

УДК 678.747.2

Н.В. Антюфеева¹, В.М. Алексаин¹, М.Р. Павлов¹, Ю.В. Столянков¹**ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ
УГЛЕПЛАСТИКОВ В УСЛОВИЯХ АРКТИЧЕСКОГО КЛИМАТА**

DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-4-86-94

Полимерные композиционные материалы (ПКМ) на основе углеродных волокон (углепластики) заняли важное место в ряду конструкционных материалов, что стало возможным благодаря уникально высокому уровню прочностных и упругих характеристик, высоким значениям длительной и усталостной прочности, малой ползучести и низкой плотности этого класса материалов. Приведены методические подходы к исследованию кинетики отверждения препрегов и моделированию процесса отверждения углепластиков. Исследовано влияние на эксплуатационные характеристики углепластиков внешних факторов с использованием лабораторных и натуральных методов экспозиции при повышенных (+100°C) и экстремально низких температурах (-60°C). Исследования показали, что углепластики сохраняют свои механические свойства при низких температурах (-60°C) и могут быть рекомендованы в качестве строительных конструкций в условиях арктического климата.

Ключевые слова: углепластики, Арктика, кинетика отверждения, климатические и механические испытания.

Carbon fiber reinforced polymers (CFRP) have taken important place among constructional materials that became possible thanks to unique high level of strength and elastic characteristics, high values of long and fatigue resistance, small creep and low density of this class of materials. In the article methodical approaches are given to research curing kinetics of prepregs and to model curing process of carbon fiber reinforced polymers. Influence of external factors on operation properties of carbon fiber reinforced polymers has been studied using laboratory and environmental methods of exposure at high (+100°C) and extremely low temperatures (-60°C). Researches have shown that carbon fiber reinforced polymers keep their mechanical properties at low temperatures (-60°C) and can be recommended as building structures in the conditions of the Arctic climate.

Keywords: carbon fiber reinforced polymers, Arctic region, curing kinetics, climatic and mechanical tests.

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

Работа выполнена в рамках реализации программы РФ-Арктика (тема №14-33-00032 (РНФ)), раздел ССВ-068 «Анализ функциональной конкурентоспособности разработанных материалов на отечественном и мировом рынках».

Углепластики в авиационном материаловедении заняли важное место в ряду конструкционных материалов, что стало возможным благодаря уникально высокому уровню прочностных и упругих характеристик, высоким значениям длительной и усталостной прочности, малой ползучести и низкой плотности этого класса материалов [1–3].

Отличительной особенностью углепластиков как представителей композиционных материалов является гетерогенность системы. Поэтому при выборе материала применительно к условиям эксплуатации важной является оптимизация состава исходных компонентов: вида и текстуры армирующего наполнителя, типа полимерной матрицы, их взаимодействия на этапе получения

полуфабрикатов и в процессе формирования материала. Состав и соотношение этих компонентов влияют на уровень и соотношение упругих, прочностных и деформационных свойств полимерных композиционных материалов (ПКМ) и их проявление в различных условиях эксплуатации: климатических условиях и при воздействии внешних нагрузок [4, 5].

В связи с растущим применением в строительных конструкциях высокомодульных ПКМ, в первую очередь – углепластиков, необходима оценка их стойкости к воздействию различных сред (температура, влага, циклическое изменение температуры и влажности, топливо, гидрожидкость, масла и т. д.). Провести точную оценку влияния различных сред в условиях, приближающихся к эксплуатационным, – очень сложная задача, поскольку долговечность материалов при совместном воздействии агрессивной среды, температуры и нагрузки является комплексной функцией природы и состава материала, вида и концентрации

агрессивной среды, температуры и характера приложенной нагрузки. В настоящее время общепринятым является в качестве критерия химической стойкости материала использовать кроме гравиметрии изменение одного или нескольких физико-механических показателей. В частности, для слоистых ПКМ используются наиболее чувствительные характеристики – прочность при сжатии и межслойном сдвиге [5].

