

УДК 678.747.2

К.С. Мишуров¹, Н.Г. Файзрахманов¹, Н.В. Иванов¹**ВЛИЯНИЕ ВНЕШНЕЙ СРЕДЫ НА СВОЙСТВА
УГЛЕПЛАСТИКА ВКУ-29**

DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-8-8-8

Исследовано влияние климатических факторов и эксплуатационных жидкостей на свойства углепластика ВКУ-29 на основе армирующей углеродной ткани и эпоксидного связующего ВСЭ-1212, изготовленного методом автоклавного формования. Показано, что углепластик ВКУ-29 имеет высокий уровень сохранения свойств (не менее 72% от исходного значения) при воздействии факторов внешней среды (тепловое и термовлажностное старение; стойкость к условиям в камере солевого тумана, воде, влаге, топливу, маслу, противообледенительной жидкости и растворителю) и отвечают авиационным требованиям по коррозионной безопасности и горючести.

Ключевые слова: углепластик, углеродные волокна, автоклавное формование, полимерные композиты.

The influence of climatic factors and fluids on the properties of CFRP VKU-29, on the basis of reinforcing carbon fabric and epoxy binder VSE-1212, manufactured by autoclave molding is investigated. It is shown that the CFRP VKU-29 has a high level of property preservation (not less than 72% of the initial value) when exposed to environmental factors (thermal and hydrothermal aging, resistance to the salt spray chamber, water, moisture, fuel, oil, anti-icing fluid and solvent) and replies by the aviation safety requirements for corrosion and flammability.

Keywords: CFRP, carbon fiber, autoclave molding, polymer composites.

¹Федеральное 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

Развитие авиационной техники невозможно без совершенствования и внедрения новых материалов и технологий их производства. Полимерные композиционные материалы (ПКМ) прочно завоевали место среди конструкционных материалов в авиационной промышленности [1]. Их применение взамен металлических сплавов обеспечивает снижение массы конструкций, повышение ресурса эксплуатации, снижение трудоемкости изготовления и материалоемкости. Снижение массы авиационных конструкций благодаря применению новых материалов дает возможность снизить потребление топлива, увеличить полезную нагрузку (количество пассажиров и полезного груза) [2–5].

Зарубежные фирмы, такие как Airbus и Boeing, проводят исследования с целью увеличения объема применения углепластиков до 60% массы конструкции летательных аппаратов. В настоящее время фирма Airbus является лидером по объему применения ПКМ. В конструкции самолета A350 композиты занимают ~53% массы планера. Российские авиастроители также стремятся увеличить объемы применения углепластиков в элементах конструкции новых изделий: ПАО «Компания «Сухой» – в самолете SSJ NG, ПАО Корпорация «Иркут» – в самолете MC-21. Решение этой задачи вполне реально с учетом высоких механических свойств углепластиков и современного уровня развития технологий [6, 7].

При эксплуатации и хранении, изделия из ПКМ подвергаются воздействию температуры и влажности окружающего воздуха. В зависимости от конкретного применения, изделия из ПКМ подвергаются либо длительному и непрерывному воздействию температуры и влажности окружающего воздуха, либо кратковременным воздействиям этих факторов. Значения температуры и влажности зависят от климатической зоны и ряда других факторов, непосредственно связанных с назначением изделия, и, следовательно, с условиями эксплуатации. О стойкости ПКМ к совместному или последовательному воздействию температуры и влажности можно судить по изменению их эксплуатационных свойств. Испытания на стойкость полимерных материалов или изделий из них к действию температуры и влаги, которое может быть весьма разнообразным как по интенсивности, так и по продолжительности, проводятся в специальных автоматических тепловлажностных камерах [8–14].

Целью данной работы является исследование стабильности свойств углепластика, полученного методом автоклавного формования, при воздействии факторов внешней среды (температуры и повышенной влажности) и эксплуатационных жидкостей (топливо, масло, противообледенительная жидкость, растворители).

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 13.2. «Полимерные композиционные материалы» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [15].

