

В.Н. Кириллов¹, Ю.М. Вапиров², Е.А. Дрозд¹

ИССЛЕДОВАНИЕ АТМОСФЕРНОЙ СТОЙКОСТИ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В УСЛОВИЯХ АТМОСФЕРЫ ТЕПЛОГО ВЛАЖНОГО И УМЕРЕННО ТЕПЛОГО КЛИМАТА

Приведены результаты натурных испытаний авиационных материалов конструкционного назначения на эпоксидных типах связующих: СТ-2227М, СТ-2227, ВПС-31, КМУ-11Э(М), Органит 12Т(М)-Рус, ВКГ-5, ГКМ-1(М) в зонах умеренно теплого и теплого влажного климата. Анализ полученных данных показывает, что зона теплого влажного климата является более агрессивной при натурной экспозиции полимерных композиционных материалов, чем зона умеренно теплого климата. Эффект влияния климатических факторов на свойства ПКМ проявляется в большей степени на характеристиках, измеренных при температуре эксплуатации. Полученные результаты могут быть положены в основу поиска коэффициента корреляции характеристик атмосферной стойкости композитов при их экспозиции в рассмотренных климатических зонах.

Ключевые слова: натурные испытания, климатические параметры, сохраняемость свойств, атмосферное старение, прочностные свойства, коэффициент корреляции.

V.N. Kirillov¹, YU.M. Vapirov², E.A. Drozd¹

STUDY OF THE POLYMER COMPOSITE WEATHER RESISTANCE UNDER THE MILD DAMP AND TEMPERATE CLIMATE CONDITIONS

The full-scale test results of aviation structural materials based on epoxy binders such as СТ-2227М, СТ-2227, ВПС-31, КМУ-11Э(М), Organit 12Т(М)-Рус, ВКГ-5, ГКМ-1(М) are given for the zones of the temperate and mild damp climate conditions. The analysis of the obtained data shows, that the mild damp climate zone is the more aggressive for the full-scale exposure of polymer composites, as compared to the temperate climate. The effect of climatic factors on polymer material properties mainly manifests itself on the characteristics, obtained at the service temperature. These results can be the basic ones when searching the correlation coefficient of a composite weather resistance characteristics under the considered climatic zone conditions.

Keywords: full-scale tests, climatic parameters, property conservation, weather ageing, strength properties, correlation coefficient.

¹ 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

²ИПТС РАН.

Институт природно-технических систем Российской академии наук
Institute of natural and technical systems of the Russian Academy of Sciences
E-mail: gnip@sochi.comstar.ru

Обеспечение безопасности эксплуатации авиационной техники предъявляет крайне жесткие требования к надежности материалов, используемых в этих конструкциях. Необходимость учета воздействия климатических факторов на материалы отражена в требованиях Авиационных Правил (части 23, 25, §603). Применительно к полимерным композиционным материалам (ПКМ) требования задаются разработчиками изделий, при этом практический интерес представляют материалы, уровень прочностных свойств ко-

торых за период эксплуатации изделий в течение 25–30 и более лет снизился бы не более чем на 20–25%. Наиболее достоверные сведения о процессах старения и связанных с ними изменениями механических характеристик материалов можно получить из результатов натуральных исследований в различных климатических зонах [1, 2]. В большинстве случаев процессы старения ПКМ зависят от материала: химического состава связующего, типа наполнителя, состояния границы раздела, технологии изготовления и др., а также от влияния совокупности климатических факторов, т. е. от условий климатической зоны, в которой экспонируется материал. Процессы старения ПКМ развиваются в двух направлениях: с одной стороны, это процессы, которые приводят к деградации свойств материала, а с другой – к их стабилизации. Преобладание того или иного процесса предопределяет работоспособность материалов на определенных этапах старения.

В данной работе с целью изучения влияния климатических факторов умеренно теплого и теплого влажного климата на климатическую стойкость ПКМ проведены натурные испытания авиационных материалов конструкционного назначения на эпоксидных типах связующих: СТ-2227М, СТ-2227, ВПС-31, КМУ-11Э(М), Органит 12Т(М)-Рус, ВКГ-5, ГКМ-1(М). В качестве критерия оценки служебных характеристик исследуемых материалов были выбраны показатели механических свойств ($\sigma_{в.и}$, $\sigma_{в.сж}$), определяющие работоспособность материала в эксплуатационных условиях. Стойкость материала к воздействию климатических факторов оценивали по изменению коэффициента сохраняемости свойств K_r (отношение текущего значения характеристики к исходному). Вышеперечисленные ПКМ экспонировались (табл. 1) в приморской атмосфере умеренно теплого климата Геленджикского центра климатических испытаний (ГЦКИ) и теплого влажного климата Климатической испытательной станции (КИС) в г. Сочи (ИПТС РАН).