При исследовании влияния на эксплуатационные характеристики материалов внешних факторов с использованием ускоренных методов особое внимание уделялось их работоспособности при повышенных температурах. В нормативной документации на материалы наиболее полные данные приведены о показателях механических свойств при комнатной температуре, в то же время при выборе материалов для их эксплуатации в климатических условиях с экстремально низкими температурами важно иметь информацию об упруго-деформационных свойствах этих углепластиков [6–11]. Используемая в данной работе полимерная матрица, по мнению разработчиков, отличается тем, что сочетает повышенную теплостойкость и устойчивость к воздействию ударных нагрузок. Таким образом, вероятно, что она будет наиболее надежно проявлять себя при эксплуатации ПКМ в экстремальных климатических условиях Арктики. Для подтверждения этого предположения проведены исследования влияния компонентов ПКМ на формирование трехмерной сетчатой структуры и свойств отвержденной полимерной матрицы в процессе ее переработки в изделие. Проведен также комплекс физико-механических испытаний образцов материалов в исходном состоянии и после экспозиции в условиях ускоренного старения при повышенных (+100°C) и экстремально низких температурах (-60°C).

Материалы и методы

Для оценки устойчивости ПКМ при эксплуатации в экстремальных условиях холодного климата выбраны следующие объекты исследования: эпоксидное связующее марки ВСЭ-1212, импортные углеродные наполнители (углеродные жгуты номиналов 3К, 12К, 24К производства КНР), препреги и углепластики на основе связующего ВСЭ-1212 и углеродных наполнителей.

При исследовании этих объектов применяли следующие методы:

- термический анализ (ДСК, ТМА) для исследования взаимодействия связующего ВСЭ-1212 с различными углеродными наполнителями производства КНР;
- методики, приведенные в ГОСТ 29104.1–91, для исследования образцов углеродных тканей;
- методики, приведенные в ТУ1-595-11-1407–2013 «Нити (жгуты) углеродные. Технические усло-

- вия», для исследования образцов микропластиков;
- термовлажностные исследования образцов углепластиков при экспозиции в стационарных условиях в течение 3 мес при повышенной температуре (40°C) и относительной влажности 98%;
- термоциклирование образцов углепластиков при воздействии перепадов температуры от -60 до +100°C методом двух камер (5 циклов изменения температуры с выдержкой по 1 ч);
- определение механических свойств углепластиков при сжатии (ГОСТ 25.602–80), изгибе (ГОСТ 25.604–82), растяжении (ГОСТ 25.601–80) и сдвиге (ГОСТ 32659–2014).

Результаты и обсуждение

Для разработки углепластиков и исследования их механических и эксплуатационных свойств выбрано эпоксидное связующее ВСЭ-1212 и жгуты наполнители номиналов 3К, 12К, 2К производства КНР. Изучено взаимодействие связующего ВСЭ-1212 с выбранными углеродными жгуты наполнителями методами термического анализа.

Исследование влияния жгутовых углеродных наполнителей (производство КНР) на процесс отверждения связующего ВСЭ-1212 проводили с помощью метода дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК), руководствуясь методикой, изложенной в ММ1.595-11-414–2010, на приборе DSC-1 [11–14]. Образцы препрегов для предварительных испытаний изготавливали с помощью ручной пропитки жгутового углеродного армирующего наполнителя расплавом связующего. Избыток связующего отжимали в прессе при температуре 60°C и давлении 2 МПа. Испытания проводили в интервале температур от -70 до +370°C при постоянной скорости нагрева 10°C/мин. Анализ термограмм ДСК показал, что при нагревании образца в интервале температур от -50 до +20°C происходит переход связующего из стеклообразного в вязкотекучее состояние, который сопровождается скачкообразным изменением теплоемкости. Температура стеклования образцов препрегов, изготовленных на основе разных типов углеродного наполнителя, составила от -17 до -12°C. Реакция отверждения связующего в препреге в условиях заданного режима нагрева протекает в интервале температур 125–300°C и сопровождается значительным экзотермическим тепловым эффектом, величина которого составила 130±4 Дж/г, температура пика отверждения для всех препрегов равна 215,2±0,2°C [15, 16]. Термограмма процесса отверждения связующего приведена на рис. 1.