Материалы и методы

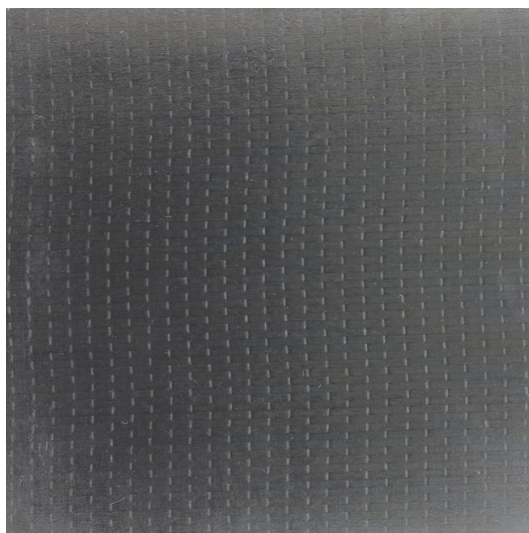
Объектом исследования является изготовленный методом автоклавного формования конструкционный углепластик ВКУ-29 на основе равнопрочной углеродной ткани Porcher (арт. 4510) с поверхностной плотностью 200 ± 10 г/м² и связующего марки ВСЭ-1212. Физико-механические характеристики углепластика ВКУ-29 представлены в табл. 1.

Таблица 1

Свойства конструкционного углепластика ВКУ-29, изготовленного методом автоклавного формования

Свойства	Значения свойств
Предел прочности, МПа:	
при растяжении	1900
при сжатии	990
при межслойном сдвиге	80
при сдвиге по методу Иосипеску	93
при изгибе	1190
Модуль упругости, ГПа:	
при растяжении	123
при сжатии	110
при сдвиге по методу Иосипеску	3,5
при изгибе	110

Углепластик марки ВКУ-29 (см. рисунок) рекомендуется для изготовления конструкций гражданской авиационной техники, в том числе деталей силовых конструкций планера: крыла, центроплана, элементов механизации, звукопоглощающих конструкций двигателя. Углепластик марки ВКУ-29 может эксплуатироваться в диапазоне температур от -60 до +120°C с кратковременным забросом температуры до 150°C. Уровень сохранения свойств углепластика ВКУ-29 при максимальной рабочей температуре 120°C составляет: 89% – по пределу прочности при растяжении, 82% – по пределу прочности при сжатии, 71% – по пределу прочности при изгибе.



Углепластик ВКУ-29

Исследование влияния внешней среды (температуры и влажности) и эксплуатационных жидкостей на свойства углепластика ВКУ-29 проводили в указанных далее условиях.

Тепловое старение проводили в воздушном термостате при температуре 120°C. Максимальное отклонение температуры от заданной для термостата не превышало $\pm 0,5^\circ\text{C}$.

Ускоренное тепловлажностное старение углепластика исследовали в соответствии с ГОСТ 9.707–81 при температуре 60°C и относительной влажности 85%. Испытания проводили в камере тепловлажностного старения Climats (Франция) с автоматическим поддержанием заданного режима испытаний; погрешность поддержания температуры составляла $\pm 2^\circ\text{C}$, погрешность влажности: $\pm 3\%$. После экспозиции в камере определяли пределы прочности углепластика при изгибе и сдвиге.

Влагостойкость образцов из углепластика исследовали после выдержки в течение 90 сут при комнатной температуре и влажности 98%. Определяли изменение пределов прочности углепластика при изгибе и сдвиге и привес образца в результате поглощения влаги в соответствии с ГОСТ 4650–80.

Водостойкость образцов из углепластика исследовали после выдержки в течение 90 сут при комнатной температуре в воде. Определяли изменение пределов прочности углепластика при изгибе и сдвиге и привес образца в результате поглощения воды в соответствии с ГОСТ 4650–80.

Топливостойкость образцов из углепластика исследовали после выдержки в течение 90 сут при комнатной температуре в топливе ТС-1. Определяли изменение пределов прочности при изгибе и сдвиге и привес образца в результате сорбции топлива, испытания проводили в соответствии с ГОСТ 12020–72.

Маслостойкость образцов из углепластика исследовали после выдержки в течение 90 сут при комнатной температуре в масле ИПМ-10 и МС-8П. Определяли изменение пределов прочности при изгибе и сдвиге и привес образца в результате сорбции, испытания проводили в соответствии с ГОСТ 12020–72.

