

УДК 678.8

А.Г. Гуняева¹, Е.А. Вешкин¹, Н.В. Антюфеева¹, А.Н. Панафидникова¹, В.А. Ефимик²

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОНДЕНСАЦИОННОЙ ВЛАГИ
НА ПРЕПРЕГ УГЛЕПЛАСТИКА
НА ОСНОВЕ РАСТВОРНОГО ЭПОКСИДНОГО СВЯЗУЮЩЕГО
И ПКМ НА ЕГО ОСНОВЕ**

DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-9-80-88

Проведена оценка влияния конденсационной влаги, которая может образоваться при хранении препрега углепластика (в том числе при нарушении условий хранения) в морозильной камере, на его реакционную способность и свойства отвержденного полимерного композиционного материала на его основе. В качестве объектов для исследования рассмотрены препрег марки ПУ-4э-2м на основе растворного эпоксидного связующего, применяющийся в серийном производстве, и углепластик на его основе марки КМУ-4э-2м. Методами термического анализа получены экспериментальные кривые с описанием реокинетического поведения анализируемых препрегов. Исследованы свойства углепластика КМУ-4э-2м на основе термостатированного и нетермостатированного препрега ПУ-4э-2м, в том числе после ускоренных климатических испытаний.

Ключевые слова: полимерные композиционные материалы, эпоксидное полимерное связующее, хранение, реакционная способность, влага, препрег.

A.G. Gunyaeva¹, E.A. Veshkin¹, N.V. Antufeeva¹, A.N. Panafidnikova¹, V.A. Efimik²

**RESEARCH OF INFLUENCE OF THE CONDENSATION MOISTURE
ON CARBON FIBER PLASTIC PREPREG
ON THE BASIS OF SOLUTION EPOXY BINDER AND PCM ON ITS BASIS**

The influence of condensation moisture of prepreg of carbon fiber reinforced plastic based on mortar epoxy resins on its reactivity and the properties of cured polymeric composite material was done, including the condensation moisture that is formed when conditions in the refrigerator or freezer are violated. Prepreg PU-4e-2m used in mass production on the basis of a solution epoxy binder and carbon fiber reinforced plastic based on its KMU-4E-2m were considered as objects for research. Experimental DSC curves with detailed rheokinetic description the behavior of the analyzed prepregs were obtained. Properties of CFRP KMU-4e-2m based on thermostated and non-thermostated PU-4e-2m prepreg were investigated.

Keywords: polymeric composite materials, epoxy binder, storage, reactivity, moisture, prepreg.

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

²Акционерное общество «Пермский завод «Машиностроитель» [Joint Stock Company «Perm Plant «Mashinostroitel»]; e-mail: pzmash@perm.ru

Введение

Современное производство узлов и конструкций из полимерных композиционных материалов для авиационной техники основывается на препреговой технологии изготовления изделий [1]. Препреги – полуфабрикаты ПКМ – представляют собой организованную определенным образом систему волокнистых наполнителей, совмещенных

с полимерными связующими [2]. Полуфабрикаты – это, как правило, многокомпонентные, гетерогенные системы, поэтому при их производстве необходимо учитывать влияние отдельных компонентов на технологические свойства полуфабриката [3] и на эксплуатационные свойства [4] материала в готовом изделии. Препреги поставляются, как правило, в виде рулонов, намотанные на картонные или пластмассовые гильзы (шпули), между их слоями прокладывается слой разделительного материала – полиэтиленовой пленки [5]. Упакованный таким образом препрег может храниться от нескольких часов до года и даже более. Срок хранения полуфабриката (препрега) зависит от его компонентного состава и выдерживаемых условий хранения (температуры, влажности, продолжительности) [6]. Информация об условиях хранения, транспортировки, виде поставки и прочее указывается разработчиком материала в нормативном документе – технических условиях (ТУ) на материал.

После изготовления качественного, соответствующего нормативной документации материала и для гарантированной реализации всех указанных в ТУ свойств ПКМ [7, 8], необходимо строгое соблюдение условий транспортировки и хранения полуфабриката (препрега). Изготовитель гарантирует соответствие качества препрега только при соблюдении потребителем всех условий хранения, указанных в нормативном документе на материал.

