–17]. Одним из примеров является замена рабочего колеса центробежного компрессора (РКЦК), выполненного из титанового сплава, на РКЦК, изготовленное из ПКМ, с целью снижения массы силовой установки в вертолетных двигателях третьего поколения. Для реализации этого разработаны и паспортизованы материалы на рабочую температуру до 300 °С на основе фталонитрильного связующего: углепластик марки ВКУ-38ТР для элементов лопаток и углепластик марки ВКУ-38ЖН для кольцевых элементов [18].

Двигатель и РКЦК в его составе – это особо ответственные изделия, для эксплуатации которых недостаточно сведений о свойствах материалов в исходном состоянии, необходима оценка стабильности свойств материалов в процессе применения или хранения изделий из них.

Оценку стабильности свойств материалов в процессе хранения и эксплуатации в указанных климатических условиях, как правило, осуществляют на основе результатов климатических испытаний. Для изделий и материалов существуют два их основных вида: лабораторные испытания для оценки стойкости материалов к воздействию одного или нескольких искусственно созданных климатических факторов и натурные испытания на открытых атмосферных площадках климатических станций, находящихся в различных климатических зонах, где на материал воздействует полный комплекс климатических факторов. Лабораторные испытания для оценки стойкости к воздействию искусственно созданных эксплуатационных факторов проводят на стадии паспортизации материала, а для оценки влияния естественных климатических факторов испытания материалов осуществляют после длительной экспозиции в различных климатических зонах [19, 20].

В данной статье представлены результаты исследований свойств углепластиков марок ВКУ-38ТР и ВКУ-38ЖН, разработанных для элементов РКЦК на рабочую температуру до 300 °С, а также углепластика марки ВКУ-38 на основе фталонитрильного связующего после длительной экспозиции этих материалов в различных климатических зонах.

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

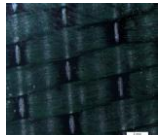

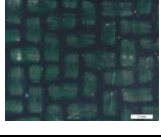
### Материалы и методы

Объектами исследований являются высокотемпературные углепластики серии ВКУ-38 (табл. 1) на основе фталонитрильного связующего ВСН-31 после экспозиции в натуральных условиях различных климатических зон в соответствии с ГОСТ 16350–80:

- умеренный климат (г. Москва);
- умеренно теплый климат с мягкой зимой (г. Геленджик);
- теплый влажный климат (г. Сочи);
- очень холодный климат (г. Якутск).

Таблица 1

## Углепластики серии ВКУ-38 на основе связующего марки ВСН-31

Углепластик	Наполнитель	Укладка наполнителя	Место и срок экспозиции	Внешний вид исходных углепластиков
ВКУ-38 (паспорт №1887)	Однонаправленная ткань УТОВ-300-200 из высокомодульного углеродного жгута ЖГВ-430-12к с линейной плотностью 445 текс	$[0/90/\pm 45]_n$	г. Москва и г. Сочи – 5 лет, г. Якутск – 3 года	
ВКУ-38ЖН (паспорт №1887, дополнение 1)	Высокомодульный жгут ЖГВ-430-12к с линейной плотностью 445 текс	$[0]_n$	г. Москва, г. Геленджик и г. Сочи – 1 и 5 лет	
ВКУ-38ТР (паспорт №1887, дополнение 2)	Равнопрочная ткань УТ-900И из среднемодульного углеродного волокна Т-800НВ с поверхностной плотностью 240 текс	$[0]_n$	г. Москва, г. Геленджик и г. Сочи – 1, 3 и 5 лет	

Углепластики выставлены на длительную экспозицию в виде плит размером 300×300 мм и толщиной 1,8; 2,2 и 2,5 мм без лакокрасочного покрытия, с защищенными торцами. Для оценки влияния климатических факторов на материалы исследованы их физические (водопоглощение и температура деструкции), а также механические свойства (прочность при растяжении, изгибе и сжатии).

После съема и наружного осмотра плит углепластиков из них вырезаны образцы и проведены испытания. При механических испытаниях углепластиков, осуществляемых на стандартных образцах, определяли прочность:

– при растяжении на установке LFM-250 фирмы Walter+Bai AG (Швейцария) по ГОСТ 25.601–80;

– при статическом изгибе на установке LFM-100 по ГОСТ 25.604–83;

– при сжатии на установке LFM-100 по ГОСТ 25.602–83.

Определение параметров термоокислительной деструкции проводили методом термогравиметрического анализа (ТГА) по ГОСТ Р 56721–2015 на установке синхронного термического анализа STA 449 F3 Jupiter в атмосфере синтетического воздуха.

Фотографии микроструктуры поверхности образцов углепластиков сделаны с помощью стереомикроскопа Olympus SZX16 с увеличением ×1,63.

Водопоглощение образцов определяли гравиметрическим методом на аналитических весах и рассчитывали по формуле

$$X = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \cdot 100\%,$$

где  $X$  – массовая доля влаги, поглощенная материалом в условиях экспозиции, %;  $m_1$  – исходная масса образца до выставления на экспозицию, г;  $m_2$  – масса образца после воздействия воды, г.

## Результаты и обсуждение

### Исследование поверхности углепластиков

При исследовании состояния поверхности углепластиков серии ВКУ-38 после проведения натуральных климатических испытаний установлено различное состояние лицевой и оборотной поверхностей образцов.