На установке MICROSAM изготовлены препреги углепластиков на жгутовых наполнителях и исследованы их технологические свойства (массовая доля связующего и его реакционная способность в препреге).

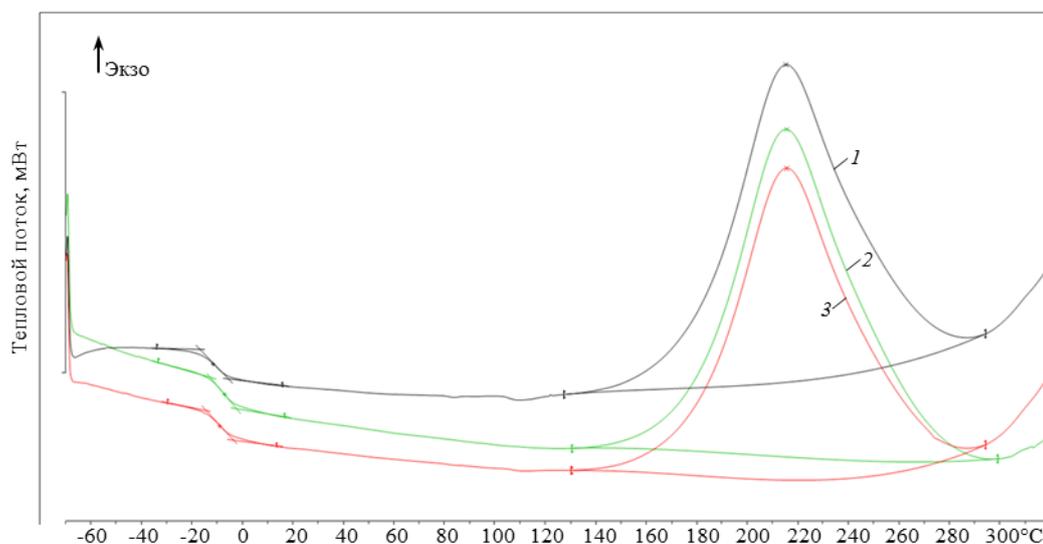


Рис. 1. Термограмма ДСК для определения реакционной способности связующего ВСЭ-1212 в препрегах на основе углеродных жгутовых наполнителей производства КНР номиналов 3К (1), 12К (2) и 24К (3)

Контроль качества изготовленного препрега осуществляли методом ДСК на приборе DSC-1 по приведенной выше методике. Испытания проводили в интервале температур от -70 до $+370^\circ\text{C}$ при постоянной скорости нагрева $10^\circ\text{C}/\text{мин}$. Результаты испытаний приведены в табл. 1.

Реологические свойства препрегов на основе жгутов номиналов 3К, 12К, 24К производства КНР определяли методом термомеханического анализа (ТМА) по ММ1.595-11-138-2002 на термоанализаторе TMA/SDTA840 (Швейцария). Исследования проводили при температуре $150 \pm 0,5^\circ\text{C}$ в условиях воздействия переменной сжимающей нагрузки с частотой 1 Гц (режим ДМА). Определили характеристики стадии гелеобразования, которые позволяют оценить особенности хемореологических свойств исследованных препрегов на различных жгутовых углеродных наполнителях [17, 18]. Из готового препрега вырезали образец размером 5×5 мм, прокатали валиком между двумя слоями тонкой алюминиевой фольги, которую затем обрезали по краям, оставляя запас на расстоянии 1 мм от кромок образца.

Время гелеобразования связующего в препреге определяли по термограммам ТМА по значению времени в точке пересечения касательных, проведенных к начальному линейному участку кривой ТМА, и в точке, соответствующей максимальной скорости роста динамического модуля упругости. Для образцов препрегов, изготовленных на основе разных наполнителей, это значение практически одинаково и составляет $34,0 \pm 0,2$ мин. Результаты испытаний приведены в табл. 2 и на термограмме ТМА (рис. 2).