В процессе хранения свойства препрега изменяются под воздействием различных факторов (химических, физических, биологических) [9]. В результате воздействия внешних факторов на препрег они могут спровоцировать внутренние химические процессы – от разрывов основной цепи макромолекул и их поперечных связей до отрыва радикалов и их присоединения к другой молекулярной цепи. Скорость протекания этих внутренних химических процессов в материале напрямую зависит от его молекулярного строения и наличия в связующем различного рода добавок и примесей. Среди многочисленных отверждающихся составов эпоксидные связующие в наибольшей степени отвечают требованиям (особенно технологическим), предъявляемым к матрицам волокнистых композиционных материалов. Основным компонентом являются эпоксидные смолы. В состав смол входят мономеры и олигомеры с различным числом звеньев и степенью разветвленности, с эпоксидными группами во всех или в части концевых звеньев и с гидроксильными группами в промежуточных и части концевых звеньев. Компоненты, входящие в состав связующего, являются активаторами различного рода цепных реакций в полимере, в том числе возникающих при воздействии образовавшейся и проникшей в него влаги, могут оказать значительное влияние на свойства препрега (в первую очередь на его реакционную способность) в процессе хранения [10].

В статье [11] на примере применяемого в серийном производстве деталей и агрегатов авиационной техники препрега марки ПУ-4э-2м (углепластик марки КМУ-4э-2м) на основе углеродной ленты ЭЛУР-П и растворного эпоксидного связующего ЭНФБ-2М рассмотрено влияние конденсационной влаги, которая может образоваться при хранении (в том числе при нарушении условий хранения) в морозильной камере, на его реакционную способность и свойства отверженного ПКМ на его основе.

Работа выполнена в рамках реализации комплексной научной проблемы 13.2. «Конструкционные ПКМ» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [12].

Материалы и методы

Исследования и анализ проводили на образцах из препрега ПУ-4э-2м (ТУ1-595-43-500–96) на основе углеродной ленты ЭЛУР-П (ГОСТ 28006–88) и растворного эпоксидного связующего ЭНФБ-2М (ТУ1-595-25-494–96), предназначенного для изготовления деталей и агрегатов конструкционного назначения, работающих в интервале температур от -60 до +150°C, и углепластика марки КМУ-4э-2м на его основе.

Эпоксидное связующее ЭНФБ-2м выполнено на основе эпоксидиановой смолы ЭД-20, эпокситрифенольной и полиэфирной смол, отвердителя [13], а также растворителя – изопропилового спирта или ацетона; рабочая температура 150°C, температура стеклования 170°C, температура деструкции 220°C.

Термоаналитические методы, такие как дифференциальная сканирующая калориметрия (ДСК) и термомеханический анализ (ТМА), нашли широкое применение при анализе физических фазовых переходов и реокинетических процессов, которые происходят в материалах и сопровождаются либо выделением, либо поглощением тепла [14]. Методом ДСК непосредственно анализируют изменение теплосодержания в материалах как функцию температуры. Информационные данные, полученные с помощью этого метода, используют для моделирования с целью подбора и последующей возможной корректировки температурно-временного режима процесса отверждения ПКМ. Исследования проведены на калориметре швейцарской фирмы Mettler Toledo [15].

Результаты и обсуждение

Для проведения исследований изготовлена партия связующего марки ЭНФБ-2М и партия препрега марки ПУ-4э-2м на его основе, исследованы их свойства на соответствие требованиям ТУ1-595-25-494–96 и ТУ1-595-43-500–96 соответственно. Результаты исследований представлены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты анализа связующего ЭНФБ-2М и препрега ПУ-4э-2м

Показатель	Норма по ТУ	Усредненные результаты анализа
Связующее ЭНФБ-2М (ТУ1-595-25-494–96)		
Внешний вид	Однородный прозрачный раствор от светло-желтого до темно-коричневого цвета, не содержащий механических примесей	Однородный прозрачный раствор коричневого цвета, не содержащий механических примесей
Массовая доля нелетучих веществ, %	45–65	56,1
Время желатинизации при температуре 120±1°C, мин	8–30	27
Плотность, кг/м³	945–1020	989
Препрег ПУ-4э-2м (ТУ1-595-43-500–96)		
Массовая доля связующего, %	38–43	42,7
Массовая доля летучих веществ, %	Не более 2	0,7
Текучесть, %	12–22	18,2
Тепловой эффект реакции отверждения, Дж/г	130±25	129
Температура начала активной реакции отверждения, °C	135±25	138,5
Температура максимума реакции отверждения, °C	170±10	166,4

По результатам исследований установлено, что по внешнему виду, массовой доле нелетучих веществ, плотности, массовой доле связующего, массовой доле летучих веществ, текучести, тепловому эффекту реакции отверждения, температуре начала активной реакции отверждения, температуре максимума реакции отверждения партии связующего и препрега соответствуют требованиям ТУ1-595-25-494–96 и ТУ1-595-43-500–96 соответственно.