Лицевая поверхность, которая в процессе экспозиции подвергается воздействию всех климатических факторов, в том числе воздействию солнечного излучения, пыли и песка, для всех исследуемых материалов имеет гораздо больше повреждений в отличие от

оборотной стороны. На лицевой стороне поверхности в большей степени наблюдаются как деградация полимерной матрицы, так и эрозионные повреждения волокон и связующего. Следует отметить, что у плит из углепластика марки ВКУ-38ЖН происходит коробление материала, связанное с его неравновесной структурой и наиболее интенсивно проявляемое после экспозиции в условиях повышенной влажности (г. Сочи).

На рис. 1–3 приведены фотографии поверхности исследуемых углепластиков.

Фотографии, представленные на рис. 1, показывают состояние поверхности углепластика марки ВКУ-38 в исходном состоянии (до выставления на экспозицию) и после экспозиции в условиях умеренного (г. Москва), теплого влажного (г. Сочи) и очень холодного климата (г. Якутск).

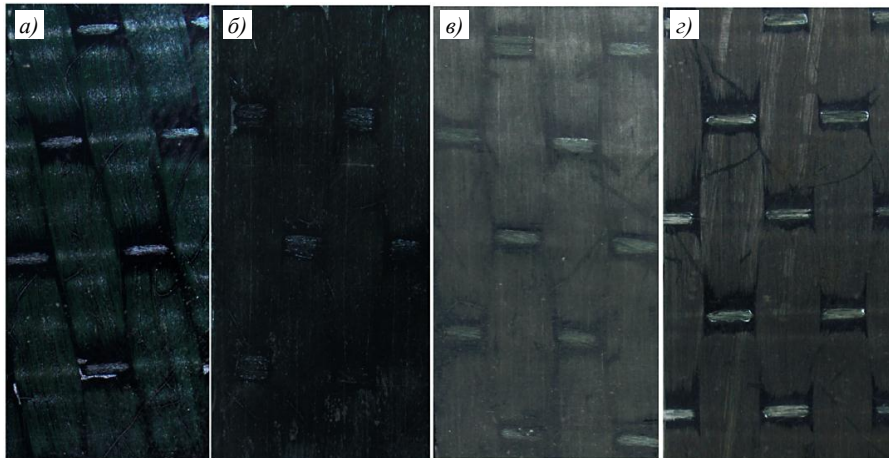


Рис. 1. Фотографии ( $\times 1,63$ ) лицевой поверхности образцов из углепластика марки ВКУ-38 в исходном состоянии (а) и после натурной экспозиции на атмосферных площадках в течение: 3 лет – в г. Якутске (б), 5 лет – в г. Сочи (в) и г. Москве (з)

Воздействие очень холодного климата (г. Якутск) в течение 3 лет незначительно сказывается на деградации поверхности высокотемпературного углепластика. Наблюдаются помутнение поверхностного слоя полимерной матрицы и ее частичное выветривание с поверхности образца. При этом основной слой связующего разрушению не подвергся.

Иначе выглядит поверхность углепластика после воздействия умеренного (г. Москва) и теплого влажного климата (г. Сочи) в течение 5 лет. Наблюдаются полное выветривание слоя полимерной матрицы с поверхности углепластика и оголение углеродного волокна, а также частичное выветривание связующего из межволоконного пространства. При этом поверхность углепластика после экспозиции в г. Сочи выглядит матовой и более гладкой, по сравнению с поверхностью образца, выставленного на площадке в г. Москве, что свидетельствует о более интенсивном эрозионном воздействии. Однако следует отметить, что деградация поверхности в обоих случаях не превышает половины одного монослоя углепластика и составляет не более 0,1 мм.

Аналогичную картину можно наблюдать и для равнопрочного углепластика марки ВКУ-38ТР после экспозиции в течение 5 лет в условиях умеренно теплого (г. Геленджик), умеренного (г. Москва) и теплого влажного климата (г. Сочи) (рис. 2). Видно, что поверхностный слой полимерной матрицы после экспозиции отсутствует полностью на всей площади образцов. При этом в условиях экспозиции в г. Москве и г. Сочи связующее остается в межволоконном пространстве и повреждений углеродного наполнителя значительно меньше, чем после экспозиции в условиях г. Геленджика, где полимерное связующее частично также отсутствует и между волокнами. Однако поверхность углепластика после экспозиции в г. Москве загрязнена и повреждена

гораздо сильнее, чем после экспозиции в г. Сочи. При сравнении поверхностей углепластиков на основе однонаправленной и равнопрочной ткани видно, что поверхность углепластика на основе равнопрочной ткани повреждается меньше.