Выбор технологических режимов отверждения жгутовых препрегов для изготовления углепластиков методом автоклавного формования

Для подбора режима отверждения исследовали кинетику отверждения связующего в образцах препрега с использованием результатов ДСК, полученных в соответствии с методикой ММ1.595-11-414-2010. Кривые ДСК снимали при трех скоростях нагрева 5; 10 и $20^\circ\text{C}/\text{мин}$. С помощью программ PeakSeparation и Kinetics-3.1 определены: количество элементарных стадий, обобщенная схема реакции отверждения и рассчитаны кинетические параметры для каждой из элементарных стадий [16].

Анализ изображения кривой ДСК с помощью программы PeakSeparation (рис. 3) показал, что процесс отверждения можно представить как двухстадийную реакцию. Для каждого пика, соответствующего элементарной стадии, с помощью программы Kinetics-3.1 рассчитаны кинетические параметры, которые затем скорректированы при подстановке в уравнение обобщенной кинетической модели. Полученные результаты представлены в табл. 3.

Эти данные использованы для решения обратной задачи – при построении расчетных кривых ДСК для тех же скоростей нагрева, при которых проводили реальные эксперименты.

Хорошее совпадение расчетных и экспериментальных данных ДСК при трех скоростях нагрева (рис. 4) свидетельствует об адекватности полученной обобщенной кинетической модели [17].

При формовании изделий из терморезистивных полуфабрикатов прессовым или автоклавным методом большое значение придается выбору момента приложения давления [18–20].

Таблица 1

Технологические свойства связующего марки ВСЭ-1212 в препреге с различными углеродными жгутовыми наполнителями

Свойства	Средние значения свойств для жгутов номиналов		
	3К	12К	24К
Тепловой эффект, Дж/г	126,3	129,8	134,2
Температура начала отверждения, °С	177,6	177,8	177,3
Температура пика, °С	215,3	215,6	215,7
Температура стеклования, °С	-11,5	-9,1	-7,0
Массовая доля связующего, %	36,8	36,3	36,5

Таблица 2

Результаты определения времени гелеобразования связующего ВСЭ-1212 в препреге на основе углеродных наполнителей производства КНР при 150°С

Углеродный наполнитель (жгут)	Время гелеобразования (среднее значение), мин
3К	34,0
12К	33,9
24К	34,2

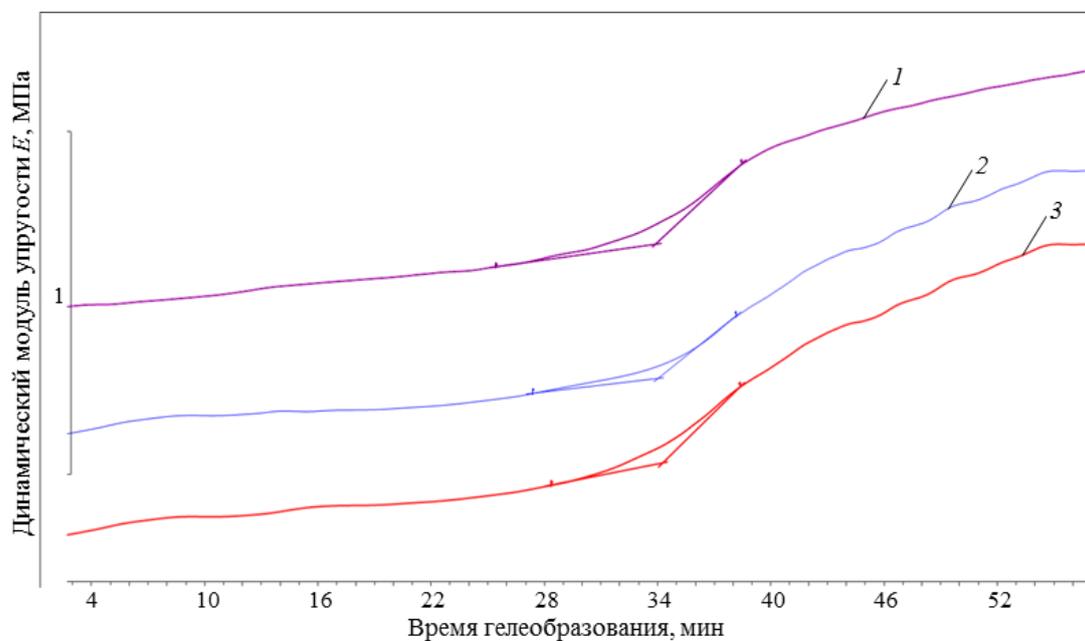


Рис. 2. Термограмма ТМА для определения времени гелеобразования связующего ВСЭ-1212 в препрегах на основе жгутовых углеродных наполнителей производства КНР номиналов 3К (1), 12К (2) и 24К (3)

