

Научная статья

УДК 678.747.2

DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-3-91-100

КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА ВОЗДЕЙСТВИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ И КЛИМАТИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ НА ИЗМЕНЕНИЕ ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ КЛЕЕВЫХ ПРЕПРЕГОВ

Часть 1. Углепластик марки ВКУ-59

А.И. Старков¹, А.Ю. Исаев¹, К.Е. Куцевич¹

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

Аннотация. Проведена комплексная оценка сохраняемости прочностных свойств углепластика марки ВКУ-59 при растяжении, сжатии, изгибе, межслойном сдвиге при температурах испытания -60 , $+20$, $+80$ и $+105$ °С в исходном состоянии и после климатических воздействий в камере тропического климата и тепловлажностного старения в течение 1 и 3 мес, а также теплового старения в течение 500 и 1000 ч. Изучено влияние микологической среды и технологических жидкостей на предел прочности углепластика при изгибе и сжатии. Для подтверждения жизнеспособности образцы углепластика ВКУ-59 после 3 мес хранения испытаны на растяжение и сжатие.

Ключевые слова: углепластик, клеевой препрег, клеевые соединения, прочность при растяжении, прочность при сжатии, прочность при изгибе, прочность при межслойном сдвиге, воздействие внешних факторов

Для цитирования: Старков А.И., Исаев А.Ю., Куцевич К.Е. Комплексная оценка воздействия эксплуатационных и климатических испытаний на изменение прочностных свойств полимерных композиционных материалов на основе клеевых препрегов. Часть 1. Углепластик марки ВКУ-59 // Труды ВИАМ. 2024. № 3 (133). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-3-91-100.

Scientific article

COMPREHENSIVE ASSESSMENT OF THE IMPACT OF OPERATIONAL AND CLIMATIC TESTS ON THE CHANGE OF STRENGTH PROPERTIES OF POLYMER COMPOSITE MATERIALS BASED ON ADHESIVE PREPREGS

Part 1. Carbon fiber-reinforced plastic VKU-59

A.I. Starkov¹, A.Yu. Isaev¹, K.E. Kutsevich¹

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

Abstract. A comprehensive assessment of the retention of strength properties of carbon fiber plastic of the VKU-59 brand under tension, compression, bending, interlayer shear at test temperatures of -60 , $+20$, $+80$ and $+105$ °C was carried out in the initial state and after climatic influences in a tropical climate chamber for 1 and 3 months, heat and humidity aging for 1 and 3 months, thermal aging for 500 and 1000 hours. The influence of the mycological environment and process fluids on the tensile strength of carbon fiber reinforced plastic in bending

and compression was studied. To confirm the viability, samples of VKU-59 carbon fiber plastic were tested in tension and compression after 3 months of storage.

Keywords: *carbon fiber-reinforced plastic, adhesive prepreg, adhesive joints, tensile strength, compression strength, flexural strength, interlayer shear strength, influence of external factors*

For citation: Starkov A.I., Isaev A.Yu., Kutsevich K.E. Comprehensive assessment of the impact of operational and climatic tests on the change of strength properties of polymer composite materials based on adhesive prepreps. Part 1. Carbon fiber-reinforced plastic VKU-59. *Trudy VIAM*, 2024, no. 3 (133), paper no. 08. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-3-91-100.

Введение

В условиях импортозамещения, а также для достижения весовой эффективности, обусловленной заменой традиционных металлических материалов на современные, разработчики авиационной техники все чаще обращаются к полимерным композиционным материалам (ПКМ) с заданным уровнем прочностных свойств. При оценке возможности эксплуатации ПКМ в авиационной технике предъявляют высокие требования как к комплексу прочностных свойств, так и к их сохраняемости при эксплуатации.

Существенное влияние на изменение эксплуатационных характеристик ПКМ оказывают климатические факторы (повышенные и пониженные температуры, высокая влажность и др.) и технические жидкости, которые при комплексном воздействии активируют старение, способствуют развитию физико-химических процессов в материалах и при эксплуатации изделий могут существенно снизить их прочностные свойства относительно исходных значений [1–3]. Особенно актуальна проблема сохраняемости свойств ПКМ при эксплуатации техники в районах с жесткими климатическими условиями, такими как тропический климат.