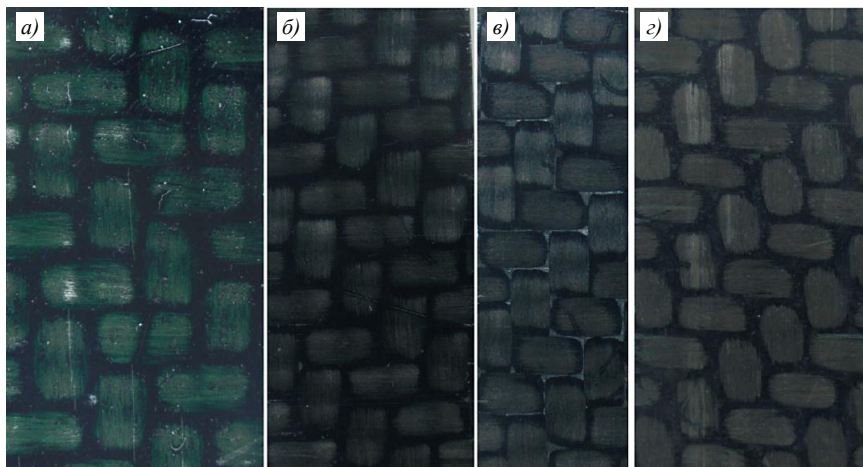


Рис. 2. Фотографии ( $\times 1,63$ ) лицевой поверхности образцов из углепластика марки ВКУ-38ТР в исходном состоянии (а) и после натурной экспозиции на атмосферных площадках в течение 5 лет в городах Сочи (б), Геленджике (в) и Москве (з)

На рис. 3 представлены фотографии лицевой поверхности углепластика марки ВКУ-38ТР в исходном состоянии (до выставления на экспозицию) и после экспозиции в условиях умеренного климата (г. Москва) в течение 1, 3 и 5 лет. Видно, что деградация пленки связующего с поверхности углепластика наблюдается уже в течение 1 года экспозиции, при этом в дальнейшем происходит незначительное частичное выветривание с поверхности углеродного волокна.

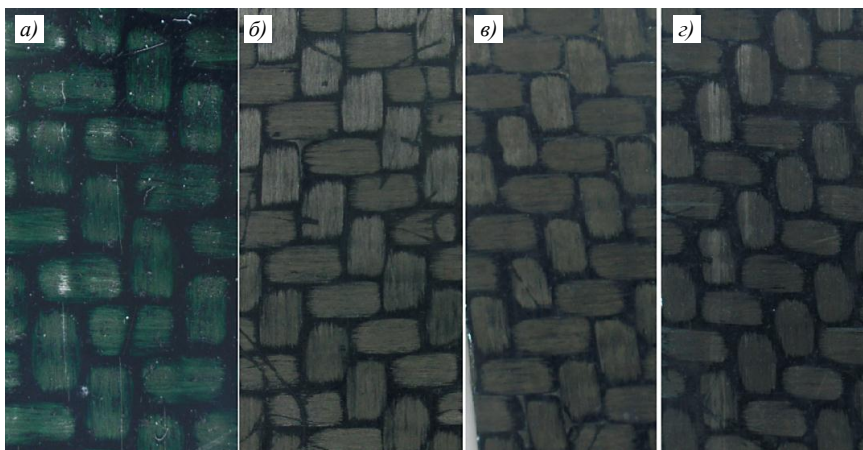


Рис. 3. Фотографии ( $\times 1,63$ ) лицевой поверхности образцов из углепластика марки ВКУ-38ТР в исходном состоянии (а) и после натурной экспозиции на атмосферной площадке в г. Москве в течение 1 (б), 3 (в) и 5 лет (з)

Изменения поверхности углепластиков серии ВКУ-38, наблюдаемые при длительной экспозиции в естественных условиях различных климатических зон, являются типичными для ПКМ. В реальных условиях эксплуатации такие наблюдаемые явления, как эрозионные повреждения полимерной матрицы и ее выветривание, а также оголение и разрушение армирующих волокон, отсутствуют благодаря лакокрасочным покрытиям, обеспечивающим защиту поверхности элементов авиационных конструкций от воздействия внешних факторов [21, 22].

Термический анализ углепластиков

Углепластики серии ВКУ-38 на основе термостойкого связующего ВСН-31 характеризуются высокой температурой стеклования и еще более высокой температурой деструкции (табл. 2) [23, 24]. На рис. 4 и 5 приведены кривые потери массы углепластиков марок ВКУ-38ЖН и ВКУ-38ТР соответственно: в исходном состоянии и после 5 лет экспозиции в различных климатических зонах (для сравнения термогравиметрические кривые на рисунках разнесены и расположены одна под другой).

Таблица 2

Температура экстраполированного начала термоокислительной деструкции углепластиков марок ВКУ-38ТР и ВКУ-38ЖН после 5 лет экспозиции в натуральных условиях различных климатических зон

Место экспозиции углепластика	Температура деструкции, °С, для углепластиков марок	
	ВКУ-38ТР	ВКУ-38ЖН
В исходном состоянии	502	550
г. Москва	489	539
г. Геленджик	499	543
г. Сочи	503	547

