

УДК 678.747.2:620.165.79

А.Е. Сорокин<sup>1</sup>, Э.Я. Бейдер<sup>1</sup>, Т.Ф. Изотова<sup>1</sup>, Е.В. Николаев<sup>1</sup>, А.К. Шведкова<sup>1</sup>**ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ УГЛЕПЛАСТИКА  
НА ПОЛИФЕНИЛЕНСУЛЬФИДНОМ СВЯЗУЮЩЕМ ПОСЛЕ  
УСКОРЕННЫХ И НАТУРНЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ**

DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-3-66-72

Приведено исследование свойств конструкционного термопластичного углепластика на полифениленсульфидной матрице после ускоренных и натуральных климатических испытаний. Углепластик продемонстрировал высокую стойкость к водной и влажной среде, в том числе и при повышенных температурах, и к тропическому климату. Показано, что углепластик характеризуется низкими значениями водо- и влагопоглощения. Тепловое старение углепластика сопровождается увеличением его температуры стеклования, что вызвано процессами структуризации. Воздействия, возникающие в процессе натуральных климатических испытаний углепластика, привели к незначительному снижению его прочностных показателей и улучшению пожаробезопасных свойств.

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 13.2. «Конструкционные ПКМ» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [1].

**Ключевые слова:** полимерный композиционный материал, углепластик, термопластичная матрица, ускоренное старение, натурные климатические испытания.

*This article contains a properties study of structural thermoplastic carbon fiber reinforced plastic (CFRP) based on polyphenylenesulfide matrix after accelerated and full-scale climatic tests. CFRP has high resistance to tropical climate, water and humid environment at normal and elevated temperatures. It is shown that CFRP is characterized by low water- and moisture absorption. Thermal aging of CFRP is accompanied by increasing of its' glass transition temperature, because of structuration processes. Effects arising during full-scale climatic tests of CFRP resulted in slight reducing of its' strength characteristics and increasing of fireproof properties.*

*The work is executed within implementation of the complex scientific direction 13.2. «Constructional PCM» («The strategic directions of development of materials and technologies of their processing for the period till 2030») [1].*

**Keywords:** polymer composite material, carbon fiber plastic, thermoplastic matrix, accelerated aging, full-scale climatic tests.

<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**

Использование конструкций из углепластиков позволяет снизить массу летательных аппаратов и обеспечивает жесткость и легкость его элементов. В данной статье описаны особенности свойств углепластика на полифениленсульфидном термопластичном связующем, который предназначен для изготовления мало- и средненагруженных конструкций воздушного судна – лобовиков крыла, заливов мотогондол, панелей люков, перегородок и т. п. (рис. 1) [1–18].

В процессе эксплуатации воздушное судно подвергается воздействию повышенных и пониженных температур, их перепадов, повышенной влажности, ультрафиолетового излучения и др. Изучение влияния различных климатических факторов на материал позволяет определить его эксплуатационные характеристики и прогнози-

ровать поведение в конструкции. В связи с этим перед внедрением материал подвергают ускоренным и натурным климатическим испытаниям, в процессе которых на него воздействуют факторы старения [16–25].

В ряде работ [18, 19, 21–32] описаны исследования влияния климатических воздействий на свойства слоистых пластиков, армированных углеродными волокнами. Углепластики на основе различных термопластичных матриц: полиэфиримидной, полиамидной, полиэфирэфиркетонной, полисульфонной, демонстрируют высокий уровень сохранения свойств и высокую стойкость к воздействию повышенных температур, водной и влажной сред, к водному раствору хлорида натрия.

Работы [19–21] посвящены изучению поведения слоистых углепластиков на термопластичном