Проведение ускоренных климатических испытаний позволяет разработчику летной техники в полной мере оценить стойкость применяемых материалов к воздействию факторов окружающей среды в процессе эксплуатации и таким образом определить запас прочности и ресурсность изготовленных из них изделий [4–6].

Цель исследований – установление сохраняемости прочностных свойств углепластика марки ВКУ-59 на основе клеевого препрега марки КМКУ при растяжении, сжатии, изгибе, межслойном сдвиге при температурах испытания –60, +20, +80 и +105 °С в исходном состоянии и после климатических воздействий, таких как экспозиция в камере тропического климата и тепловлажностное старение в течение 1 и 3 мес, тепловое старение в течение 500 и 1000 ч, а также воздействия микологической среды и технических жидкостей (вода, влага, масло ИПМ-10 и топливо ТС-1) [7, 8]

По результатам испытаний на углепластик ВКУ-59 оформлен паспорт № 1994. Организован серийный выпуск разработанного углепластика на сертифицированном производстве в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ в рамках реализации комплексного научного направления 13. «Полимерные композиционные материалы» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [1, 2].

Материалы и методы

Объектом исследования является углепластик марки ВКУ-59 на основе клеевого препрега (ТУ 1-595-11-1775–2018), разработанный в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

Препрег представляет собой углеродный жгутовый наполнитель, пропитанный эпоксидным клеевым связующим пониженной горючести марки ВСК-14-6 с теплоустойчивостью 80 °С. Углепластик марки ВКУ-59 является аналогом углепластика марки HexPly M56/40%/193PW/AS4-3K фирмы Hexcel (США) [9–11].

Свойства углепластика марки ВКУ-59 на основе клеевого препрега исследовали на образцах, изготовленных методом автоклавного формования [7–9]. Для оценки изменения свойств после воздействия климатических факторов исследована прочность образцов углепластика с незащищенными торцами при изгибе и сжатии [12–22].

Прочность и модуль упругости при растяжении определяли в соответствии с ГОСТ Р 56785–2015. Метод испытания заключается в растяжении образца ПКМ с постоянной скоростью нагружения или деформирования до разрыва.

Испытания при сжатии проводили согласно ГОСТ 33519–2015. Образец ПКМ в виде полосы прямоугольного сечения устанавливали в специализированную оснастку, которую помещали между захватами испытательной машины, и прикладывали сжимающую нагрузку.

Прочность и модуль упругости при статическом изгибе определяли в соответствии с ГОСТ 56810–2015. Сущность метода заключается в изгибе плоского образца ПКМ прямоугольного сечения, свободно лежащего на двух опорах, с постоянной скоростью нагружения до разрушения или до момента, когда деформация растяжения на внешней поверхности достигнет предварительно заданного значения.

Испытания прочности при межслойном сдвиге проводили согласно ГОСТ Р 32659–2014. К середине образца ПКМ, свободно лежащего на двух опорах, прикладывали нагрузку до момента разрушения, вызванного межслойным сдвигом.

Тепловлажностное старение проводили в соответствии с ГОСТ Р 56762–2015 (метод В). Образцы кондиционировали при влажности, отличной от влажности окружающей среды, при заранее указанном постоянстве условий до начала других типов испытаний.

Тепловое старение проводили согласно ГОСТ 9.707–81. Сущность метода заключается в проведении ускоренных испытаний материалов, деталей и узлов на стойкость к старению при воздействии температуры и влажности, установлении изменения прочностных свойств при старении.

Грибостойкость исследовали согласно ГОСТ 9.049–91. Материалы, зараженные спорами грибов, выдерживали в условиях, оптимальных для их развития.

Стойкость к воздействию химических сред определяли в соответствии с ГОСТ 12020–2018. Сущность метода заключается в определении изменений характеристик образцов ПКМ в ненапряженном состоянии после выдержки в жидких химических средах.

Результаты и обсуждение

Испытания образцов углепластика при различном воздействии всесторонне характеризуют материал и отражают работу матрицы и наполнителя при нагрузках на растяжение и сжатие, а также их совместную работу при нагрузках на изгиб и межслойный сдвиг.

Для определения эксплуатационной стойкости образцы углепластика ВКУ-59 исследованы в исходном состоянии, при прогнозируемой рабочей температуре и температуре, превышающей температуру эксплуатации на 25 °С (табл. 1). Это позволяет выявить запас прочности материала.