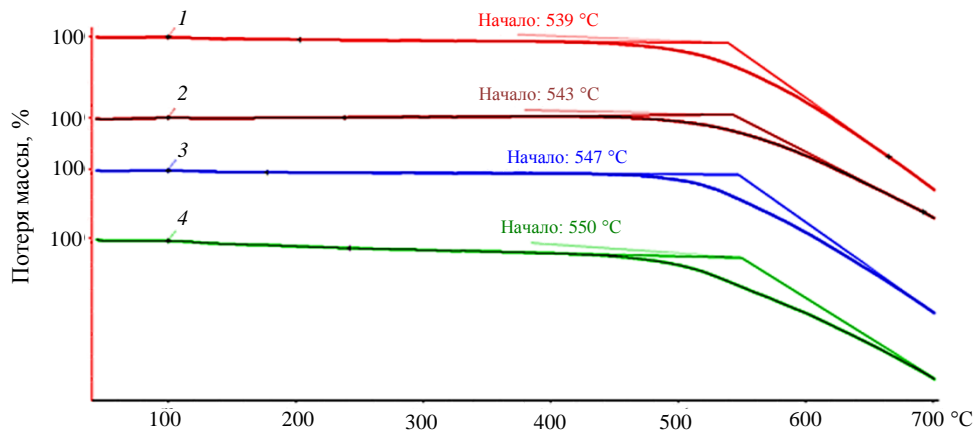


Рис. 4. Термогравиметрические кривые углепластика марки ВКУ-38ЖН в исходном состоянии (4) и после 5 лет экспозиции в натуральных условиях различных климатических зон: 1 – в г. Москве, 2 – в г. Геленджике, 3 – в г. Сочи

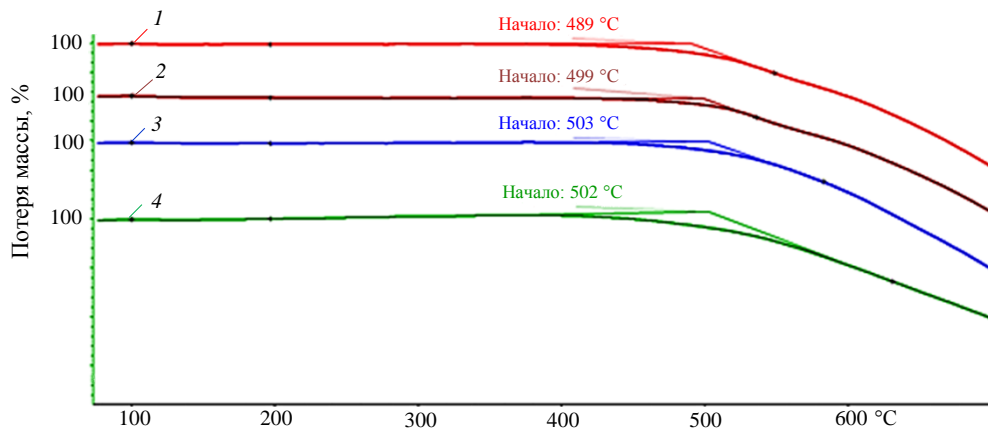


Рис. 5. Термогравиметрические кривые углепластика марки ВКУ-38ТР в исходном состоянии (4) и после 5 лет экспозиции в натуральных условиях различных климатических зон: 1 – в г. Москве, 2 – в г. Геленджике, 3 – в г. Сочи

Проанализировав полученные результаты, можно сделать вывод о различном влиянии климатических условий на термическую стойкость углепластиков. При сравнении температуры экстраполированного начала термоокислительной деструкции углепластиков, экспонированных в различных климатических зонах, наибольшее снижение (11–13 °С) наблюдается у образцов обоих углепластиков после 5 лет экспозиции в условиях умеренного климата (г. Москва). Умеренно теплый климат с мягкой зимой (г. Геленджик) еще меньше влияет на термическую стойкость углепластиков (снижение температуры деструкции составляет 4–7%), а приморская атмосфера теплого влажного климата (г. Сочи) практически не сказывается на температуре деструкции углепластиков.

#### Водопоглощение углепластиков

Отличительной особенностью углепластиков на основе фталонитрильного связующего ВСН-31 является их устойчивость к действию воды, влаги и тепловлажностному воздействию, о чем свидетельствуют низкие значения водо- и влагопоглощения, а также достаточно высокий уровень сохранения механических свойств после длительного воздействия эксплуатационных факторов [25].

Для оценки влияния естественного старения на сорбционные свойства исследуемых материалов образцы углепластиков серии ВКУ-38 после 5 лет экспозиции обезжирили, высушили до постоянной массы при температуре 70 °С и выставили на экспозицию для определения значения водопоглощения. Экспозицию проводили на образцах с незащищенными торцами и при их полном погружении в дистиллированную воду при температуре  $23 \pm 2$  °С.

На рис. 6–8 приведены данные по водопоглощению углепластиков серии ВКУ-38 в исходном состоянии (до проведения натурной экспозиции) и после экспозиции в условиях различных климатических зон.

Из данных, представленных на рис. 6, видно, что в исходном состоянии образцы углепластика марки ВКУ-38ТР достигают равновесного водопоглощения в течение 65–70 сут. Водопоглощение за первые сутки составляет до 0,2%, что связано с проникновением влаги через дефекты в слое связующего на поверхности углепластика. В дальнейшем идет постепенное равномерное сорбирование воды до равновесного значения 0,82%. После натурной экспозиции характер кривых водопоглощения существенно меняется: основное насыщение происходит в течение первых 10 сут до уровня 0,85–0,9%, а выход на состояние сорбционного равновесия сокращается до 40 сут. Такое изменение характера водопоглощения, скорее всего, связано с деградацией поверхностного слоя материала и увеличением количества дефектов на его поверхности.