Стойкость к противообледенительной жидкости образцов из углепластика исследовали после выдержки в течение 90 сут при комнатной температуре в противообледенительной жидкости Арктика ДГ. Определяли изменение пределов прочности при изгибе и сдвиге и привес образца в результате сорбции, испытания проводили в соответствии с ГОСТ 12020–72.

Стойкость к растворителям образцов из углепластика исследовали после выдержки в течение 90 сут при комнатной температуре в денатурированном спирте и нефрасе. Определяли изменение пределов прочности при изгибе и сдвиге и привес образца в результате сорбции, испытания проводили в соответствии с ГОСТ 12020–72.

Механические испытания образцов из углепластика проводили на испытательной машине Zwick/Roel Z400 в соответствии с ASTM D 7264/D 7264M (предел прочности при изгибе) и ASTM D 2344/D 2344M (предел прочности при сдвиге).

Результаты

В табл. 2 представлены результаты испытаний углепластика ВКУ-29 после экспозиции в камере тепловлажностного старения при температуре 60°C и относительной влажности 85%. Установлено, что после экспозиции в этих условиях в течение 90 сут уровень сохранения прочности углепластика ВКУ-29 при изгибе составляет 91% при 20°C и 77% – при 120°C, а при сдвиге – соответственно 95 и 89% в сравнении с исходными значениями при указанных температурах.

Таблица 2

Свойства углепластика ВКУ-29 после экспозиции в камере тепловлажностного старения при температуре 60°C и относительной влажности 85%

Свойства	Температура испытания, °C	Контрольный показатель (исходное значение)	Фактическое значение после экспозиции
Предел прочности при изгибе, МПа	20	1190	1080
	120	840	650
Предел прочности при межслойном сдвиге τ_{xz} , МПа	20	80	76
	120	53	47

Результаты испытаний углепластика ВКУ-29 после теплового старения при 120°C представлены в табл. 3. Установлено, что после теплового старения в течение 2000 ч уровень сохранения прочности углепластика ВКУ-29 при изгибе составляет 96% при 20°C и 96% – при 120°C, а при сдвиге – соответственно 99 и 98% в сравнении с исходными значениями при указанных температурах.

Таблица 3

Свойства углепластика ВКУ-29 после теплового старения при максимальной рабочей температуре 120°C

Свойства	Температура испытания, °C	Контрольный показатель (исходное значение)	Фактическое значение после экспозиции
Предел прочности при изгибе, МПа	20	1190	1140
	120	840	810
Предел прочности при межслойном сдвиге τ_{xz} , МПа	20	80	79
	120	53	52

В табл. 4 представлены результаты исследования водостойкости углепластика ВКУ-29. После выдержки в течение 90 сут образцов из углепластика с незащищенными торцами в воде уровень сохранения прочности углепластика ВКУ-29 при изгибе составляет 87% при 20°C и 76% – при 120°C, а при сдвиге – соответственно 100 и 77% в сравнении с исходными значениями при указанных температурах. Количество поглощенной углепластиком влаги не превышает 0,6% от исходной массы образца.

Таблица 4

Водостойкость образцов из углепластика ВКУ-29

Свойства	Температура испытания, °С	Контрольный показатель (исходное значение)	Фактическое значение после экспозиции
Предел прочности при изгибе, МПа	20	1190	1030
	120	840	640
Предел прочности при межслойном сдвиге τ_{xz} , МПа	20	80	81
	120	53	41

В табл. 5 представлены результаты исследования влагостойкости углепластика ВКУ-29. После выдержки в течение 90 сут образцов из углепластика с незащищенными торцами в среде с повышенной влажностью (98%) уровень сохранения прочности углепластика ВКУ-29 при изгибе составляет 91% при 20°C и 75% – при 120°C, а при сдвиге – соответственно 98 и 72% в сравнении с исходными значениями при указанных температурах. Количество поглощенной углепластиком влаги не превышает 0,5% от исходной массы образца.