Таблица 1

Характеристики полимерных композиционных материалов конструкционного назначения

Марка материала	Состав материала		Продолжительность экспозиции
	Эпоксидное связующее	Наполнитель	
Стеклотекстолит СТ-2227М	УП-2227М	Стекланная ткань Т-10-14 (Т-10-80)	3 года
Стеклотекстолит СТ-2227	УП-2227	Стекланная ткань Т-10-14	3 года
Стеклопластик ВПС-31	ВСП-3М	Стеклоровинг РВМПН-10-1200-14	5 лет
Углепластик КМУ-11Э(М)	ЭДТ-69Н(М)	Углеродная лента ЭЛУР-П	5 лет
Органопластик Органит 12Т(М)	ЭДТ-69Н(М)	Ткань сатинового переплетения из волокна СВМ (арт. 56313Н)	5 лет
Гибридный углеорганопластик ГКМ-1(М)	ЭДТ-69(М)	Углеродная лента ЭЛУР-0.1П, органическая ткань СВМ	5 лет
Гибридный материал ВКГ-5	ВСП-3М	Стекланные (РВМПН) и углеродные жгуты (УКНМ-3К)	5 лет

Станция ГЦКИ расположена на расстоянии 20 м от уреза воды, по климатическим данным она относится к зоне умеренно теплого климата с мягкой зимой, повышенной коррозионной активностью приморской атмосферы: 7 баллов; КИС (г. Сочи) расположена на расстоянии 40 м от уреза воды, по климатическим данным она относится к зоне теплого влажного климата с приморской атмосферой и коррозионной агрессивностью атмосферы: 9 баллов (ГОСТ 9.906, ГОСТ 16350, ГОСТ 9.039).

Основными факторами, влияющими на климатическую стойкость полимерных материалов, являются продолжительность увлажнения, температура, влажность воздуха, концентрация загрязнений, солнечное излучение (ГОСТ 21964). Первые три фактора дают обобщенную характеристику – температурно-влажностный комплекс (ТВК). Среднегодовые значения основных метеопараметров приморских станций ГЦКИ и КИС (г. Сочи) за 2004–2007/2009 гг. показывают (табл. 2), что станции характеризуют-

ся высокими значениями ТВК. Амплитуда колебаний температуры воздуха в течение года в этих зонах составляет 36–45°C, наблюдается большая продолжительность сохранения относительной влажности выше критического значения (>70%). Агрессивность приморской атмосферы характеризуется высокой солнечной радиацией. В течение суток перепад температур на поверхности образцов вне зависимости от сезонности составляет 30°C, а в летний период: 40°C. Температура образцов на солнце достигает 60–70°C. Анализ климатических параметров показывает, что средняя температура воздуха в ГЦКИ на 1,2–2,3°C выше, чем на КИС (г. Сочи). Средняя влажность воздуха в теплом влажном климате выше, чем в умеренно теплом (в летний период разница достигает 15%). Продолжительность увлажнения поверхности ПКМ в г. Сочи почти в 2 раза больше, чем в ГЦКИ. Все это свидетельствует о том, что теплый влажный климат (КИС, г. Сочи) по совокупности воздействия климатических факторов обладает более жесткими условиями, чем умеренно теплый климат (ГЦКИ).

Таблица 2

Среднегодовые значения климатических факторов на побережье Черного моря

Климатические факторы	Среднегодовые значения факторов за 2004–2007/2009 гг. в климатической зоне	
	умеренно теплой (ГЦКИ)	теплой влажной (ИПТС РАН)
Температура воздуха $T_{\text{ср}}$, °C	15,1/15,5	14,2/14,6
Относительная влажность воздуха W , %	75/66,3	79/78,8
Осадки, мм	569/393	1676/814
Продолжительность увлажнения поверхности при $W>80\%$ и $T>0^{\circ}\text{C}$, ч	3676/3500	4640/4607
Солнечное излучение, МДж/м ²	5040/4045	5600
Ультрафиолетовое излучение, МДж/м ²	320/233	260/234

Следует отметить, что по совокупности метеопараметров климатическая зона в г. Сочи является более жесткой, чем зона Средиземноморья, и незначительно уступает климату Южной Флориды (по температуре и дозе УФ облучения).

На рис. 1–5 показано изменение прочности в процессе длительной экспозиции (3–5 лет) полимерных композиционных материалов СТ-2227М, СТ-2227, ВПС-31, КМУ-11Э(М), Органит 12Т(М), ВКГ-5, ГКМ-1(М) на открытой площадке в умеренно теплом и теплом влажном климате.