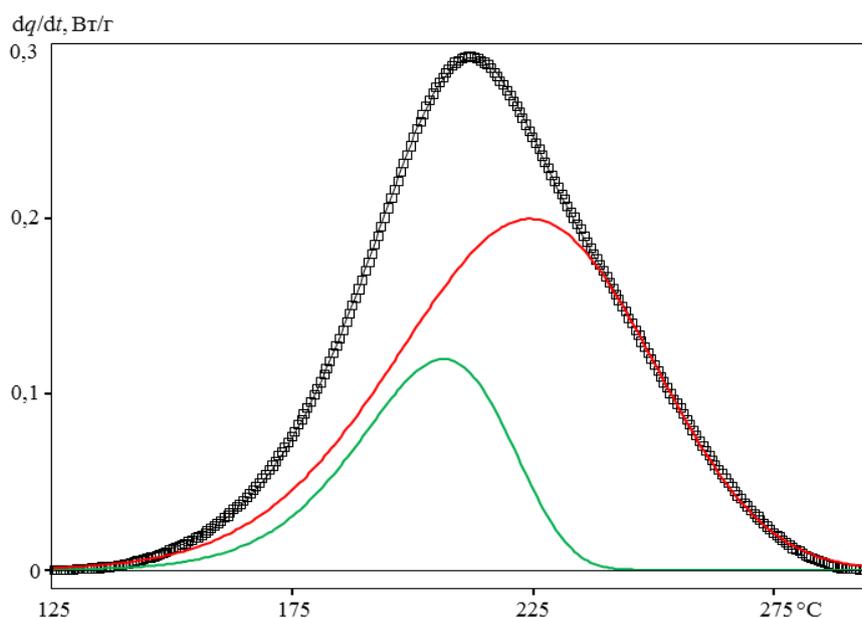


Рис. 3. Разделение пика ДСК на элементарные стадии с помощью программы PeakSeparation: — первая стадия; — вторая стадия; — обобщенная кривая

Таблица 3

Кинетические параметры реакции отверждения связующего в препреге

Кинетические параметры	Значения кинетических параметров	
	1-я стадия	2-я стадия
Предэкспоненциальный множитель $\log K_0, c^{-1}$	4,417	4,606
Энергия активации $E, кДж/моль$	58,949	67,347
Порядок реакции n	2,364	0,879
Константа автокатализа a	0,798	0,135
Кинетическая модель реакции отверждения	Prout-Tompkins n -го порядка с автокатализом	