Из изготовленного препрега вырезаны образцы и проведены исследования влияния условий хранения препрега ПУ-4э-2м при температуре не более -18°C:

– многократной заморозки и разморозки препрега (реакционная способность);

– продолжительности хранения (в течение 1 и 3 мес) препрега ПУ-4э-2м;
 – конденсационной влаги, образующейся на препреге, в том числе при нарушении условий его хранения и термостатирования, указанных в ТУ, на свойства препрега ПУ-4э-2м и получаемого на его основе углепластика КМУ-4э-2м.

Согласно ТУ1-595-43-500–96 на препрег ПУ-4э-2м, его хранение должно осуществляться в герметично упакованном в полиэтиленовую пленку виде, в морозильной камере промышленного холодильника при температуре не более -18°C . Препрег, извлеченный из холодильника и предназначенный для переработки, выдерживают при температуре $20\pm 3^{\circ}\text{C}$, не вскрывая герметичной упаковки, не менее 6 ч до исчезновения конденсационной влаги на ее поверхности.

При соблюдении вышеизложенных условий гарантийный срок хранения препрега со дня изготовления будет составлять:

- при температуре $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ – 6 мес;
- при температуре не более $+5^{\circ}\text{C}$ – 8 мес;
- при температуре не более -18°C – 12 мес.

Для оценки влияния конденсационной влаги, которая может образоваться на препреге в процессе хранения, исследовано ее влияние на реакционную способность препрега ПУ-4э-2м методом ДСК по ММ1.595-11-414–2010 после его многократной заморозки, что происходит в условиях серийного производства изделий из ПКМ. Исследования проводили в течение 11 недель. Образец препрега, упакованный в полиэтиленовую пленку, на ночь помещали в морозильную камеру при температуре не более -18°C , утром следующего дня его вынимали и размораживали при комнатной температуре $20\pm 5^{\circ}\text{C}$. После этого из образца отбирали пробу и проводили исследования методами термического анализа, а затем образец снова помещали в морозильную камеру.

Реакционную способность связующего в препреге определяли методом ДСК при динамическом нагреве со скоростью $10^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ в воздушной среде, время гелеобразования – методом ТМА в изотермических условиях при переменной циклической нагрузке 1 Н с частотой 0,1–0,3 Гц при температуре 120°C . Результаты испытаний приведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты испытаний препрега ПУ-4э-2м

Условия хранения	Тепловой эффект при отверждении связующего в препреге, Дж/г	Температура начала активной реакции отверждения, $^{\circ}\text{C}$	Температура максимума реакции отверждения, $^{\circ}\text{C}$	Время гелеобразования связующего в препреге, мин, при 120°C
По ТУ1-595-43-500–96	130 ± 25	135 ± 10	170 ± 10	–
В исходном состоянии	152	138	170	33
Выдержка один день в комнате после заморозки в течение:				
– одной недели	152	137	170	32
– двух недель	151	136	170	32
– трех недель	148	137	170	31
– четырех недель	149	136	170	30
– пяти недель	140	135	169	28
– шести недель	142	136	168	27
– семи недель	141	135	168	27
– восьми недель	140	135	168	27
– девяти недель	135	135	168	26
– десяти недель	136	135	168	25
– одиннадцати недель	132	135	166	25

По результатам исследований установлено, что по истечении 11 циклов заморозки препрега конденсационная влага незначительно влияет на реакционную способность связующего в препреге ПУ-4э-2м, все показатели в норме и входят в диапазон

значений по ТУ на препрег ПУ-4э-2м. Время гелеобразования и тепловой эффект реакции отверждения связующего снижается, но остается в пределах значений по ТУ. На основании полученных результатов можно сделать вывод, что при многократной заморозке в препрег может попадать конденсационная влага и оказывать влияние на химические процессы отверждения в полимерной матрице, снижая время гелеобразования, что впоследствии окажет влияние на физико-механические характеристики отвержденного материала.