Таблица 1

Механические свойства образцов углепластика марки ВКУ-59 при растяжении, сжатии, изгибе и межслойном сдвиге в диапазоне температур от –60 до +105 °С

| Свойства | Схема армирования | Средние значения свойств при температуре испытания, °С | | | |
|---|------------------------------|--|------|------|------|
| | | –60 | 20 | 80 | 105 |
| Предел прочности при растяжении, МПа | [0] ₈ | 2536 | 2510 | 2327 | 2146 |
| | [0/–45/90/+45] _{4s} | 882 | 778 | 720 | 690 |
| Модуль упругости при растяжении, ГПа | [0] ₈ | 117 | 119 | 112 | 108 |
| | [0/–45/90/+45] _{4s} | 45,0 | 38,3 | 34,9 | 33,6 |
| Предел прочности при сжатии, МПа | [0] ₈ | 1060 | 1027 | 825 | 443 |
| | [0/–45/90/+45] _{4s} | 461 | 427 | 339 | 248 |
| Модуль упругости при сжатии, ГПа | [0] ₈ | 114 | 127 | 115 | 84 |
| | [0/–45/90/+45] _{4s} | 43,2 | 44,4 | 41,2 | 37,0 |
| Предел прочности при поперечном изгибе, МПа | [0] ₈ | 2045 | 1824 | 1180 | 692 |
| | [0/–45/90/+45] _{4s} | – | 884 | 614 | – |
| Модуль упругости при поперечном изгибе, ГПа | [0] ₈ | 93 | 120 | 101 | 70 |
| | [0/–45/90/+45] _{4s} | – | 43,4 | 37,4 | – |
| Предел прочности при межслойном сдвиге, МПа | [0] ₈ | 105 | 80 | 55 | 31 |

По результатам анализа полученных данных (табл. 2) можно констатировать, что уровень упруго-прочностных свойств относительно значений при температуре 20 °С для углепластиков со схемами армирования [0]₈ и [0/–45/90/+45]_{4s} в зависимости от вида испытания при температуре 80 °С составляет 64,7–92,7 и 69,5–92,5 %; при –60 °С: 101,0–131,3 и 107,9–113,4 %; при 105 °С: 37,9–85,5 и 58,1–88,7 % соответственно. Данные, полученные при температуре испытания 105 °С, превышающей температуру эксплуатации на 25 °С, подтверждают запас прочности углепластика марки ВКУ-59.

Таблица 2

Уровень механических свойств образцов углепластика марки ВКУ-59 в диапазоне температур от –60 до +105 °С относительно значений, полученных при температуре испытания 20 °С (средние значения)

| Предел прочности | Схема армирования | Уровень предела прочности при температуре испытания, °С, относительно значений при 20 °С, % | | |
|-----------------------|------------------------------|---|------|------|
| | | –60 | 80 | 105 |
| При растяжении | [0] ₈ | 101,0 | 92,7 | 85,5 |
| | [0/–45/90/+45] _{4s} | 113,4 | 92,5 | 88,7 |
| При сжатии | [0] ₈ | 103,2 | 80,3 | 43,1 |
| | [0/–45/90/+45] _{4s} | 107,9 | 79,4 | 58,1 |
| При поперечном изгибе | [0] ₈ | 112,1 | 64,7 | 37,9 |
| | [0/–45/90/+45] _{4s} | – | 69,5 | – |
| При межслойном сдвиге | [0] ₈ | 131,3 | 68,8 | 38,8 |

Результаты испытаний углепластика марки ВКУ-59 после экспозиции в камере тропического климата и тепловлажностного старения в течение 1 и 3 мес, теплового старения в течение 500 и 1000 ч, а также воздействия микологической среды и технических жидкостей (вода, влага, масло ИПМ-10 и топливо ТС-1) в исходном состоянии и при повышенной температуре приведены на рис. 1.