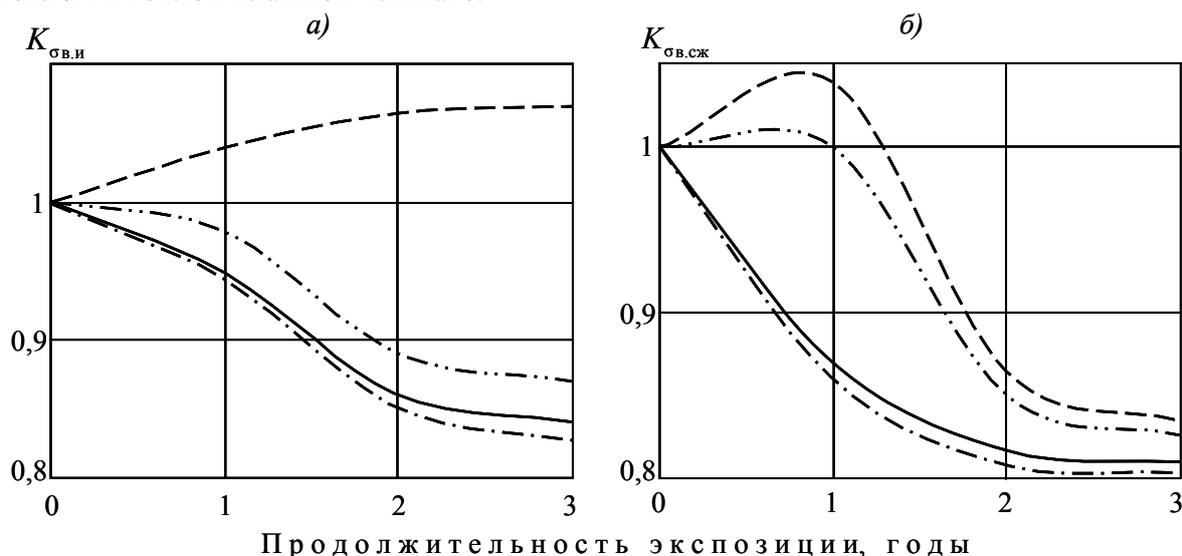


Рис. 1. Изменение прочности при изгибе (а) и сжатии (б) стеклопластиков СТ-2227М (—, ----) и СТ-2227 (-·-·-, ····) в процессе экспозиции на открытой площадке в умеренно теплом (ГЦКИ: —, ----) и теплом влажном климате (ИПТС РАН, г. Сочи: -·-·-, ····)

В работе [3] вся стадия атмосферного старения ПКМ была условно разделена на два временных этапа:

– начальный (иррегулярный) этап, при котором в материале протекают основные изменения, связанные с диффузией влаги в материал, релаксацией внутренних напряжений и перестройкой структуры полимерной матрицы, процессами завершения структурообразования под воздействием диффундированной влаги и др. [4–8]. Эти процессы происходят в основном в полимерной матрице;

– регулярный этап старения материала, при котором вследствие суточных, годовых изменений температуры и отличающихся на порядок значений температурных коэффициентов линейного расширения (ТКЛР) полимерной матрицы и волокон наполнителя, наличия диффундированной влаги в материале протекают процессы на границе «полимерная матрица–наполнитель» и происходят структурные и химические изменения в адгезионном слое «матрица–наполнитель».