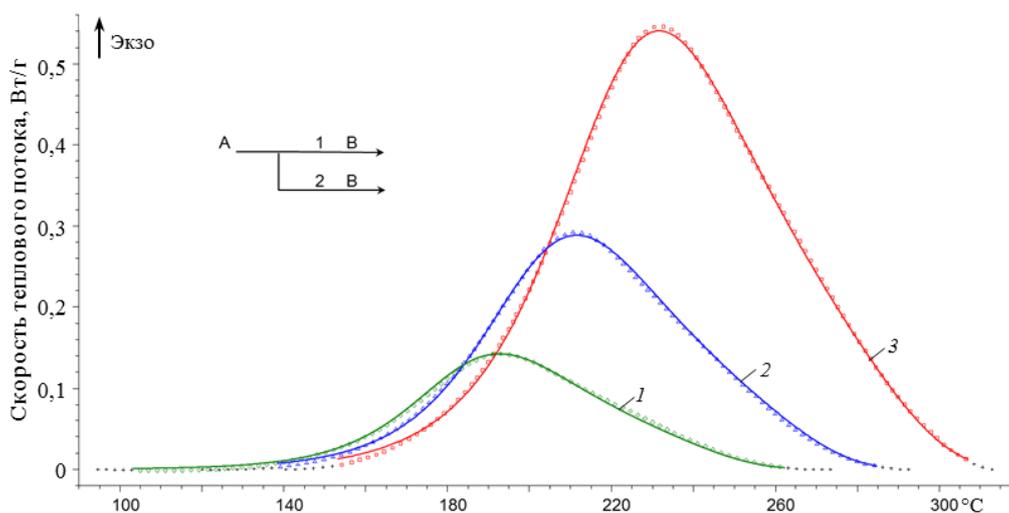


Рис. 4. Расчетные (—) и экспериментальные кривые ДСК процесса отверждения образцов препрега на основе углеродных наполнителей при скорости нагрева 5 (1); 10 (2) и 20°C/мин (3)

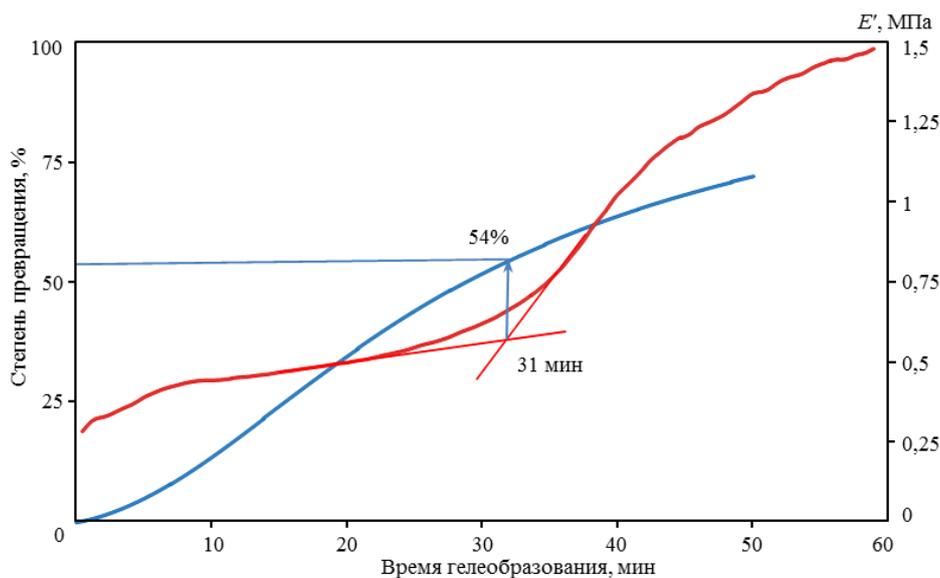


Рис. 5. Определение степени превращения (—) в точке гелеобразования по результатам ТМА и ДСК в изотермических условиях (— динамический модуль упругости E')

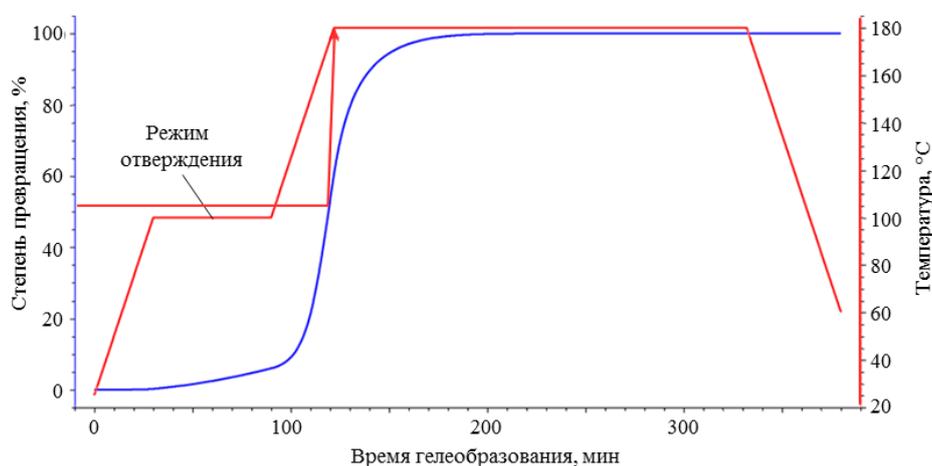


Рис. 6. Расчетная кривая режима отверждения препрега состава ВСЭ-1212/углеродный жгут (стрелкой обозначена точка гелеобразования)