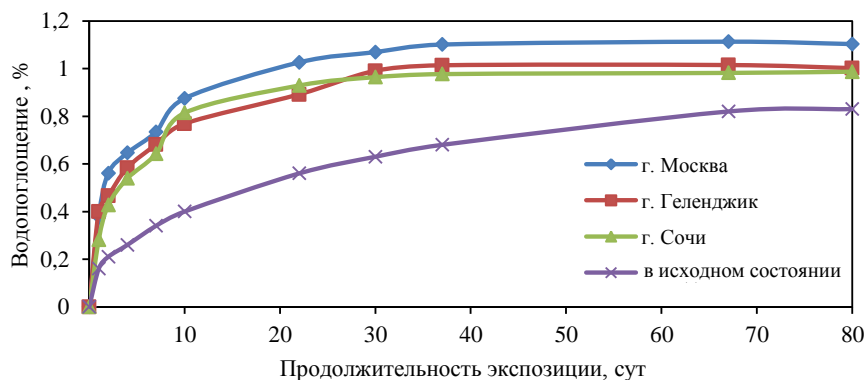


Рис. 6. Водопоглощение образцов углепластика марки ВКУ-38ТР в исходном состоянии и после 5 лет экспозиции в различных климатических зонах: умеренно теплом (г. Геленджик), умеренном (г. Москва) и теплом влажном климате (г. Сочи)

Фотографии микроструктуры образцов после проведения натурной экспозиции представлены на рис. 1–3, где отчетливо видны оголение армирующих волокон и выветривание полимерной матрицы, что свидетельствует об увеличении дефектности поверхности материалов. В зависимости от условий экспозиции наблюдается увеличение сорбированной воды до 0,98–1,1%, причем наибольшее водопоглощение (1,1%) – у углепластика, экспонированного в условиях умеренного климата (г. Москва).

Аналогичная картина наблюдается на рис. 7: характер кривых водопоглощения углепластика марки ВКУ-38ЖН изменяется. В исходном состоянии образцы углепластика ВКУ-38ЖН достигают равновесного водопоглощения в течение 70 сут.

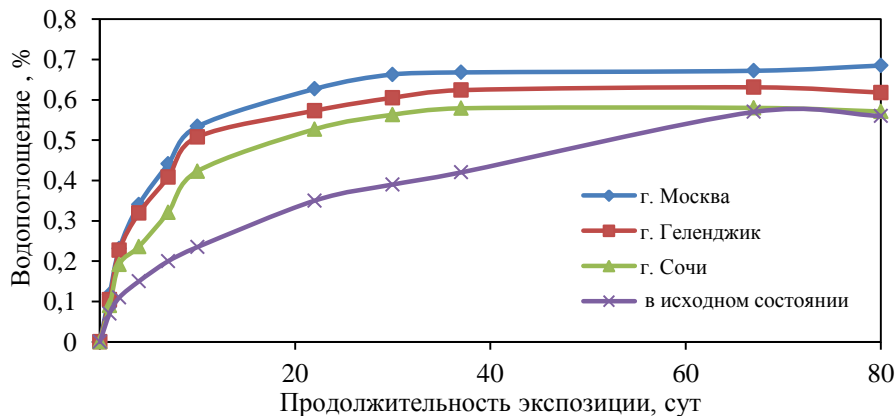


Рис. 7. Водопоглощение образцов углепластика марки ВКУ-38ЖН в исходном состоянии и после 5 лет экспозиции в различных климатических зонах: умеренно теплом (г. Геленджик), умеренном (г. Москва) и теплом влажном климате (г. Сочи)

После натурной экспозиции в углепластике марки ВКУ-38ЖН максимальная скорость сорбции воды наблюдается в течение первых 10 сут, после чего происходит незначительное увеличение водопоглощения до состояния сорбционного равновесия, наступающего через 30–35 сут. Количество сорбированной воды после экспозиции в течение 5 лет в атмосфере умеренного климата (г. Москва) возрастает до 0,7%, а после экспозиции в г. Геленджике и г. Сочи остается практически на уровне исходного материала (0,57–0,61%).

Из представленных на рис. 8 данных видно, что в исходном состоянии образцы углепластика марки ВКУ-38 достигают равновесного водопоглощения в течение 30 сут. Количество сорбированной влаги за первые несколько суток составляет до 0,4%, и в дальнейшем идет постепенное накопление влаги в материале до равновесного водопоглощения (0,70%). После натурной экспозиции в течение 5 лет в условиях теплого влажного (г. Сочи) и очень холодного климата (г. Якутск) наблюдается увеличение водопоглощения до 0,95–1,04%. При этом основное поглощение воды происходит в течение первых 10 сут до уровня 0,75–0,93%, а затем наблюдается незначительное увеличение сорбированной воды до состояния сорбционного равновесия, наступающего через ~30 сут.

Увеличение водопоглощения и изменение характера кривых сорбции углепластиков после длительной экспозиции в первую очередь связаны с изменением рельефа поверхности и наличием дефектов на поверхности материалов, образованных в процессе проведения климатических испытаний [26, 27].