Проведена оценка влияния времени хранения препрега ПУ-4э-2м при температуре не более -18°C на свойства получаемого из него углепластика КМУ-4э-2м, в том числе после ускоренных климатических испытаний (кипячения).

В этой связи изготовлены плиты углепластика КМУ-4э-2м из препрега, хранившегося в течение 1 и 3 мес в морозильной камере при температуре -18°C . Перед изготовлением углепластика препрег термостатировали в соответствии с ТУ1-595-43-500–96 при комнатной температуре $20\pm 3^{\circ}\text{C}$ в течение суток, не вскрывая герметичную упаковку. Плиты изготавливали из препрега в соответствии с режимом отверждения, указанным в ТУ. Далее проведены физико-механические испытания образцов в исходном состоянии, после хранения 1 и 3 мес. Все образцы также подвергали ускоренным климатическим испытаниям (кипячению) с целью оценки их физико-механических свойств. Определены: предел прочности при сжатии – по ГОСТ 25.602–2019; предел прочности и модуль упругости при растяжении – по ГОСТ 25.601–2017 и ГОСТ 11262–2017; предел прочности и модуль упругости при изгибе – по ГОСТ 25.604–2019; плотность – по ГОСТ 15139–80. Результаты испытаний приведены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты испытаний углепластика КМУ-4э-2м, изготовленного на основе связующего ЭНФБ-2М, в исходном состоянии и после кипячения

Показатели, обязательные для проверки	Значения по нормативной документации	Значения показателей для углепластика КМУ-4э-2М (до и после кипячения)					
		в исходном состоянии		после хранения в течение, мес			
				1		3	
		до	после	до	после	до	после
Предел прочности при сжатии, МПа (не менее)	900 (по ТУ)	925	915	920	910	922	910
Предел прочности при изгибе, МПа (не менее)	1200 (по ТУ)	1265	1255	1260	1250	1251	1245
Модуль упругости при изгибе, ГПа (не менее)	115 (по ТУ)	135	134	135	132	130	131
Предел прочности при растяжении, МПа (не менее)	900 (по ТУ)	910	905	915	904	910	907
Прочность при межслойном сдвиге, МПа	65 (по паспорту)	67	66	67	65	67	66
Содержание связующего, % (по массе)	38–43 (по ТУ)	41	41	41	41	42	42
Плотность, г/см ³	1,48–1,52 (по паспорту)	1,52	1,52	1,52	1,52	1,50	1,50
Толщина монослоя углепластика, мм	0,11–0,13 (по паспорту)	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11
Температура стеклования матрицы в углепластике, $^{\circ}\text{C}$ (не менее)	175 (по ТУ)	178	165	177	163	175	163
Степень отверждения, %	–	99,9	99,9	99,9	99,9	99,9	99,9

В результате проведенных экспериментов установлено, что влагопоглощение углепластика КМУ-4э-2м за сутки кипячения составило 0,74%, влага повлияла на температуру стеклования пластика, тем самым уменьшив диапазон его рабочих температур. Физико-механические свойства углепластика КМУ-4э-2м под влиянием влаги увеличились, видимо за счет частичного заполнения пор влагой.

Рассмотрим случай нарушения условий хранения препрега при его термостатировании, т. е. при разморозке (выдержке) при комнатной температуре перед началом технологического процесса выкладки изделия.

Для определения влияния влаги, образующейся на поверхности препрега при извлечении его из морозильной камеры с температурой не более -18°C , изготовлены два вида углепластика КМУ-4э-2м из термостатированного (согласно ТУ препрег выдерживали при температуре $20 \pm 3^{\circ}\text{C}$, не вскрывая герметичной упаковки, не менее 6 ч до исчезновения конденсационной влаги на ее поверхности) и нетермостатированного препрега, а также проведены термоаналитические исследования обоих видов препрега на приборах DSC-204F1 и TG-209 F1 Libra фирмы Netzsch.

Термогравиметрические исследования проводили методами дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) и термогравиметрического анализа (ТГ).

На рис. 1 на кривой 4 наблюдается больше возмущений ДСК-сигнала относительно кривой 2, аналогично кривым ДТА (дифференциальный термический анализ).