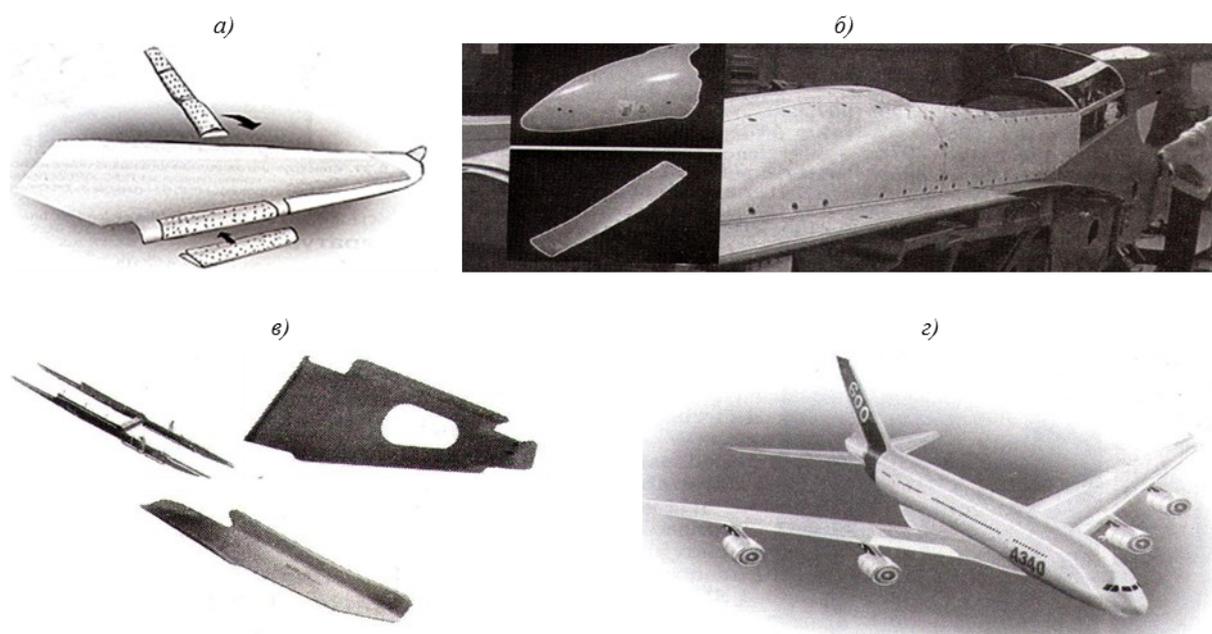


Рис. 1. Конструкции передней кромки крыла (а–в) Аэробусов А340-500/600 (г) из углепластика на полифениленсульфидном связующем

полифениленсульфидном связующем в процессе ускоренных климатических испытаний. Показано, что углепластик на полифениленсульфидном связующем марки Rytan, наполненный углеродной лентой-полотном марки 300-3К-130, в процессе тепловлажностного старения при различных температурах характеризуется снижением прочности при растяжении на 5–8%, при изгибе – на 17–25%, ударной вязкости – на 9–12% [19, 20]. В работе [21] исследовано влияние выдержки в воде при 80°C на прочность при сжатии углепластика и показано, что он характеризуется повышением прочности на 13%, что противоречит традиционным представлениям.

Целью и задачей данной работы было проведение исследования влияния различных сред на свойства углепластика на полифениленсульфидной матрице и определение его эксплуатационных характеристик.

#### Материалы и методы

Углепластик на основе однонаправленной углеволоконной ленты фирмы Toho Co. и полифениленсульфидного связующего фирмы Ticona получают прямым компрессионным прессованием при температуре 330°C и давлении 1,4 МПа на гидравлическом прессе типа ОРМА.

Образцы для испытаний изготавливали с помощью циркулярной пилы, в качестве режущего инструмента использовали алмазный диск. Размеры образцов определяли согласно требованиям ГОСТ, по которым проводили испытания.

Исследование влаго- и водопоглощения углепластика проводили по ГОСТ 12020–72, тепловлажностное старение и воздействие цикличе-

ских перепадов температур – по ГОСТ 9.707–81, тепловое старение – по ГОСТ 9.024–74.

Экспозицию в тропической камере проводили по суточному циклу: 8 ч при температуре 50°C и  $\phi=98\%+12$  ч при температуре 20°C и  $\phi=98\%+4$  ч при температуре 20°C и  $\phi=65\%$ .

Натурные климатические испытания углепластиков проводили на открытых площадках промышленной зоны умеренного климата и приморской зоны умеренно теплого климата по ГОСТ 9.708–83.

Горючесть материала определяли по ОСТ 1 90094–79 при продолжительности экспозиции в пламени горелки 60 с.