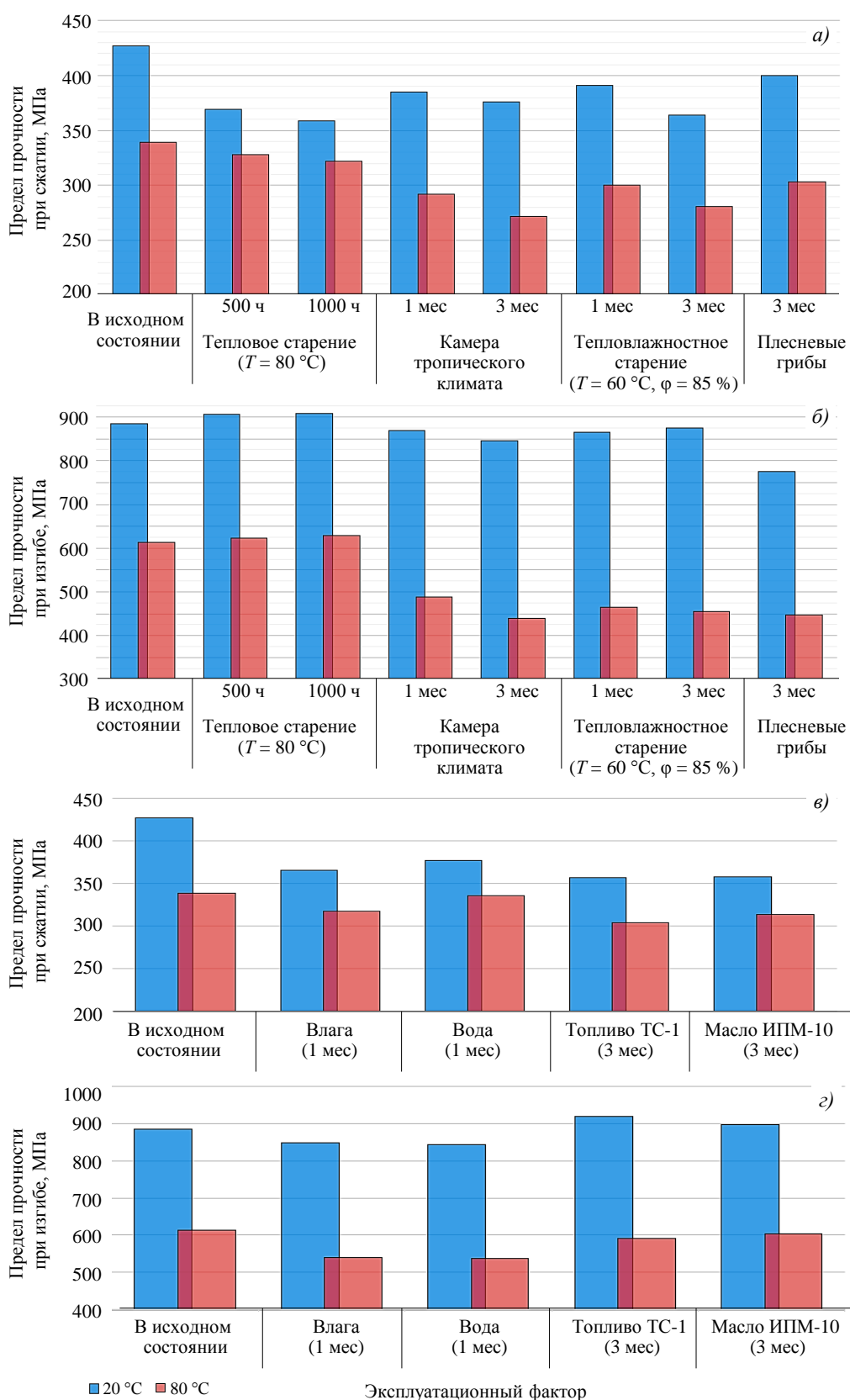


Рис. 1. Изменение свойств образцов углепластика с незащищенными торцами марки ВКУ-59 со схемой армирования $[0/-45/90/+45]_{4s}$ при сжатии (а, в) и изгибе (б, г) после воздействия климатических факторов (а, б) и экспозиции в технических жидкостях (в, г)

Как видно из данных, представленных в табл. 3, углепластик марки ВКУ-59 со схемой армирования $[0/-45/90/+45]_{4s}$ после воздействия внешних факторов демонстрирует высокий уровень сохранения упруго-прочностных свойств при изгибе и сжатии. Уровень сохранения свойств относительно исходных значений при сжатии при температуре испытаний 20 °С находится в интервале от 83,6 до 93,7 %, при 80 °С – от 80,2 до 99,1 %; при изгибе при 20 °С – от 87,8 до 103,8 %, при 80 °С – от 71,5 до 102,3 %. Высокий уровень сохранения упруго-прочностных свойств, в том числе при повышенной температуре, свидетельствует о стойкости углепластика марки ВКУ-59 к воздействию факторов внешней среды и технических жидкостей, таких как вода, влага, топливо ТС-1 и масло ИПМ-10.