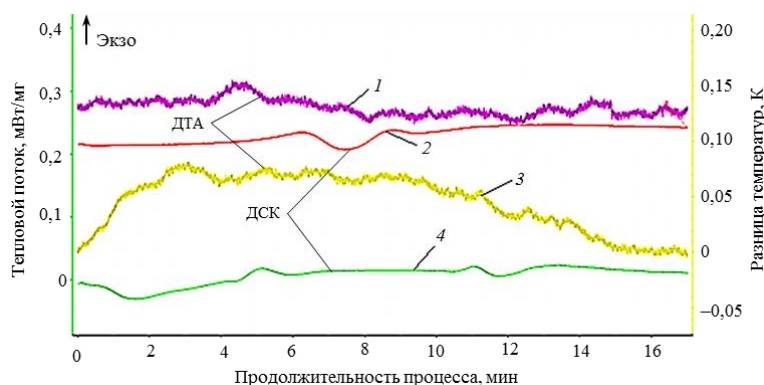


Рис. 1. Термограммы ДСК и ДТА выдержки препрегов:

1, 2 – термостатированный образец; 3, 4 – образец после морозильной камеры

На рис. 2 видно, что параметры тепловых эффектов реакций образцов отличаются в пределах погрешности измерения.

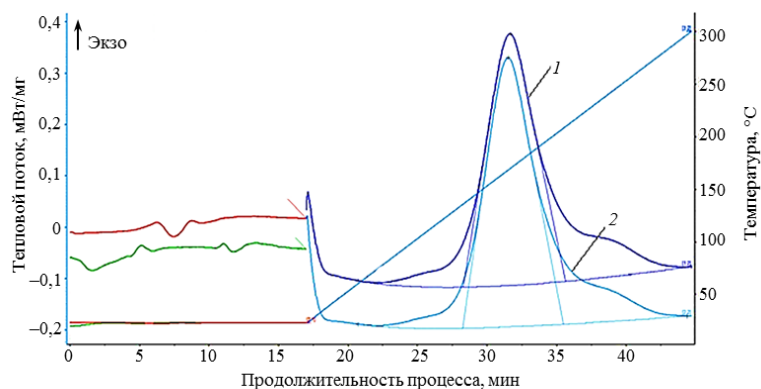


Рис. 2. Термограммы ДСК для препрега ПУ-4э-2м термостатированного (1) и после морозильной камеры (2)

Сравнение ТГ- и ДСК-кривых при нагреве со скоростью $10^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ (рис. 3) показывает различие в уменьшении массы образцов. При 50°C зафиксирован пик повышения массы у каждого образца в размере 0,25%. Причина этого, вероятнее всего, заключается в инертности измерительной системы. На это указывает кривая изменения температуры (пунктирная линия): температура в течение 3 мин стабилизировалась и вышла на линейную скорость нагрева.

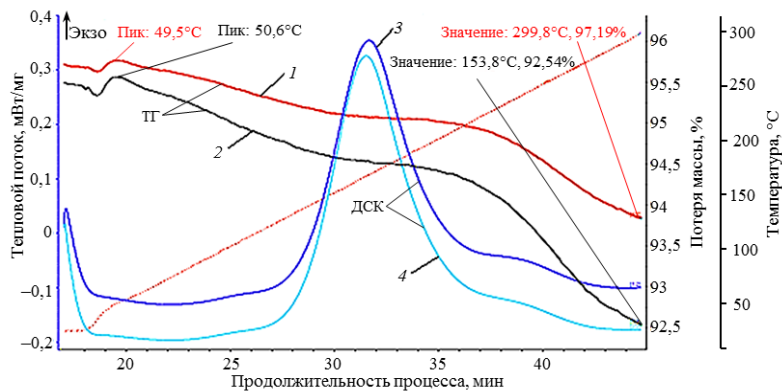


Рис. 3. Термограммы ДСК и ТГ при динамическом нагреве образцов: 1, 4 – термостатированного препрега; 2, 3 – после морозильной камеры

Из данных рис. 3 видно, что общая потеря массы (с учетом изотермы при 23°C) термостатированного образца меньше, чем у образца из морозильной камеры на 4,7%. Это объясняется наличием конденсационной влаги в образце из морозильной камеры.

При сравнении динамических сегментов кривых ДТА и ДСК (рис. 4) подтверждается эффективность разных анализов для данного материала: полиморфные превращения (без достаточного изменения массы), фиксирующиеся на кривой ДСК, не отражаются на кривых ДТА.