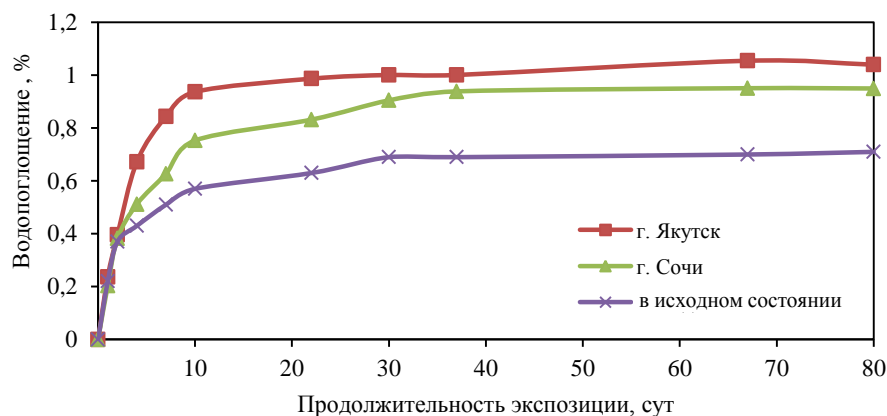


Рис. 8. Водопоглощение образцов углепластика марки ВКУ-38 в исходном состоянии и после экспозиции в условиях теплого влажного (г. Сочи, 5 лет) и очень холодного климата (г. Якутск, 3 года)

### Прочностные свойства углепластиков

Углепластики марок ВКУ-38 и ВКУ-38ЖН рекомендованы для изготовления термонагруженных деталей и агрегатов в высоко- и средненагруженных авиационных конструкциях.

В табл. 3 приведены свойства углепластика ВКУ-38 после длительной экспозиции в различных климатических зонах.

Таблица 3

**Упруго-прочностные свойства углепластика марки ВКУ-38 в различных климатических зонах в зависимости от температуры и продолжительности экспозиции**

Место экспозиции	Продолжительность экспозиции, года	Прочность при растяжении, МПа	Модуль упругости при растяжении, ГПа		
			при температуре, °С		
			20		300
В исходном состоянии (паспорт №1887)	–	350	91	234	182
г. Москва	5	320	82	215	155
г. Сочи		365	86	245	210
г. Якутск	3	350	84	265	215

Из данных, представленных в табл. 3, видно, что после экспозиции в г. Сочи (5 лет) и в г. Якутске (3 года) прочностные свойства углепластика марки ВКУ-38 не только не снижаются, но и несколько увеличиваются. Так, прочность при сжатии после экспозиции в условиях холодного климата (г. Якутск) возрастает на 13% при температуре 20 °С и на 18% при повышенной температуре. Однако после 5 лет экспозиции в условиях умеренного климата (г. Москва) наблюдается снижение прочностных свойств как при растяжении (на 9%), так и при сжатии (на 8% – при температуре испытаний 20 °С и на 15% – при температуре 300 °С).

В табл. 4 приведены свойства углепластика марки ВКУ-38ЖН после длительной экспозиции в различных климатических зонах.

Из данных, представленных в табл. 4, видно, что после 1 года экспозиции в различных условиях у углепластика марки ВКУ-38ЖН наблюдается снижение свойств как при комнатной температуре, так и при температуре 300 °С. В качестве

исходных значений прочностей приняты паспортные данные. Сохранение свойств от уровня исходных значений (в зависимости от вида испытаний) при температуре 20 °С составляет: 80–91% – в г. Москве, 73–87% – в г. Геленджике и 78–89% – в г. Сочи, а при температуре 300 °С: 67–69% – в г. Москве, 59–60% – в г. Геленджике и 60–62% – в г. Сочи.

Таблица 4

**Прочностные свойства углепластика марки ВКУ-38ЖН в различных климатических зонах в зависимости от температуры и продолжительности экспозиции**

Место экспозиции	Продолжительность экспозиции, года	Прочность при растяжении, МПа		Прочность при статическом изгибе, МПа		Прочность при сжатии, МПа	
		при температуре, °С					
		20	300	20	300	20	300
В исходном состоянии (паспорт №1887, дополнение 1)	–	1300		1320	1240	670	610
г. Москва	1	1050	–	1200	860	580	410
	5	1160	960	1230	830	550	400
г. Геленджик	1	950	–	1150	740	540	370
	5	1220	1100	1130	780	520	490
г. Сочи	1	1110	–	1030	750	600	380
	5	1070	1010	1120	910	530	510

Исследования свойств углепластика марки ВКУ-38Ж, проведенные после 5 лет экспозиции, показали, что наблюдается повышение прочности, по сравнению с 1 годом экспозиции. Сохранение прочности при растяжении от уровня исходного значения экспонированных образцов углепластика марки ВКУ-38ЖН при температуре испытаний 20 °С составило: 89% – в г. Москве, 82% – в г. Сочи и 94% – в г. Геленджике, а при температуре 300 °С сохранение прочности при растяжении значительно ниже: 74% – в г. Москве, 84% – в г. Геленджике и 77% – в г. Сочи.

Испытания образцов углепластика на статический изгиб при температуре 20 °С показали сохранение прочности 85% от уровня исходных значений после экспозиции в г. Сочи и г. Геленджике, а также 93% – после экспозиции в г. Москве. При температуре испытаний 300 °С сохранение прочности экспонированных образцов составило: 67% – в г. Москве, 63% – в г. Геленджике и 73% – в г. Сочи.