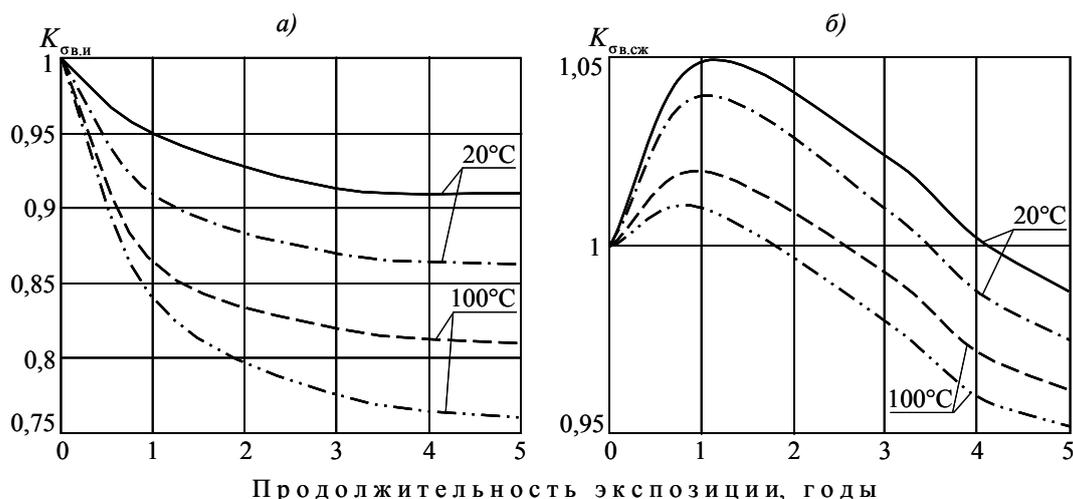


Рис. 2. Изменение прочности при изгибе (а) и сжатии (б) стеклопластика ВПС-31 в процессе экспозиции на открытой площадке в умеренно теплом (ГЦКИ: —, ---) и теплом влажном климате (ИПТС РАН, г. Сочи: ----, -.-.-)

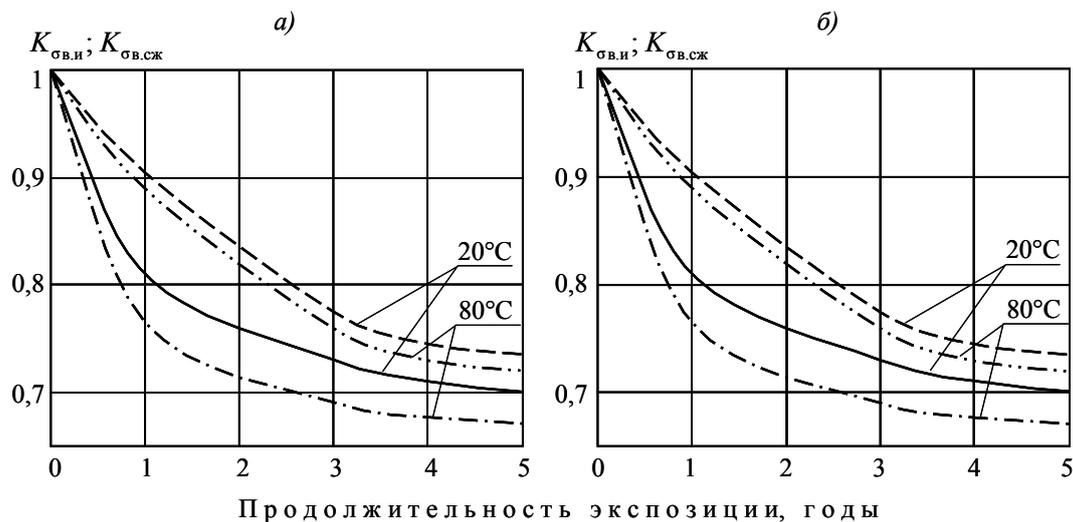


Рис. 3. Изменение прочности при изгибе (—, -.-) и сжатии (- - -, -.-) углепластика КМУ-11Э(М) (а) и органоластика Органит 12Т(М) (б) в процессе экспозиции на открытой площадке в умеренно теплом климате ГЦКИ

Длительность иррегулярного этапа зависит от химического состава полимерной матрицы, наполнителя, их объемного содержания, технологического режима получения материала (температурно-временной режим, давление прессования) и ряда других факторов. В зависимости от химического состава материалов длительность начального этапа может колебаться от полугода до 3–6 лет. На этой стадии значения прочностных характеристик могут как уменьшаться, так и несколько возрасти вследствие протекания химических процессов доотверждения, пластификации полимерной матрицы, вызванной диффундированной влагой, совершенствованием полимерной матрицы и др. По мере проникновения атмосферной влаги возникает градиент ее концентрации по толщине материала, что вызывает дополнительный рост внутренних напряжений преимущественно в менее упорядоченных структурных образованиях связующих. В первую очередь деструкции преимущественно подвержены наиболее напряженные полимерные цепи. При их разрушении возникают благоприятные условия для релаксации внутренних напряжений, формирования более плотно упакованной структуры полимера и, следовательно, усиления межмолекулярного взаимодействия в стеклообразном состоянии связующих. Поглощенная материалами влага вызывает ослабление межмолекулярного взаимодействия, в то же время увеличение молекулярной подвижности облегчает протекание релаксационных процессов, способствующих усилению межмолекулярного взаимодействия в стеклообразном состоянии связующих. Аналогичные процессы могут развиваться и в переходном слое «полимер–наполнитель». Из-за разности температурных коэффициентов линейного расширения (ТКЛР) связующих и наполнителей на границе раздела возникает структурно-неоднородный переходный слой. Это обусловлено тем, что при формовании ПКМ по мере понижения температуры происходит распрямление полимерных цепей на границе раздела. Снижается их гибкость и уменьшается число конформаций, появляются внутренние напряжения. Данные факторы снижают уровень адгезионного взаимодействия, поскольку препятствуют образованию дополнительных связей, что приводит к снижению деформационно-прочностных характеристик ПКМ [8].