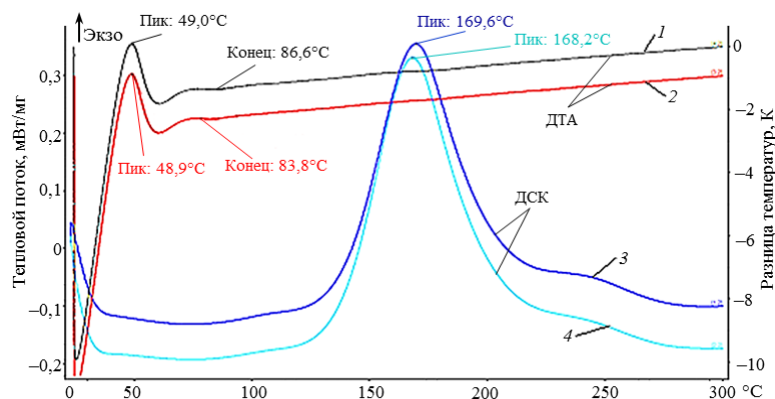


Рис. 4. Термограммы ДСК и ДТА при динамическом нагреве образцов: 1, 4 – термостатированного препрега; 2, 3 – после морозильной камеры

На кривых ДТА наблюдаются пики при температуре ~50°C, незначительная погрешность обуславливается дифференцированием кривой ТГ (рис. 3) и сглаживанием кривых на рис. 4. После температуры 60°C начинается процесс совместного испарения растворителей (ацетона и спирта), заканчивающийся при 86,6°C у термостатированного и 83,8°C – у образца после морозильной камеры. Различие завершения процессов в 5°C у образцов может быть обусловлено наличием дополнительной влаги в образцах из морозильной камеры, так как влага замедляет процесс испарения ацетона и спирта. На кривой ТГ (рис. 3) на данном участке наблюдается уменьшение массы.

В табл. 4 приведены результаты физико-механических испытаний углепластика КМУ-4э-2м, изготовленного из термостатированного при комнатной температуре препрега и препрега нетермостатированного. Формование углепластика проведено по режиму, приведенному в ТУ на материал. Рулон препрега хранился в морозильной камере при температуре не более -18°C в течение 1 мес.

Таблица 4

**Физико-механические свойства углепластика КМУ-4э-2м
на основе термостатированного и нетермостатированного препрега ПУ-4э-2м**

Показатели, обязательные для проверки	Значения по нормативной документации	Значения показателей для углепластика КМУ-4э-2м на основе	
		термостатированного препрега	нетермостатированного препрега
Предел прочности при сжатии, МПа (не менее)	900 (по ТУ)	925	840
Предел прочности при изгибе, МПа (не менее)	1200 (по ТУ)	1265	1225
Модуль упругости при изгибе, ГПа (не менее)	115 (по ТУ)	135	140
Предел прочности при растяжении, МПа (не менее)	900 (по ТУ)	910	885
Прочность при межслойном сдвиге, МПа	65 (по паспорту)	67	65
Содержание связующего, % (по массе)	38–43 (по ТУ)	41	41
Плотность, г/см ³	1,48–1,52 (по паспорту)	1,52	1,52
Толщина монослоя угле- пластика, мм	0,11–0,13 (по паспорту)	0,11	0,11
Температура стеклования матрицы в углепластике, °С (не менее)	175 (по ТУ)	178	165
Степень отверждения, %	–	99,9	99,9

Полученные данные показывают, что конденсационная влага, оставшаяся на препреге, снижает механические свойства углепластика КМУ-4э-2м, а также влияет на температуру стеклования матрицы, уменьшая ее.

Заключения

1. На примере применяемого в серийном производстве изделий авиационной техники препрега марки ПУ-4э-2м на основе эпоксидного растворного связующего ЭНФБ-2М рассмотрено влияние конденсационной влаги, образующейся при его хранении (в том числе при нарушении условий хранения) в морозильной камере, на его реакционную способность и свойства отвержденного ПКМ на его основе.

2. Изготовлена партия связующего ЭНФБ-2М и партия препрега ПУ-4э-2м на его основе, исследованы их свойства.