Испытание на сжатие проводили на образцах с квазиизотропной и однонаправленной укладкой по ГОСТ 25.602–80.

Температуру стеклования углепластика определяли по изменению зависимости тангенса угла механических потерь от температуры на крутильном маятнике «Релаксометр РМ-05» в диапазоне температур от 30 до 260°C при скорости нагрева 5 К/мин и частоте 0,35 Гц.

#### Результаты и обсуждение

Продолжительное воздействие различных сред и температур в значительной степени влияет на свойства материалов. Исследование процесса изменения свойств углепластика под влиянием климатических воздействий позволяет оценить его эксплуатационные характеристики и определить его назначение. В данной статье описано исследование свойств углепластика на термопластичном полифениленсульфидном связующем при естественных и ускоренных климатических испытаниях.

Полифениленсульфид (ПФС) характеризуется низкими водо- и влагопоглощением. Кипячение пластин углепластика в течение 2 сут приводит к увеличению массы образца на 0,2%, а в течение 1,5 мес – на 1–2% [26]. Углепластик же в отличие от чистого ПФС характеризуется наличием большего количества пор (до 2–3%), что вызвано высоким значением вязкости термопластичной матрицы и трудностью ее совмещения с волокном. Изменение структуры пластика при переходе от чистого ПФС к ПКМ на его основе требует дополнительного анализа этих показателей.

В табл. 1 приведены результаты испытаний углепластика до и после экспозиции в различных условиях. Из представленных данных видно, что сохранение свойств углепластика находится на уровне от 89 до 98% от исходного значения в зависимости от условий экспозиции.

Снижение прочности при сжатии образцов с однонаправленной укладкой составило 7 и 10% после 24 ч и 1 мес экспозиции в воде соответственно и 3% после экспозиции во влажной среде в течение 1 мес. Образцы углепластика с квазиизотропной укладкой характеризуются снижением этого показателя на 9% после 24 ч и 10% после 1 мес экспозиции в воде и на 7% после 1 мес воздействия влажной среды.

Экспозиция во влажной среде в обоих случаях, как и следовало ожидать, приводит к меньшему падению уровня остаточной прочности при сжатии углепластика по сравнению с результатами испытаний после выдержки в воде.

Полученные значения привеса (табл. 1), который имели образцы после экспозиции в соответствующих средах, хорошо коррелируют с результатами, полученными при определении остаточной прочности на сжатии. После 24 ч выдержки в воде однонаправленные образцы имеют привес 0,021%, а образцы с квазиизотропной укладкой 0,05%, уровень сохранения свойств этих образцов равен 93 и 91% соответственно. В результате экспозиции в течение 30 сут в воде сохранение прочности в обоих случаях находится на уровне 90%, а привес образцов практически одинаков и составляет 0,11–0,12%.

Квазиизотропные образцы на первых этапах экспозиции демонстрируют более активное влагопоглощение по сравнению с однонаправленными образцами. Это, вероятно, связано с более активными процессами диффузии воды и влаги вдоль направления волокна, чем поперек.

Таким образом, можно наблюдать, что однонаправленная укладка способствует повышению стойкости углепластика к воздействию влажной и водной сред.

По приведенным выше характеристикам углепластик находится на уровне отечественных и зарубежных аналогов. В работе [1] приведены значения водопоглощения за 24 ч экспозиции, которое составило 0,09% у пластика КТМУ-1 и 0,31% – у КТМУ-2, а сохранение прочности при сжатии

этих материалов после 30 сут экспозиции в воде находится на уровне 97 и 95% соответственно. В работах [19–21] зарубежные аналоги исследуемого углепластика в результате тепловлажностного старения характеризуются снижением прочности при растяжении на 5–8%, при изгибе – на 17–25%, ударной вязкости – на 9–12%.

На рис. 2 приведены кривые водо- и влагопоглощения в зависимости от продолжительности экспозиции. Видно, что углепластик имеет низкое равновесное значение влаго- и водопоглощения: 0,107 и 0,12% соответственно, а его насыщение наступает на 45 сут в обоих случаях, причем поглощение пластиком влаги и воды в первые 10 сут экспозиции находится практически на одном уровне, что свидетельствует о насыщении преимущественно участков образцов, предварительно подвергнутых механической обработке и имеющих наибольшее количество дефектов.