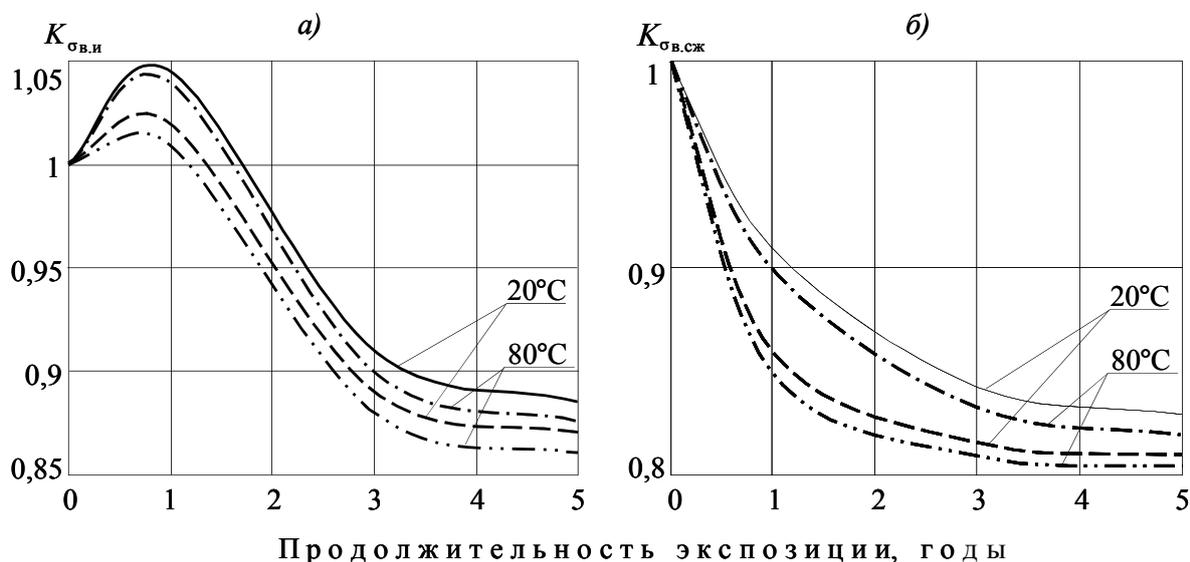


Рис. 4. Изменение прочности при изгибе (а) и сжатии (б) гибридного углеорганопластика ГKM-1(М) в процессе экспозиции на открытой площадке в умеренно теплом (ГЦКИ: —, --) и теплом влажном климате (ИПТС РАН, г. Сочи: - - -, -·-·)

В результате на первом этапе старения свойства ПКМ зависят от эффективности конкурирующих процессов – усиления и ослабления межмолекулярного взаимодействия в стеклообразном состоянии связующих и на границе раздела «полимер–наполнитель», вызванных соответственно релаксацией внутренних напряжений и пластифицирующим влиянием атмосферной влаги. Установлено [8], что, несмотря на многочисленные процессы, протекающие в материале на этом этапе, наибольшее снижение прочностных характеристик происходит за счет диффундированной влаги. Прогнозирование прочностных характеристик по завершению начальной стадии возможно путем проведения лабораторных исследований при полном влагонасыщении материала. При этом формируется нижняя граница результатов возможных изменений свойств материала [9].

Вторая стадия процесса характеризуется монотонным уменьшением значений прочностных свойств, длительность этого процесса растягивается на многие годы и десятилетия и зависит в основном от изменения химических связей в адгезионном слое «полимерная матрица–наполнитель», а также развития деструктивных процессов в полимерной матрице. В течение второй стадии достигаются сроки предельно возможных изменений значений прочностных и других характеристик материала.

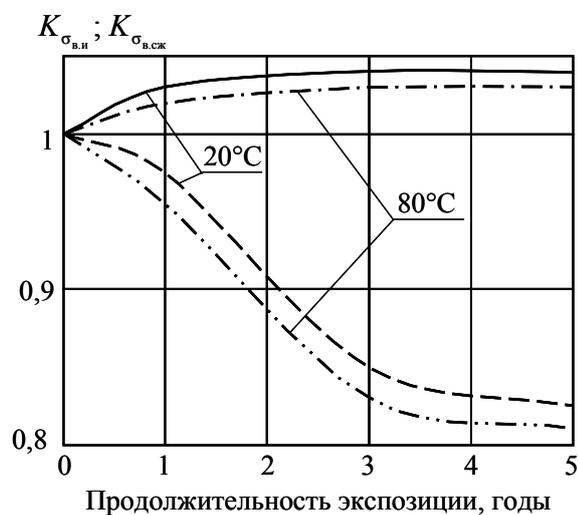


Рис. 5. Изменение прочности при изгибе (—, -.-.-) и сжатии (-.-.-, -.-.-) стеклоуглепластика ВКГ-5 в процессе экспозиции на открытой площадке в умеренно теплом климате ГЦКИ