Таблица 5

Влагостойкость образцов из углепластика ВКУ-29

Свойства	Температура испытания, °С	Контрольный показатель (исходное значение)	Фактическое значение после экспозиции
Предел прочности при изгибе, МПа	20	1190	1080
	120	840	630
Предел прочности при межслойном сдвиге τ_{xz} , МПа	20	80	78
	120	53	38

В табл. 6 представлены результаты исследования топливостойкости углепластика ВКУ-29. После выдержки в течение 90 сут образцов из углепластика с незащищенными торцами в топливе ТС-1 уровень сохранения прочности углепластика ВКУ-29 при изгибе составляет 93% при 20°C и 75% – при 120°C, а при сдвиге – соответственно 100 и 89% в сравнении с исходными значениями при указанных температурах. Привес образцов из углепластика при выдержке их в эксплуатационных жидкостях не превышает 0,2% от исходной массы образцов.

Таблица 6

Топливостойкость образцов из углепластика ВКУ-29

Свойства	Температура испытания, °С	Контрольный показатель (исходное значение)	Фактическое значение после экспозиции
Предел прочности при изгибе, МПа	20	1190	1110
	120	840	630
Предел прочности при межслойном сдвиге τ_{xz} , МПа	20	80	83
	120	53	47

В табл. 7 представлены результаты исследования маслостойкости углепластика ВКУ-29. После выдержки в течение 90 сут образцов из углепластика с незащищенными торцами в масле ИПМ-10 уровень сохранения прочности углепластика ВКУ-29 при изгибе составляет 94% при 20°C и 82% – при 120°C, а при сдвиге – соответственно 98 и 87% в сравнении с исходными значениями при указанных температурах. Привес образцов из углепластика при выдержке их в эксплуатационных жидкостях не превышает

0,1% от исходной массы образцов. После выдержки в течение 90 сут образцов из углепластика с незащищенными торцами в масле МС-8П уровень сохранения прочности углепластика ВКУ-29 при изгибе составляет 94% при 20°C и 80% – при 120°C, а при сдвиге – соответственно 100 и 91% в сравнении с исходными значениями при указанных температурах. Привес образцов из углепластика при выдержке их в эксплуатационных жидкостях не превышает 0,1% от исходной массы образцов.

Таблица 7

Маслостойкость образцов из углепластика ВКУ-29

Свойства	Температура испытания, °C	Контрольный показатель (исходное значение)	Фактическое значение после экспозиции в масле	
			ИПМ-10	МС-8П
Предел прочности при изгибе, МПа	20	1190	1120	1120
	120	840	690	670
Предел прочности при межслойном сдвиге τ_{xz} , МПа	20	80	78	82
	120	53	46	48

В табл. 8 представлены результаты исследования стойкости углепластика ВКУ-29 к противообледенительной жидкости. После выдержки в течение 90 сут образцов из углепластика с незащищенными торцами в противообледенительной жидкости Арктика ДГ уровень сохранения прочности углепластика ВКУ-29 при изгибе составляет 93% при 20°C и 89% – при 120°C, а при сдвиге – соответственно 96 и 83% в сравнении с исходными значениями при указанных температурах. Привес образцов углепластика при выдержке их в эксплуатационных жидкостях не превышает 0,3% от исходной массы образцов.

Таблица 8

Стойкость углепластика ВКУ-29 к противообледенительной жидкости

Свойства	Температура испытания, °C	Контрольный показатель (исходное значение)	Фактическое значение после экспозиции
Предел прочности при изгибе, МПа	20	1190	1110
	120	840	750
Предел прочности при межслойном сдвиге τ_{xz} , МПа	20	80	77
	120	53	44

В табл. 9 представлены результаты исследования стойкости углепластика ВКУ-29 к растворителям. После выдержки в течение 90 сут образцов из углепластика с незащищенными торцами в растворителе (денатурированный спирт) уровень сохранения прочности углепластика ВКУ-29 при изгибе составляет 96% при 20°C и 100% – при 120°C, а при сдвиге – соответственно 94 и 85% в сравнении с исходными значениями при указанных температурах. Привес образцов из углепластика при выдержке их в эксплуатационных жидкостях не превышает 0,3% от исходной массы образцов. После выдержки в течение 90 сут образцов из углепластика с незащищенными торцами в растворителе нефрас уровень сохранения прочности углепластика ВКУ-29 при изгибе составляет 97% при 20°C и 85% – при 120°C, а при сдвиге – соответственно 100 и 92% в сравнении с исходными значениями при указанных температурах. Привес образцов из углепластика при выдержке их в эксплуатационных жидкостях не превышает 0,05% от исходной массы образцов.