В отличие от процессов водо- и влагопоглощения при 20°C тепловлажностное старение сопровождается резким повышением массы образца, особенно ярко выражено процесс идет в первые 10 сут. Выход на равновесное значение влагопоглощения наступает уже через 1 мес (табл. 1). В отличие от испытания при 20°C прочность при сжатии снижается в процессе тепловлажностного старения, и ее уровень составляет 94 и 89% от исходной после 1 и 3 мес экспозиции.

На рис. 3 приведены зависимости тангенса угла механических потерь от температуры образцов углепластика после их экспозиции в различных средах. Видно, что после выдержки в воде и тепловлажностного старения наблюдается тенденция к повышению температуры стеклования углепластика. Это может свидетельствовать о протекании процессов релаксации и структуризации в полимерной матрице.

Прочность при сжатии после тропической камеры (табл. 1) имеет уровень 94 и 98% от исходной после 1 и 3 мес экспозиции, что свидетельствует о высокой стойкости материала к тропическому климату.

В результате проведенного исследования можно сделать вывод о том, что углепластик устойчив к тропическому климату, воздействию воды и влажной среды, в том числе и при повышенных температурах, и конкурентоспособен по приведенным характеристикам с зарубежными и отечественными аналогами.

В табл. 2 приведены результаты влияния тепловлажностного старения и циклического перепада температур на предел прочности при сжатии углепластика с квазиизотропной укладкой. Видно, что углепластик характеризуется высоким уровнем сохранения прочности при сжатии. После воздействия циклических перепадов температур  $+160 \pm -60^\circ\text{C}$  в количестве 5 и 10 циклов предел прочности при сжатии углепластика снижается на 5 и 9% соответственно. На рис. 4 (кривые 5 и 6)

Таблица 1

Влияние влажной и водной сред на прочностные свойства углепластика

Условия экспозиции	Укладка	Продолжительность воздействия	Привес, %	Предел прочности при сжатии, МПа	Уровень сохранения свойств, % (относительно исходного)
В исходном состоянии	Однонаправленная	—	—	992	—
	Квазиизотропная	—	—	490	—
В воде при 20°C	Однонаправленная	24 ч	0,021	922	93
		1 мес	0,110	900	90
	Квазиизотропная	24 ч	0,050	447	91
		1 мес	0,120	445	91
Во влажной среде при 20°C и φ=98%	Однонаправленная	1 мес	0,095	960	97
		Квазиизотропная	1 мес	0,107	455
Тепловлажностное старение при 60°C и φ=85%	Квазиизотропная	1 мес	0,178	461	94
		3 мес	0,178	435	89
Тропическая камера	Квазиизотропная	1 мес	—	460	94
		3 мес	—	480	98

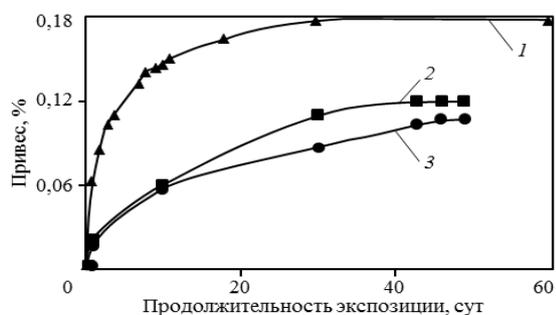


Рис. 2. Зависимости водо- и влагопоглощения углепластика: 1 – влагонасыщение при 60°C и φ=85%; 2 – водопоглощение при 20°C; 3 – влагопоглощение при 20°C и φ=98%

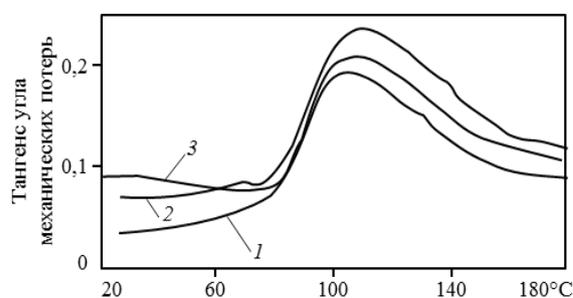


Рис. 3. Температурная зависимость тангенса угла механических потерь углепластика: 1 – в исходном состоянии; 2 – после 24 ч водопоглощения; 3 – после 30 сут тепловлажностного старения