Общий анализ полученных экспериментальных данных исследования эпоксикомпозитов СТ-2227М, СТ-2227, ВПС-31, КМУ-11Э(М), Органит 12Т(М)-Рус, ВКГ-5, ГКМ-1(М) в двух климатических зонах подтверждает сделанное в [3] предположение о наличии двух зон: для всех исследованных материалов наиболее существенное изменение прочностных характеристик протекает в течение первых 3 лет атмосферной экспозиции. В частности, на первом этапе климатического старения материалов наблюдается падение прочности при изгибе у композитов СТ-2227М, ВПС-31, Органит 12Т(М), КМУ-11Э(М) (см. рис. 1, а; 2, а; 3, а, б). Снижение деформационно-прочностных характеристик ПКМ, особенно при максимальных температурах эксплуатации, обусловлено преимущественно ослаблением межмолекулярного взаимодействия в стеклообразном состоянии связующих и на границе раздела «полимер–наполнитель» вследствие пластифицирующего влияния воды [10, 11]. Для композитов СТ-2227М, КМУ-11Э(М), ГКМ-1(М), ВКГ-5, Органит 12Т(М) основной вклад в развитие дефектности материала при натурной экспозиции в умеренно теплом и теплом влажном климате вносит межфазный слой, о чем свидетельствует снижение прочности при сжатии (см. рис. 1, б; 3, а, б; 4, б; 5), характеризующей состояние связующего и межфазного слоя («волокно–полимерная матрица») [8, 12–15]. Для материалов СТ-2227, ВПС-31 процессы упорядочения структуры материала под воздействием температуры и влаги, адсорбированной материалом из воздуха, преобладают над деструктивными процессами, что отражено на рис. 1, б; 2, б. Для углеоргано-пластика ГКМ-1(М) и углепластика КМУ-11Э(М) при сроке экспозиции 3 года волокно СВМ вследствие пластифицирующего эффекта изменяет свои свойства под воздействием влаги, что проявляется в разориентации волокон, в результате чего происходит снижение прочности при изгибе материала (см. рис. 3, а; 4, а). В умеренно теплом и теплом влаж-

ном климате в течение всего времени старения ПКМ под воздействием УФ составляющей солнечного спектра, кислорода воздуха, процессов сорбции–десорбции влаги, цикличности температур происходит разрыв химических связей в основной цепи макромолекулы полимера. Деструктивные процессы локализуются в неупорядоченных областях эпоксидных связующих и на границе раздела «полимер–наполнитель», вызывая увеличение структурной неоднородности полимерного связующего. На более поздних этапах старения деструктивные процессы становятся преобладающими, что приводит к необратимому снижению деформационно-прочностных показателей, которые зависят от количества поглощенной материалом влаги, типа связующего и наполнителя, технологических режимов изготовления композита и т. д. [3–5]. По мере проникновения влаги в материал происходит его набухание, образуется градиент ее концентрации по толщине материала и на границе раздела «полимер–наполнитель». Вследствие этого возникают дополнительные внутренние напряжения в объеме композита и на границе раздела. Одновременно длительное пребывание влаги в материале способствует релаксации внутренних напряжений [10, 11]. Данные процессы также оказывают существенное влияние на изменение деформационно-прочностных показателей материала при старении в климатических условиях.

Приведенные закономерности старения являются общими для всех изученных ПКМ, экспонируемых в умеренно теплом и теплом влажном климате. Анализ полученных данных показывает, что зона теплого влажного климата является более агрессивной при натурной экспозиции ПКМ, чем зона умеренно теплого климата. Прочностные характеристики материалов, прошедших экспозицию в зоне теплого влажного климата, имеют меньшие значения аналогичных характеристик материалов, экспонировавшихся в зоне умеренно теплого климата. Эффект влияния климатических факторов на свойства ПКМ проявляется в большей степени на характеристиках, измеренных при температуре эксплуатации. Основное влияние на снижение прочностных характеристик ПКМ при их экспозиции в умеренно теплом и теплом влажном климате оказывает влага, поглощенная материалами из окружающей среды. Представленные результаты позволяют сформулировать комплекс требований, которые необходимо предъявлять при выборе и внедрении ПКМ в изделия авиационной техники по критерию климатической стойкости. Полученные результаты могут быть положены в основу поиска коэффициента корреляции между характеристиками атмосферной стойкости композитов при их экспозиции в различных климатических зонах.