Таблица 3

Уровень механических свойств образцов углепластика марки ВКУ-59 со схемой армирования $[0/-45/90/+45]_{4s}$ после воздействия климатических факторов и технических жидкостей относительно значений для образцов в исходном состоянии (средние значения)

| Предел прочности | Фактор воздействия | Время воздействия | Уровень предела прочности при температуре испытания, °С, относительно значений для образцов в исходном состоянии, % | |
|------------------------|--|-------------------|---|-------|
| | | | 20 | 80 |
| При сжатии | Тепловое старение ($T = 80\text{ °C}$) | 500 ч | 86,4 | 96,7 |
| | | 1000 ч | 84,1 | 95,0 |
| | Камера тропического климата | 1 мес | 90,2 | 86,1 |
| | | 3 мес | 88,0 | 80,2 |
| | Тепловлажностное старение ($T = 60\text{ °C}$, $\varphi = 85\%$) | 1 мес | 91,6 | 88,5 |
| | | 3 мес | 85,2 | 82,9 |
| | Плесневые грибы | 3 мес | 93,7 | 89,4 |
| | Вода | 1 мес | 88,3 | 99,1 |
| | Влага ($T = 20 \pm 2\text{ °C}$, $\varphi = 98\%$) | 1 мес | 85,7 | 93,8 |
| | Топливо ТС-1 | 3 мес | 83,6 | 89,7 |
| Масло ИПМ-10 | 3 мес | 83,8 | 92,6 | |
| При попереочном изгибе | Тепловое старение ($T = 80\text{ °C}$) | 500 ч | 102,5 | 101,3 |
| | | 1000 ч | 102,7 | 102,3 |
| | Камера тропического климата | 1 мес | 98,2 | 79,6 |
| | | 3 мес | 95,7 | 71,5 |
| | Тепловлажностное старение ($T = 60\text{ °C}$, $\varphi = 85\%$) | 1 мес | 97,7 | 75,7 |
| | | 3 мес | 98,9 | 74,3 |
| | Плесневые грибы | 3 мес | 87,8 | 73,0 |
| | Вода | 1 мес | 95,5 | 87,6 |
| | Влага ($T = 20 \pm 2\text{ °C}$, $\varphi = 98\%$) | 1 мес | 95,9 | 87,9 |
| | Топливо ТС-1 | 3 мес | 103,8 | 96,1 |
| Масло ИПМ-10 | 3 мес | 101,6 | 98,4 | |

Определена жизнеспособность клеевого препрега углепластика марки ВКУ-59 после 3 мес хранения при температуре от 8 до 25 °С (рис. 2). Образцы для проведения испытаний на растяжение и сжатие изготовлены методом автоклавного формования.

Показано, что уровень предела прочности при растяжении и сжатии для углепластика, изготовленного из препрега после хранения, составил 94,1–95,9 % от исходных значений. Таким образом, можно заключить, что жизнеспособность клеевого препрега углепластика ВКУ-59 составляет не менее 3 мес при температуре от 8 до 25 °С. Важно отметить, что жизнеспособность зарубежного аналога – препрега марки

HexPly M56/40%/193PW/AS4-3K фирмы Hexcel (США) – составляет 1 мес, данные о свойствах препрега после 3 мес хранения в открытых источниках отсутствуют [25, 26]. Можно предположить, что уровень сохранения свойств углепластика марки ВКУ-59 через 1 мес составит >96 % от исходного значения.