3. Проведены исследования влияния условий хранения препрега ПУ-4э-2м при температуре не более -18°С:

- многократной заморозки и разморозки;
- времени хранения (в течение 1 и 3 мес);
- конденсационной влаги, образующейся на препреге, в том числе и при нарушении условий его хранения (термостатирования), указанных в ТУ,

на свойства препрега ПУ-4э-2м (реакционную способность) и физико-механические свойства получаемого на его основе углепластика КМУ-4э-2м.

4. Установлено, что в течение 11 циклов разморозки препрега образующаяся влага незначительно влияет на реакционную способность связующего в препреге ПУ-4э-2м, все показатели в норме и входят в диапазон значений по ТУ. При многократной разморозке (более 11 циклов) в препрег может попадать конденсационная влага и оказывать влияние на химические процессы отверждения в полимерной матрице, снижая время гелеобразования, что впоследствии окажет влияние на физико-механические характеристики отвержденного материала.

5. Изготовлены плиты углепластика КМУ-4э-2м из препрега, хранившегося в течение 1 и 3 мес в морозильной камере при температуре -18°C . Проведены физико-механические испытания образцов в исходном состоянии и после хранения в течение 1 и 3 мес, в том числе образцов, которые подвергали ускоренным климатическим испытаниям (кипячению) с целью оценки влияния влаги на свойства отвержденного материала.

6. Установлено, что влагопоглощение углепластика КМУ-4э-2м за сутки кипячения составило 0,74%, влага повлияла на температуру стеклования пластика, тем самым уменьшив диапазон его рабочих температур.

7. Для определения влияния влаги, образующейся на поверхности препрега при извлечении его из морозильной камеры с температурой не более -18°C , изготовлены два вида углепластика КМУ-4э-2м из термостатированного и нетермостатированного препрега, проведены термоаналитические исследования обоих видов препрега и ПКМ на их основе.

8. Полученные данные показывают, что конденсационная влага, оставшаяся на препреге, снижает механические свойства углепластика КМУ-4э-2м, а также влияет на температуру стеклования матрицы, уменьшая ее.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Композиты: сегодня и завтра // Металлы Евразии. 2015. №1. С. 36–39.
2. Михайлин Ю.А. Волокнистые полимерные композиционные материалы в технике. СПб.: Научные основы и технологии, 2015. 720 с.
3. Бобович Б.Б. Полимерные конструкционные материалы (структура, свойства, применение). М.: Форум: Инфра-М, 2014. 400 с.
4. 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.
5. Тимошков П.Н. Оборудование и материалы для технологии автоматизированной выкладки препрегов // Авиационные материалы и технологии. 2016. №2 (41). С. 35–39. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-2-35-39.
6. Раскутин А.Е. Российские полимерные композиционные материалы нового поколения, их освоение и внедрение в перспективных разрабатываемых конструкциях // Авиационные материалы и технологии. 2017. №S. С. 349–367. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-349-367.
7. Баженов С.Л. Полимерные композиционные материалы. Прочность и технология. Долгопрудный: Интеллект, 2010. 352 с.
8. Тюнина А.В. Композитные материалы: производство, применение, тенденции рынка // Полимерные материалы. 2018. №2. С. 27–29.
9. Мишуров К.С., Павловский К.А., Имамединов Э.Ш. Влияние внешней среды на свойства углепластика ВКУ-27Л // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2018. №3 (63). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 24.06.2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-3-60-67.
10. Черфас Л.В., Гуняева А.Г., Комарова О.А., Антюфеева Н.В. Анализ срока годности наномодифицированного препрега при хранении по его реакционной способности // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2016. №1 (37). Ст. 12. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 24.06.2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-1-99-106.
11. Каблов Е.Н. К 80-летию ВИАМ // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2012. Т. 78. №5. С. 79–82.
12. 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.
13. Кочнова З.А. Эпоксидные смолы и отвердители: промышленные продукты. М.: Пэйнт-Медиа, 2006. 200 с.
14. Антюфеева Н.В., Алексакин В.М., Столянков Ю.В. Определение степени отверждения ПКМ методами термического анализа // Авиационные материалы и технологии. 2015. №3 (36). С. 79–83. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-3-79-83.
15. Алексакин В.М., Александрова Л.Б., Матвеева Н.В., Машинская Г.П. Применение термического анализа для контроля технологических свойств термореактивных препрегов конструкционных композиционных материалов // Авиационная промышленность. 1997. №5–6. С. 38–43.