По результатам проведенных испытаний на прочность при сжатии при температуре 20 °С установлено, что сохранение прочности от уровня исходного значения экспонированных образцов составило: 82% – в г. Москве, 77% – в г. Геленджике и 79% – в г. Сочи, а при температуре 300 °С: 65% – в г. Москве, 80% – в г. Геленджике и 83% – в г. Сочи.

Снижение прочности после 1 года экспозиции и последующее незначительное увеличение после 5 лет можно объяснить протеканием процессов релаксации внутренних напряжений в материале, структурными изменениями в полимерной матрице и пластифицирующим действием влаги [28, 29].

Углепластик марки ВКУ-38ТР рекомендуется для изготовления теплонагруженных деталей и агрегатов в средненагруженных конструкциях планера в зоне двигателя, в частности элементов лопаток РКЦК. В табл. 5 приведены свойства углепластика марки ВКУ-38ТР после длительной экспозиции в различных климатических зонах.

Таблица 5

**Прочностные свойства углепластика марки ВКУ-38ТР в различных климатических зонах в зависимости от температуры и продолжительности экспозиции**

Место экспозиции	Продолжительность экспозиции, года	Прочность при растяжении, МПа		Прочность при статическом изгибе, МПа	
		при температуре, °С			
		20	300	20	300
В исходном состоянии (паспорт №1887, дополнение 2)	–	740	700	670	580
г. Москва	3	740	660*	–	–
	5	740	680	740	480
г. Геленджик	1	710	–	640	500
	3	695	650*	–	–
	5	750	660	740	510
г. Сочи	1	770	–	680	475
	3	665	670*	–	–
	5	730	720	740	620

\* Образцы испытаны при температуре 200 °С.

Из данных, представленных в табл. 5, видно, что прочность углепластика марки ВКУ-38ТР при растяжении, как при температуре испытаний 20 °С, так и при повышенных температурах, практически не меняется (сохранение от уровня исходных значений 94–100%) в зависимости от места и продолжительности экспозиции. Прочность при статическом изгибе при комнатной температуре после 1 года экспозиции остается на уровне исходного значения, а после 5 лет даже увеличивается (на 9,5%).

При температуре испытаний 300 °С уровень сохранения прочности снижается и после 5 лет экспозиции составляет: 64% – в г. Москве, 69% – в г. Геленджике и 84% – в г. Сочи, что соответствует сохранению уровня свойств исходного углепластика (86%).

### Заключения

Разработанные во ФГУП «ВИАМ» углепластики серии ВКУ-38 (паспорт №1887, дополнения 1 и 2) показали сохранение прочностных свойств после длительного воздействия климатических факторов, по сравнению с паспортными данными, на уровне 80–90% при комнатной температуре испытаний и 60–75% при температуре испытаний 300 °С. Такой уровень сохранения свойств свидетельствует об их стойкости к воздействию внешних факторов различных климатических зон.

У углепластиков, экспонировавшихся в условиях умеренного климата (г. Москва), по сравнению с аналогичными углепластиками, выставленными в других климатических зонах, наблюдаются наибольшие повреждение поверхности материалов, снижение температуры начала активной деструкции углепластиков (на 11–13 °С) и увеличение водопоглощения, а также наименьшее сохранение прочностных свойств при температуре испытаний 300 °С.

Деградация поверхности углепластика наблюдается уже после 1 года экспозиции, что не является критичным, так как даже после 5 лет экспозиции сохранение свойств от уровня исходных значений составляет от 60 до 90%. Кроме того, в реальных условиях эксплуатации изделия из углепластиков работают с нанесенным лакокрасочным покрытием, обеспечивающим защиту поверхности элементов авиационных конструкций от воздействия внешних факторов.