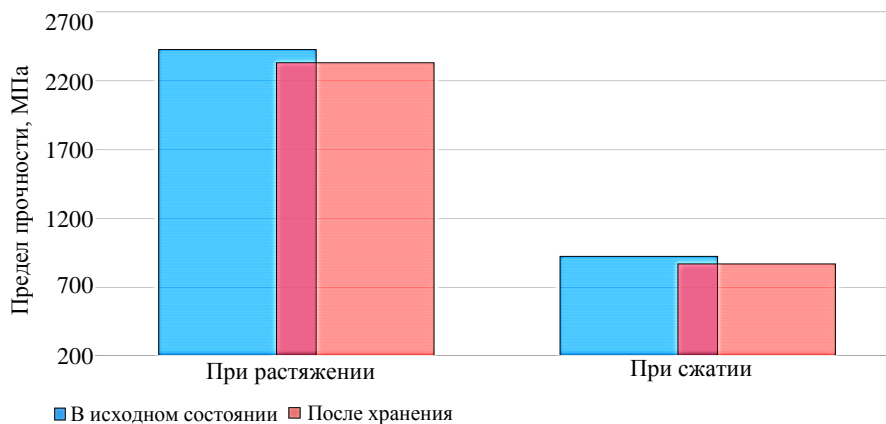


Рис. 2. Предел прочности при растяжении и сжатии при температуре 20 °С для углепластика марки ВКУ-59, изготовленного из клеевого препрега в исходном состоянии и после хранения в течение 3 мес при температуре от 8 до 25 °С

Заключения

Испытания углепластика марки ВКУ-59 на основе клеевого препрега показали высокую сохраняемость прочностных свойств при температурах испытаний –60, +80 и +105 °С.

Продемонстрирован высокий уровень сохранения упруго-прочностных свойств углепластика при сжатии и изгибе при температурах испытаний 20 и 80 °С после воздействия факторов внешней среды и технических жидкостей, таких как вода, влага, топливо ТС-1 и масло ИПМ-10.

Клеевое эпоксидное связующее марки ВСК-14-6 образует при отверждении полимерную матрицу с высоким уровнем прочностных свойств и пониженной горючестью. Низкая температура отверждения связующего (за счет наличия латентного отвердителя аминного типа с катализаторами отверждения) сочетается с высокой жизнеспособностью препрега. Это обеспечивает препрегам, в составе которых используется углеродный наполнитель и данное связующее, срок хранения при температуре от 0 до 8 °С не менее 6 мес.

Подтверждена жизнеспособность клеевого препрега углепластика ВКУ-59 после 3 мес хранения при температуре от 8 до 25 °С. Показано сохранение предела прочности при растяжении и сжатии на уровне 94,1–95,9 % от исходных значений.

Разработанный материал может эксплуатироваться в интервале температур от –60 до +80 °С и позволяет реализовать комплекс физико-механических характеристик с высоким уровнем сохранения прочностных свойств, в том числе после воздействия внешних факторов, имитирующих эксплуатационные.

Список источников

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. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.

2. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения и цифровые технологии их переработки // Вестник Российской академии наук. 2020. Т. 90. № 4. С. 331–334.
3. Авиационные материалы: справочник в 13 т. / под ред. Е.Н. Каблова. 7-е изд., перераб. и доп. М.: ВИАМ, 2019. Т. 10: Клеи, герметики, резины, гидрожидкости, ч. 1: Клеи, клеевые препреги. 276 с.
4. 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.
5. Сатдинов Р.А., Вешкин Е.А., Постнов В.И. Оценка воздействия климатических факторов на эксплуатационные свойства стеклопластика марки ВПС-42П/Т-64 // Труды ВИАМ. 2020. № 10 (92). Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 20.10.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-10-21-29.
6. Гуляев И.Н., Зеленина И.В., Валева Е.О., Хасков М.А. Влияние климатического старения на свойства высокотемпературных углепластиков // Труды ВИАМ. 2021. № 2 (96). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 20.08.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-2-39-51.
7. Борщев А.В., Гусев Ю.А. Полимерные композиционные материалы в автомобильной промышленности // Авиационные материалы и технологии. 2014. № S2. С. 34–38. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-s2-34-38.
8. Дементьева Л.А., Сереженков А.А., Лукина Н.Ф., Куцевич К.Е. Клеевые препреги и слоистые материалы на их основе // Авиационные материалы и технологии. 2013. № 2. С. 19–21.
9. Мишкин С.И. Применение углепластиков в конструкциях беспилотных аппаратов (обзор) // Труды ВИАМ. 2022. № 5 (111). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 20.10.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-5-87-95.
10. Мишкин С.И., Жакова Л.С., Клименко О.Н., Васильчук Е.А. Исследование влияния содержания связующего в углепластиках на их механические свойства // Труды ВИАМ. 2023. № 2 (120). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 20.10.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-2-77-86.
11. Малаховский С.С., Панафидникова А.Н., Костромина Н.В., Осипчик В.С. Углепластики в современном мире: их свойства и применения // Успехи в химии и химической технологии. ТОМ XXXIII. 2019. № 6. С. 62–64.
12. Гуляев А.И., Медведев П.Н., Сбитнева С.В., Петров А.А. Экспериментальное исследование по оценке адгезионной прочности «волокно–матрица» в углепластиках на основе эпоксидного связующего, модифицированного полисульфоном // Авиационные материалы и технологии. 2019. № 4 (57). С. 80–86. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-4-80-86.
13. Вешкин Е.А., Старцев В.О., Постнов В.И., Баранников А.А. Климатические воздействия как оценка ремонтпригодности изделий из углепластика // Труды ВИАМ. 2019. № 8 (80). Ст. 11. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 20.10.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-8-98-108.
14. Старков А.И., Куцевич К.Е., Петрова А.П., Антюфеева Н.В. К вопросу о выборе температурно-временного режима отверждения препрега углепластика КМКУ-6.80.СУТ49(S) на основе клевого связующего пониженной горючести // Труды ВИАМ. 2023. № 3 (121). Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 20.10.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-3-29-38.
15. Дементьева Л.А., Лукина Н.Ф., Сереженков А.А., Куцевич К.Е. Основные свойства и назначение ПКМ на основе клеевых препрегов // Тез. докл. XIX Междунар. науч.-техн. конф. «Конструкции и технология получения изделий из неметаллических материалов». Обнинск: ОНПП «Технология», 2010. С. 11–12.
16. Петрова А.П., Малышева Г.В. Клеи, клеевые связующие и клеевые препреги: учеб. пособие / под общ. ред. Е.Н. Каблова. М.: ВИАМ, 2017. 472 с.
17. Перов Н.С. Конструирование полимерных материалов на молекулярных принципах. II. Молекулярная подвижность в сложных сшитых системах // Авиационные материалы и технологии. 2017. № 4 (49). С. 30–36. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-4-30-36.