ЛИТЕРАТУРА

1. 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.
2. Кириллов В.Н., Ефимов В.А., Шведкова А.К., Николаев Е.В. Исследование влияния климатических факторов и механического нагружения на структуру и механические свойства ПКМ //Авиационные материалы и технологии. 2011. №4. С. 41–45.
3. Кириллов В.Н., Ефимов В.А., Вапиров Ю.М. К вопросу о возможности прогнозирования атмосферной стойкости ПКМ /В сб. докл. VII научной конф. по гидроавиации «Гидроавиасалон-2008». М. 2008. Ч. II. С. 307–313.
4. Вапиров Ю.М. Механизмы старения углепластиков авиационного назначения в условиях теплого влажного климата: Автореф. дис. к.т.н. М. 1989. 36 с.
5. Старцев О.В. Старение полимерных авиационных материалов в теплом влажном климате: Автореф. дис. д.т.н. М. 1990. 80 с.
6. Старцева Л.Т. Исследование влияния влаги на молекулярную подвижность, структуру и вязкоупругие свойства некоторых двухкомпонентных полимерных систем: Автореф. дис. к.ф.-м.н. Ташкент. 1983. 28 с.

7. Старцев О.В., Перепечко И.И., Старцева Л.Т., Машинская Г.П. Структурные изменения в пластифицированном сетчатом аморфном полимере //ВМС. Серия Б. 1983. Т. 25. №6. С. 457–461.
8. Вапиров Ю.М., Кириллов В.Н., Кривонос В.В. Закономерности изменения свойств полимерных композитов конструкционного назначения при длительном климатическом старении в свободном и нагруженном состояниях /В сб. докл. VI научной конф. по гидроавиации «Гидроавиасалон–2006». М. 2006. Ч. II. С. 103–108.
9. Кириллов В.Н., Ефимов В.А., Матвеевкова Т.Е., Кривонос В.В., Гребнева Т.В., Болберова Е.В. Климатическая стойкость новых композиционных материалов //Авиационная промышленность. 2004. №4. С. 44–47.
10. Павлов Н.Н. Старение пластмасс в естественных и искусственных условиях. М.: Химия. 1982. 224 с.
11. Филатов И.С. Климатическая устойчивость полимерных материалов. М.: Наука. 1983.
12. Кириллов В.Н., Ефимов В.А., Гуняев Г.М., Кривонос В.В., Машинская Г.П., Вапиров Ю.М. Особенности поведения неметаллических материалов в морских условиях /В сб. докл. научной конф. по гидроавиации «Геленджик–1996». М. 1996. С. 124–129.
13. Кириллов В.Н., Ефимов В.А., Полякова А.В. Климатическая и микробиологическая стойкость неметаллических материалов /В сб. докл. «Методы испытаний и контроля качества металлических и неметаллических материалов». М. 2001. С. 81–86.
14. Кириллов В.Н., Ефимов В.А., Кислякова В.И., Баритко Н.В., Савенкова А.В., Сытый Ю.В., Костельцев В.В., Вапиров Ю.М. Влияние воздействия влажного субтропического климата на свойства неметаллических материалов /В сб. докл. IV научной конф. по гидроавиации «Гидроавиасалон–2002». М. 2002. С. 214–221.
15. Ракитина В.П., Кавун Н.С., Кириллов В.Н., Деев И.С., Топунова Т.Э., Ефимов В.А. Исследование климатической стойкости эпоксидных стеклотекстолитов, применяемых в сотовых и монолитных конструкциях самолетов /В сб. докл. VI научной конф. по гидроавиации «Гидроавиасалон–2006». М. 2006. Ч. II. С. 109–116.