Таблица 9

Стойкость углепластика ВКУ-29 к растворителям

Свойства	Температура испытания, °С	Контрольный показатель (исходное значение)	Фактическое значение после экспозиции в растворителе	
			денатурированный спирт	нефрас
Предел прочности при изгибе, МПа	20	1190	1140	1160
	120	840	890	710
Предел прочности при межслойном сдвиге τ_{xz} , МПа	20	80	75	80
	120	53	45	49

Обсуждение и заключения

Проведены исследования по влиянию факторов внешней среды (температуры и влажности) и эксплуатационных жидкостей на стабильность свойств углепластика ВКУ-29, изготовленного методом автоклавного формования. Показано, что уровень сохранения свойств углепластика ВКУ-29 после экспозиции в камере тепловлажностного старения составляет не менее 77%, при воздействии максимальной рабочей температуры 120°C в течение 2000 ч – не менее 96%, при воздействии эксплуатационных жидкостей – не менее 72% (при испытаниях при комнатной и максимальной рабочей температуре 120°C).

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Современные материалы – основа инновационной модернизации России // Металлы Евразии. 2012. №3. С. 10–15.
2. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года // Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 7–17.
3. Гуняев Г.М., Кривонос В.В., Румянцев А.Ф., Железина Г.Ф. Полимерные композиционные материалы в конструкциях летательных аппаратов // Конверсия в машиностроении. 2004. №4 (65). С. 65–69.
4. Каблов Е.Н. Материалы и химические технологии для авиационной техники // Вестник Российской академии наук. 2012. Т. 82. №6. С. 520–530.
5. Хрульков А.В., Душин М.И., Попов Ю.О., Коган Д.И. Исследования и разработка автоклавных и безавтоклавных технологий формования ПКМ // Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 292–301.
6. Гуляев И.Н., Зеленина И.В., Раскутин А.Е. Углепластики на основе углеродных тканей импортного производства и российских растворных связующих // Вопросы материаловедения. 2014. №1 (77). С. 116–125.
7. Платонов А.А., Душин М.И. Конструкционный углепластик ВКУ-25 на основе однонаправленного препрега // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2015. №11. Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 29.04.2017). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-11-6-6.
8. Ефимов В.А., Шведкова А.К., Коренькова Т.Г., Кириллов В.Н. Исследование полимерных конструкционных материалов при воздействии климатических факторов и нагрузок в лабораторных и натурных условиях // Авиационные материалы и технологии. 2013. №S2. С. 68–73.
9. Каблов Е.Н., Старцев О.В., Кротов А.С., Кириллов В.Н. Климатическое старение композиционных материалов авиационного назначения. III. Значимые факторы старения // Деформация и разрушение материалов. 2011. №1. С. 34–40.
10. 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.
11. Кириллов В.Н., Старцев О.В., Ефимов В.А. Климатическая стойкость и повреждаемость полимерных композиционных материалов, проблемы и пути решения // Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 412–423.

-
12. Каблов Е.Н., Старцев О.В., Кротов А.С., Кириллов В.Н. Климатическое старение композиционных материалов авиационного назначения. II. Релаксация исходной структурной неравновесности и градиент свойств по толщине // Деформация и разрушение материалов. 2010. №12. С. 40–46.
 13. Каблов Е.Н., Гращенков Д.В., Ерасов В.С., Анчевский И.Э., Ильин В.В., Вальтер Р.С. Стенд для испытания на климатической станции ГЦКИ крупногабаритных конструкций из ПКМ // Сб. докл. IX Междунар. науч. конф. по гидроавиации «Гидроавиасалон-2012», 2012. С. 122–123.
 14. Каблов Е.Н., Старцев О.В., Медведев И.М., Панин С.В. Коррозионная агрессивность приморской атмосферы. Ч. 1. Факторы влияния (обзор) // Коррозия: материалы, защита. 2013. №12. С. 6–18.
 15. 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. С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.