**Библиографический список**

1. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения – основа инноваций, технологического лидерства и национальной безопасности России // Интеллект и технологии. 2016. №2 (14). С. 16–21.
2. Каблов Е.Н., Старцев В.О. Системный анализ влияния климата на механические свойства полимерных композиционных материалов по данным отечественных и зарубежных источников // Авиационные материалы и технологии. 2018. №2 (51). С. 47–58. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-2-47-58.
3. Каблов Е.Н., Кириллов В.Н., Жирнов А.Д., Старцев О.В., Вапиров Ю.М. Центры для климатических испытаний авиационных ПКМ // Авиационная промышленность. 2009. №4. С. 36–46.
4. Авиационные материалы: справочник: в 13 т. / под общ. ред. Е.Н. Каблова. 7-е изд., перераб. и доп. М.: ВИАМ, 2015. Т. 13: Климатическая и микробиологическая стойкость неметаллических материалов. 270 с.
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 (37). С. 38–52. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-4-38-52.
6. Каблов Е.Н., Старцев В.О. Климатическое старение полимерных композиционных материалов авиационного назначения. I. Оценка влияния значимых факторов воздействия // Деформация и разрушение материалов. 2019. №12. С. 7–16.
7. Каблов Е.Н., Старцев В.О. Климатическое старение полимерных композиционных материалов авиационного назначения. II. Развитие методов исследования ранних стадий старения // Деформация и разрушение материалов. 2020. №1. С. 15–21.
8. Каблов Е.Н., Старцев В.О., Иноземцев А.А. Влагонасыщение конструктивно-подобных элементов из полимерных композиционных материалов в открытых климатических условиях с наложением термоциклов // Авиационные материалы и технологии. 2017. №2. С. 56–68. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-2-56-68.
9. Лаптев А.Б., Барботько С.Л., Николаев Е.В. Основные направления исследований сохранности свойств материалов под воздействием климатических и эксплуатационных факторов // Авиационные материалы и технологии. 2017. №S. С. 547–561. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-547-561.
10. Каблов Е.Н. ВИАМ: материалы нового поколения для ПД-14 // Крылья Родины. 2019. №7–8. С. 54–58.
11. Каблов Е.Н., Скибин В.А., Абузин Ю.А., Кочетов В.Н., Шавнев А.А., Каримбаев Т.Д., Луппов А.А. Широкохордные лопатки вентиляторов для ТРДД 5–6 поколений // Конверсия в машиностроении. 2006. №5. С. 5–16.
12. Мекхэм М. Snecma и ее партнер АЕС создают новую технологию изготовления композитных лопаток // Авиатранспортное обозрение. 2012. №131. URL: <http://www.ato.ru/content/snecma-i-ee-partner-aec-sozdayut-novuyu-tehnologiyu-izgotovleniya-kompozitnyh-lopatok> (дата обращения: 17.11.2020).
13. 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.
14. Новиков А.С., Каримбаев Т.Д. Рабочие лопатки вентиляторов большой степени двухконтурности для перспективных ТРДД // Двигатель. 2015. №5 (101). С. 6–11.
15. High temperature plastics market by type (polysulfones, polyimides, polyphenylene sulfide, fluoropolymers, and others), by end-use industries (electrical & electronic, transportation, industrial, medical, and others) – Global trends & forecast to 2019 // MarketsandMarkets: офиц. сайт. URL: <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/high-temperature-plastics-market-1192.html> (дата обращения: 17.11.2020).
16. Курносов А.О., Раскутин А.Е., Мухаметов Р.Р., Мельников Д.А. Полимерные композиционные материалы на основе терморепактивных полиимидных связующих // Вопросы материаловедения. 2016. №4. С. 50–62.

17. Кузнецов А.А., Семенова Г.К. Перспективные высокотемпературные термореактивные связующие для полимерных композиционных материалов // Российский химический журнал. 2010. Т. 53. №4. С. 86–96.
18. Зеленина И.В., Гуляев И.Н., Кучеровский А.И., Мухаметов Р.Р. Термостойкие углепластики для рабочего колеса центробежного компрессора // Труды ВИАМ. 2016. №2 (38). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 06.11.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-2-8-8.
19. Николаев Е.В., Барботько С.Л., Андреева Н.П., Павлов М.Р., Гращенко Д.В. 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 // Труды ВИАМ. 2016. №6 (42). Ст. 11. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 06.11.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-6-11-11.
20. Гладких А.В., Курс И.С., Курс М.Г. Анализ данных натурных климатических испытаний, совмещенных с приложением эксплуатационных факторов, неметаллических материалов (обзор) // Труды ВИАМ. 2018. №10 (70). Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 06.11.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-10-74-82.
21. Деев И.С., Куршев Е.В., Лонский С.Л., Железина Г.Ф. Влияние длительного климатического старения на микроструктуру поверхности эпоксидных органических полимеров и характер ее разрушения в условиях изгиба // Вопросы материаловедения. 2016. №3 (87). С. 104–114.
22. Старцев В.О. Климатическая стойкость полимерных композиционных материалов и защитных покрытий в умеренно-теплом климате: дис. ... д-ра техн. наук. М.: ВИАМ, 2018. 308 с.
23. Валева Е.О. Влияние тепловлажностного воздействия на свойства термостойких полимерных композиционных материалов на основе фталонитрильной матрицы: дис. ... канд. техн. наук. М.: МАИ, 2018. 130 с.
24. Валева Е.О., Зеленина И.В., Шведкова А.К., Гуляев И.Н. Тепловое старение термостойких углепластиков // Вопросы материаловедения. 2015. №4 (84). С. 91–99.
25. Гуляев И.Н., Зеленина И.В., Валева Е.О., Шведкова А.К. Исследование влияния повышенной температуры и влажности на свойства термостойких углепластиков // Конструкции из композиционных материалов. 2015. №3 (139). С. 55–61.
26. Валева 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). Ст. 12. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 06.11.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-67-118-128.
27. Панин С.В. Исследование изменения рельефа поверхности и влагопереноса в полимерных композиционных материалах в процессе климатического старения: дис. ... канд. техн. наук. М.: ВИАМ, 2015. 131 с.
28. Николаев Е.В., Кириллов В.Н., Скирта А.А., Гращенко Д.В. Исследование закономерностей влагопереноса и разработка стандарта по определению коэффициента диффузии и предельного влагосодержания для оценки механических свойств углепластиков // Авиационные материалы и технологии. 2013. №3. С. 44–48.
29. Лаптев А.Б., Барботько С.Л., Николаев Е.В., Скирта А.А. Статистическая обработка результатов климатических испытаний стеклопластиков // Пластические массы. 2016. №3–4. С. 58–64.