Таблица 2

Прочность при сжатии углепластика после воздействия климатических факторов

Климатический фактор	Продолжительность воздействия	Предел прочности при сжатии, МПа	Уровень сохранения свойств, % (относительно исходного)	
В исходном состоянии	—	490	—	
Тепловое старение при температуре, °C:	160	500 ч	410	83
		1000 ч	470	96
	180	500 ч	455	93
Термоциклирование при -60±+160°C	5 циклов	465	95	
	10 циклов	445	91	

Рис. 4. Температурная зависимость тангенса угла механических потерь углепластика: 1 – в исходном состоянии; 2, 3 – после 500 ч выдержки при 180 и 160°C соответственно; 4 – после 1000 ч выдержки при 160°C; 5, 6 – после термоциклирования -60±+160°C в течение 5 и 10 циклов соответственно

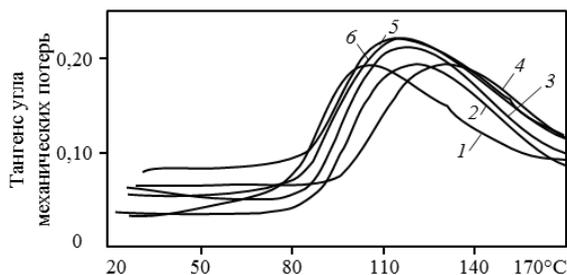


Таблица 3

## Прочность при сжатии углепластика после воздействия природных климатических испытаний

Условия экспозиции	Продолжительность воздействия, мес	Предел прочности при сжатии, МПа	Уровень сохранения свойств, % (относительно исходного)
ГЦКИ – открытая площадка	6	460	94
	10	455	93
МЦКИ:	– открытая площадка	6	98
		10	94
	– склад	6	98
		10	97

Таблица 4

## Горючесть углепластика после воздействия природных климатических испытаний

Условия экспозиции	Длина обугливания, мм	Продолжительность остаточного горения, с	Классификация
В исходном состоянии	42	3	Самозатухающий
ГЦКИ – открытая площадка	36	0	Трудногорящий
МЦКИ:	– открытая площадка	0	Трудногорящий
		0	
	– склад	38	0

приведены зависимости тангенса угла механических потерь после термоциклирования, на которых можно наблюдать смещение в область более высоких температур пика стеклования углепластика относительно исходного значения (рис. 4, кривая 1) на  $\sim 10^\circ\text{C}$  и начале протекания релаксационных процессов и структуризации.

В результате теплового старения углепластика в течение 500 ч при температурах 160 и  $180^\circ\text{C}$  и 1000 ч при  $160^\circ\text{C}$  наблюдается сохранение прочности при сжатии – на уровне 83, 93 и 96% соответственно. Для того чтобы выявить причины такого поведения углепластика, необходимо обратиться к зависимостям тангенса механических потерь от температуры, приведенным на рис. 4. Представленные зависимости демонстрируют, что в результате выдержки в течение 500 ч при  $180^\circ\text{C}$  (рис. 4, кривая 2) повышение температуры стеклования происходит на  $\sim 15^\circ\text{C}$ , в то время как в результате экспозиции при  $160^\circ\text{C}$  в течение 500 ч (рис. 4, кривая 3) увеличение температуры стеклования происходит на  $\sim 10^\circ\text{C}$ , а в течение 1000 ч на  $25^\circ\text{C}$  (рис. 4, кривая 4) относительно исходного значения (рис. 4, кривая 1). Приведенное выше описание свидетельствует о том, что выдержка углепластика при повышенных температурах сопровождается не только деструктивными процессами, но и структуризацией и релаксацией, причем полнота протекания процессов структуризации зависит от температуры и продолжительности теплового воздействия.

Экспозиция углепластика в природных условиях, так же как и ускоренные испытания, привела к снижению его свойств (табл. 1–3). Выдержка в условиях складского хранения привела к незначительному снижению прочности на 2 и 3% после 6

и 10 мес, что входит в величину разброса значений при испытании выборки образцов.