18. Лаптев А.Б., Барботько С.Л., Николаев Е.В. Основные направления исследований сохраняемости 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.
19. Куцевич К.Е., Тюменева Т.Ю., Петрова А.П. Влияние наполнителей на свойства клеевых препрегов и ПКМ на их основе // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. № 4 (49). С. 51–55. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-4-51-55.
20. Исаев А.Ю., Рубцова Е.В., Котова Е.В., Сутягин М.Н. Исследование свойств клеев и клеевых связующих, изготовленных с использованием современной отечественной компонентной базы // *Труды ВИАМ*. 2021. № 3 (97). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 18.10.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-3-58-67.
21. Лукина Н.Ф., Петрова А.П., Мухаметов Р.Р., Когтенков А.С. Новые разработки в области клеящих материалов авиационного назначения // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. № S. С. 452–459. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-s-452-459.
22. Малышева Г.В., Гращенков Д.В., Гузева Т.А. Оценка технологичности использования клеев и клеевых препрегов при изготовлении трехслойных панелей // *Авиационные материалы и технологии*. 2018. № 4 (53). С. 26–30. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-4-26-30.

References

1. Kablov E.N. Innovative developments of FSUE «VIAM» SSC of RF on realization of «Strategic directions of the development of materials and technologies of their processing for the period until 2030». *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2015, no. 1 (34), pp. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
2. Kablov E.N. New generation materials and digital technologies for their processing. *Vestnik Rossiyskoy akademii nauk*, 2020, vol. 90, no. 4, pp. 331–334.
3. *Aviation materials: reference book in 13 vols*. Ed. E.N. Kablov. 7th ed., proc. and add. Moscow: VIAM, 2019, vol. 10: Adhesives, sealants, rubbers, hydraulic fluids, part 1: Adhesives, adhesive prepregs. 276 p.
4. 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.
5. Satdinov R.A., Veshkin E.A., Postnov V.I. Assessment of the impact of climatic factors on the performance properties of fiberglass VPS-42P/T-64. *Trudy VIAM*, 2020, no. 10 (92), paper no. 03. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: October 20, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-10-21-29.
6. Gulyaev 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), paper no. 05. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: August 20, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-2-39-51.
7. Borshchev A.V., Gusev Yu.A. Polymer composite materials in automotive industry. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2014, no. S2, pp. 34–38. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-s2-34-38.
8. Dementeva L.A., Serezhenkov A.A., Lukina N.F., Kutsevich K.E. Adhesive prepregs and layered materials on their basis. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2013, no. 2, pp. 19–21.
9. Mishkin S.I. Application of carbon fiber plastics in constructions of pilotless devices (review). *Trudy VIAM*, 2022, no. 5 (111), paper no. 08. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: October 20, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-5-87-95.
10. Mishkin S.I., Zhakova L.S., Klimenko O.N., Vasilchuk E.A. Research of influence of the contents resin in CFRP on their mechanical properties. *Trudy VIAM*, 2023, no. 2 (120), paper no. 07. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: October 20, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-2-77-86.
11. Malakhovsky S.S., Panafidnikova A.N., Kostromina N.V., Osipchik V.S. Carbon plastics in the modern world: their properties and applications. *Uspekhi v khimii i khimicheskoy tekhnologii*, vol. XXXIII, 2019, no. 6, pp. 62–64.