REFERENCES LIST

1. Kirillov V.N., Starcev O.V., Efimov V.A. Klimaticheskaja stojkost' i povrezhdaemost' polimernyh kompozicionnyh materialov, problemy i puti reshenija [Climatic resistance and defectiveness of polymeric composite materials, problems and solutions] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 412–423.
2. Kirillov V.N., Efimov V.A., Shvedkova A.K., Nikolaev E.V. Issledovanie vlijaniya klimaticheskikh faktorov i mehanicheskogo nagruzhenija na strukturu i mehanicheskie svojstva PKM [Investigation of the influence of climatic factors and mechanical loading on the structure and mechanical properties of the PCM] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2011. №4. S. 41–45.
3. Kirillov V.N., Efimov V.A., Vapirov Ju.M. K voprosu o vozmozhnosti prognozirovaniya atmosfernoj stojkosti PKM [On the possibility of forecasting atmospheric persistence RMB] /V sb. dokl. VII nauchnoj konf. po gidroaviacii «Gidroviasalon-2008». М. 2008. Ch. II. S. 307–313.
4. Vapirov Ju.M. Mehanizmy starenija ugleplastikov aviacionnogo naznachenija v uslovijah teplogo vlazhnogo klimata [Mechanisms of aging aircraft CFRP destination in warm humid climate]: Avtoref. dis. k.t.n. М. 1989. 36 s.
5. Starcev O.V. Starenie polimernyh aviacionnyh materialov v teplom vlazhnom climate [Aging aircraft polymeric materials in a warm humid climate]: Avtoref. dis. d.t.n. М. 1990. 80 s.
6. Starceva L.T. Issledovanie vlijaniya vlagi na molekulyarnuju podvizhnost', strukturu i vjazkouprugie svojstva nekotoryh dvuhkomponentnyh polimernyh system [Investigation of the influence of moisture on the molecular mobility, structure and viscoelastic properties of some two-component polymer systems]: Avtoref. dis. k.f.-m.n. Tashkent. 1983. 28 s.
7. Starcev O.V., Perepechko I.I., Starceva L.T., Mashinskaja G.P. Strukturnye izmenenija v plastificirovannom setchatom amorfnom polimere [Structural changes in plasticized mesh amorphous polymer] //VMS. Serija B. 1983. T. 25. №6. S. 457–461.
8. Vapirov Ju.M., Kirillov V.N., Krivonos V.V. Zakonomernosti izmenenija svojstv polimernyh kompozitov konstrucionnogo naznachenija pri dlitel'nom klimaticheskom starenii v svobod-

- nom i nagruzhennom sostojanijah [Patterns of change in the properties of polymer composites with long-term structural purpose climatic aging in a free and loaded states] /V sb. dokl. VI nauchnoj konf. po gidroaviacii «Gidroaviasalon–2006». M. 2006. Ch. II. S. 103–108.
9. Kirillov V.N., Efimov V.A., Matveenkova T.E., Krivonos V.V., Grebneva T.V., Bolberova E.V. Klimaticheskaja stojkost' novyh kompozicionnyh materialov [Climatic resistance of new composite materials] //Aviacionnaja promyshlennost'. 2004. №4. S. 44–47.
 10. Pavlov N.N. Starenie plastmass v estestvennyh i iskusstvennyh uslovijah [Aging of plastics in natural and artificial conditions]. M.: Himija. 1982. 224 s.
 11. Filatov I.S. Klimaticheskaja ustojchivost' polimernyh materialov [Climatic resistance of polymeric materials]. M.: Nauka. 1983.
 12. Kirillov V.N., Efimov V.A., Gunjaev G.M., Krivonos V.V., Mashinskaja G.P., Vapi-rov Ju.M. Osobnosti povedenija nemetallicheskih materialov v morskijh uslovijah [Features of the behavior of non-metallic materials in the marine environment] /V sb. dokl. nauchnoj konf. po gidroaviacii «Gelendzhik–1996». M. 1996. S. 124–129.
 13. Kirillov V.N., Efimov V.A., Poljakova A.V. Klimaticheskaja i mikrobiologicheskaja stojkost' nemetallicheskih materialov [Climate and microbiological resistance of nonmetallic materials] /V sb. dokl. «Metody ispytanij i kontrolja kachestva metallicheskih i nemetallicheskih materialov». M. 2001. S. 81–86.
 14. Kirillov V.N., Efimov V.A., Kisljakova V.I., Baritko N.V., Savenkova A.V., Sytyj Ju.V., Kostel'cev V.V., Vapirova Ju.M. Vlijanie vozdejstvija vlazhnogo subtropicheskogo klimata na svojstva nemetallicheskih materialov [Effect of exposure to humid subtropical climate on the properties of non-metallic materials] /V sb. dokl. IV nauchnoj konf. po gidroaviacii «Gidroaviasalon–2002». M. 2002. S. 214–221.
 15. Rakitina V.P., Kavun N.S., Kirillov V.N., Deev I.S., Topunova T.Je., Efimov V.A. Issledovanie klimaticheskaj stojkosti jepoksidnyh steklotekstolitov, primenjaemyh v sotovyh i monolitnyh konstrukcijah samoletov [Study of climatic resistance of epoxy fiberglass used in cellular and solid aircraft designs] /V sb. dokl. VI nauchnoj konf. po gidroaviacii «Gidroaviasalon–2006». M. 2006. Ch. II. S. 109–116.