Экспозиция в промышленной зоне умеренно холодного климата в меньшей степени повлияла на значение остаточной прочности при сжатии (снижение составило 2 и 6% после 6 и 10 мес экспозиции) по сравнению с приморской зоной умеренно теплого климата (снижение прочности составило 6 и 7% после 6 и 10 мес экспозиции). В зоне умеренно теплого климата в первые 6 мес наблюдалось более резкое снижение прочности, что, вероятно, вызвано более высокой влажностью воздуха этой зоны.

Анализ горючести образцов после 10 мес природных испытаний продемонстрировал улучшение пожаробезопасных свойств материала. Во всех трех случаях (табл. 4) наблюдается переход от самозатухающего к трудногорящему классу горючести, так как исчезает остаточное горение и уменьшается длина обугливания материала. Такое поведение материала может быть связано с его структуризацией и влагонасыщением в процессе экспозиции.

Таким образом, углепластик продемонстрировал высокий уровень стойкости к воздействию повышенных температур и их циклическому перепаду, а также тропическому климату и натурным климатическим воздействиям промышленной зоны умеренно холодного климата и приморской зоны умеренно теплого климата.

### Заключение

Исследуемый углепластик характеризуется высокой стойкостью к воздействию воды и влажной среды, в том числе и при повышенных температурах, а также к тропическому климату, что

подтверждается высоким уровнем сохранения его свойств.

Углепластик мало подвержен воздействию теплового старения и циклических перепадов температур и может эксплуатироваться вплоть до 160°C.

Натурные климатические испытания углепластика в зонах умеренно холодного и умеренно теплого климата продемонстрировали его стой-

кость к климатическим воздействиям, что подтверждается высоким уровнем сохранения его прочностных показателей и характеристик пожаробезопасности.

Использованный в работе углепластик может быть рекомендован для производства малонагруженных и неотчетственных элементов и агрегатов воздушных судов: лобовиков крыла, зализов мотогондол, панелей люков, перегородок.

#### 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. Сироткин О.С., Андриянина М.А., Бейдер Э.Я. Новые конструкционные и функциональные ПКМ на основе термопластов и технологии их формования // *Авиационная промышленность*. 2012. №4. С. 43–47.
3. Бейдер Э.Я., Петрова Г.Н., Изотова Т.Ф., Барботько С.Л. Стеклопластики на термопластичной матрице // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2013. №7. Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 28.03.2015).
4. Петрова Г.Н., Бейдер Э.Я., Изотова Т.Ф., Малышенко С.В. Композиционные термопластичные материалы – способы получения и переработки // *Все материалы. Энциклопедический справочник*. 2013. №10. С. 10–17.
5. Бейдер Э.Я., Малышенко С.В., Петрова Г.Н. Композиционные термопластичные материалы – свойства и способы переработки // *Пластические массы*. 2013. №7. С. 56–60.
6. Бейдер Э.Я., Петрова Г.Н., Изотова Т.Ф., Гурева Е.В. Композиционные термопластичные материалы и пенополиимиды // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2013. №11. Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 28.03.2015).
7. Каблов Е.Н. Химия в авиационном материаловедении // *Российский химический журнал*. 2010. Т. LIV. №1. С. 3–4.
8. Гуляев Г.М., Чурсова Л.В., Комарова О.А., Гуляева А.Г. Конструкционные углепластики, модифицированные наночастицами // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №3. С. 277–286.
9. Каблов Е.Н. Авиакосмическое материаловедение // *Все материалы. Энциклопедический справочник*. 2008. №3. С. 2–14.
10. Гуляев И.Н., Власенко Ф.С., Зеленина И.В., Раскутин А.Е. Направления развития термостойких углепластиков на основе полиимидных и гетероциклических полимеров // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2014. №1. Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 28.03.2015). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-1-4-4.
11. Михайлин Ю.А. Конструкционные полимерные композиционные материалы. СПб.: НОТ. 2008. 820 с.
12. Кербер М.Л., Виноградов В.М. Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология. СПб.: Профессия, 2009. 560 с.
13. Ноздрина Л.В., Короткова В.И., Бейдер Э.Я. Применение композиционных материалов с термопластичной матрицей // *Конструкции из композиционных материалов*. 1991. №1. С. 18–24.
14. Устинов В.А., Бейдер Э.Я. Применение композиционных материалов с термопластичной матрицей // *Конструкции из композиционных материалов*. 1991. №1. С. 25–32.
15. Petrova G.N., Beider E.Ya. Construction materials based on reinforced thermoplastics // *Russian Journal of General Chemistry*. 2011. V. 81. №5. P. 1001–1007.
16. 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.
17. Каблов Е.Н., Старцев О.В., Кротов А.С., Кириллов В.Н. Климатическое старение композиционных материалов авиационного назначения. II. Релаксация исходной структурной неравновесности и градиент свойств по толщине // *Деформация и разрушение материалов*. 2012. №6. С. 17–19.
18. 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.
19. Chen-chi M.M., Chang-lun L., Min-jong C., Wyanhwa T. Effect of physical aging on the toughness of carbon fiber-reinforced poly(ether ether ketone) and poly(phenylene sulfide) composite // *Polymer composite*. 1992. V. 13. №6. P. 441–447.
20. Chen-chi M.M., Chang-lun L., Min-jong C., Wyanhwa T. Hydrothermal behavior of carbon fiber-reinforced poly(ether ether ketone) and poly(phenylene sulfide) composite // *Polymer composite*. 1992. V. 13. №6. P. 448–453.
21. Batista N.L., Faria M.C.M., Jha K., Olivera P.C., Bothelho E.C. Influence of water immersion and ultraviolet weathering on mechanical properties of polyphenylene sulfide-carbon fiber composites // *Journal of thermoplastic composite materials*. 2013. №1. P. 1–17.
22. Choqueuse D., Davies P., Mareas F., Baireur R. Aging of Composites in water: comparison of five materials in term of absorption kinetics and revolution of mechani-