12. Gulyaev A.I., Medvedev P.N., Sbitneva S.V., Petrov A.A. Experimental research of «fiber–matrix» adhesion strength in carbon fiber epoxy/polysulphone composite. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2019, no. 4 (57), pp. 80–86. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-4-80-86.
13. Veshkin E.A., Startsev V.O., Postnov V.I., Barannikov A.A. The climate impacts as the assessment of maintainability of products from carbon fiber. *Trudy VIAM*, 2019, no. 8 (80), paper no. 11. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: October 20, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-8-98-108.
14. Starkov A.I., Kutsevich K.E., Petrova A.P., Antyufeeva N.V. Development of temperature and time curing regime for prepregs based on adhesive binder with reduced flammability. *Trudy VIAM*, 2023, no. 3 (121), paper no. 03. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: October 20, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-3-29-38.
15. Dementyeva L.A., Lukina N.F., Serezhenkov A.A., Kutsevich K.E. Basic properties and purpose of PCM based on adhesive prepregs. *Reports XIX Int. sci.-tech. conf. «Designs and technology for producing products from non-metallic materials»*. Obninsk: ONPP «Technology», 2010, pp. 11–12.
16. Petrova A.P., Malysheva G.V. *Adhesives, adhesive binders and adhesive prepregs*: textbook. Ed. E.N. Kablov. Moscow: VIAM, 2017, 472 p.
17. Perov N.S. Design of polymeric materials on the molecular principles. II. The molecular mobility in the cross-linked complex systems. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2017, no. 4 (49), pp. 30–36. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-4-30-36.
18. Laptev A.B., Barbotko S.L., Nikolaev E.V. The main research areas of the persistence properties of materials under the influence of climatic and operational factors. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2017, no. S, pp. 547–561. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-547-561.
19. Kutsevich K.E., Tyumeneva T.Yu., Petrova A.P. Influence of fillers on properties of adhesive prepregs and PCM on their basis. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2017, no. 4 (49), pp. 51–55. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-4-51-55.
20. Isaev A.Yu., Rubtsova E.V., Kotova E.V., Sutyagin M.N. Research of properties of glues and glue binding, made with use of modern domestic component base. *Trudy VIAM*, 2021, no. 3 (97), paper no. 05. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: October 18, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-3-58-67.
21. Lukina N.F., Petrova A.P., Muhametov R.R., Kogtyonkov A.S. New developments in the field of adhesive aviation materials. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2017, no. S, pp. 452–459. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-s-452-459.
22. Malysheva G.V., Grashchenkov D.V., Guzeva T.A. Evaluation of technological use efficiency of adhesives and glue prepregs in the manufacture of three-layer panels. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2018, no. 4 (53), pp. 26–30. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-4-26-30.

Информация об авторах

Старков Алексей Игоревич, начальник сектора, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Исаев Алексей Юрьевич, заместитель начальника лаборатории по науке, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Куцевич Кирилл Евгеньевич, начальник лаборатории, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Alexey I. Starkov, Head of Sector, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Alexey Yu. Isaev, Deputy Head of Laboratory of Science, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Kirill E. Kutsevich, Head of Laboratory, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 28.12.2023; получена после доработки 07.03.2024; одобрена и принята к публикации после рецензирования 07.03.2024.
The article was submitted 28.12.2023; received in revised form 07.03.2024; approved and accepted for publication after reviewing 07.03.2024.