- cal properties // *Polymeric composites*. 1997. V. 2. P. 73–96.
23. Ishak Z.A., Berry J.P. Hygrothermal aging studies of short carbon fiber reinforced nylon 6.6 // *Journal of applied polymer science*. 1994. V. 51. №13. P. 2144–2155.
24. Amore A.D., Cocchini K., Pompo A., Apicella A., Nicolais L. The effect of physical aging on long-term properties of poly ether-ketone (PEEK) and PEEK based composites // *Journal of applied polymer science*. 1990. V. 39. P. 1163–1174.
25. Dao D., Hodgkin J., Krstina J., Mardel J., Tian W. Accelerated aging versus realistic aging aerospace composites. II Chemistry of thermal aging // *Journal of applied polymer science*. 2006. V. 102. P. 3221–3232.
26. Михайлин Ю.А. Термоустойчивые полимеры и полимерные материалы. СПб.: Профессия, 2006. 624 с.
27. Bullions T.A., McGrath J.E., Loos A.C. Thermal-oxidative aging effects on the properties of a carbon fiber-reinforced phenylethynyl-terminated poly (etherimide) // *Composites Science and Technology*. 2003. №63. P. 1737–1748.
28. Schambron T., Lowe A., McGregor H.V. Effects of environmental ageing on the static and cyclic bending properties of braided carbon fiber/PEEK bone plates // *Composites: Part B*. 2008. №39. P. 1216–1220.
29. Нестерова Т.А., Барботько С.Л., Николаева М.Ф., Гертер Ю.А. Многослойный защитно-декоративный материал для декорирования деталей в салонах самолетов и вертолетов // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2013. №8. Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 28.03.2015).
30. Скрылев Н.С., Вольный О.С., Постнов В.И., Барботько С.Л. Исследование влияния тепловых факторов климата на изменение характеристик пожаробезопасности полимерных композиционных материалов // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2013. №9. Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 28.03.2015).
31. 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. Т. 1. №1. С. 37–41.
32. Барботько С.Л., Вольный О.С., Кириенко О.А., Луценко А.Н., Шуркова Е.Н. Сопоставление методов оценки пожарной опасности полимерных материалов в различных отраслях транспорта и промышленности // *Все материалы. Энциклопедический справочник*. 2015. №1. С. 2–9, №2. С. 2–9.