Преждевременная подача давления может привести к чрезмерному отжиму связующего из формуемого полуфабриката и снижению качества склейки слоев в готовом изделии. Запаздывание с приложением давления приводит к недопрессовке и снижению плотности материала в готовом изделии. Поэтому важной технологической характеристикой связующего в термореактивных полуфабрикатах является точка гелеобразования. Этот показатель является ориентиром для технологов, обеспечивающим гарантированное качество при формировании изделия. Вместе с тем в условиях сложного многоступенчатого технологического цикла, при чередовании динамического нагрева с изотермическими выдержками этот момент трудно определить. С помощью программы Kinetics-3.1 можно выполнить прогнозирование момента ге-

леобразования в условиях заданного температурно-временного цикла. Для этого необходимо определить значение степени превращения в точке гелеобразования и рассчитать положение этой точки на расчетной диаграмме температурно-временной зависимости степени превращения в условиях заданного технологического цикла. На рис. 5 сведены вместе результаты полученной экспериментально методом ТМА изотермы изменения динамического модуля упругости при температуре 150°C и рассчитанной по программе Kinetics-3.1 по данным ДСК зависимости степени превращения связующего в препреге в тех же условиях.

На рис. 6 представлена графически прогнозируемая температурно-временная зависимость степени превращения связующего в препреге в отвержденную полимерную матрицу в условиях

Таблица 4

Сведения по механическим испытаниям углепластиков

Вид испытания	Наименование испытаний	База испытаний	Испытательная машина	Скорость испытания, мм/мин
Трехточечный изгиб (ГОСТ 25.604–82)	Методы механических испытаний композиционных материалов с полимерной матрицей (композитов). Метод испытания на изгиб при нормальной, повышенной и пониженной температурах	40 толщин (40×Н)	Walter+Bai LFM-100	5
Растяжение (ГОСТ 25.601–80)	Методы механических испытаний композиционных материалов с полимерной матрицей (композитов). Метод испытания плоских образцов на растяжение при нормальной, повышенной и пониженных температурах	200 мм	Walter+Bai LFM-100	5
Сжатие (ГОСТ 25.602–80)	Методы механических испытаний композиционных материалов с полимерной матрицей (композитов). Метод испытания на сжатие при нормальной, повышенной и пониженной температурах	4÷5 толщин	Zwick Z-100	5
Межслойный сдвиг (ГОСТ 32659–2014)	Композиты полимерные. Методы испытаний. Определение кажущегося предела прочности при межслойном сдвиге методом короткой балки	5 толщин	Zwick Z-100	1

Таблица 5

Механические свойства углепластиков на основе связующего ВСЭ-1212 и углеродных жгутов (производство КНР) в исходном состоянии и после воздействия термоциклирования и тепловлажностного старения

Свойства	Значения свойств углепластиков на основе углеродных жгутов номиналов		
	3К	12К	24К
В исходном состоянии			
Предел прочности при растяжении, МПа	2130	2174	2186
Модуль упругости при растяжении, ГПа	118	130	134
Предел прочности при изгибе, МПа	1317	1320	1335
Модуль упругости при изгибе, ГПа	112	110	116
Предел прочности при сжатии, МПа	1185	1190	1212
Предел прочности при сдвиге (межслойный), МПа	87	87	87
После термоциклирования (5 циклов – от -60 до +100°C с выдержкой по 1 ч)			
Предел прочности при растяжении, МПа	2125	2170	2182
Модуль упругости при растяжении, ГПа	110	118	130
Предел прочности при изгибе, МПа	1300	1310	1330
Модуль упругости при изгибе, ГПа	110	105	110
Предел прочности при сжатии, МПа	1180	1185	1200
Предел прочности при сдвиге (межслойный), МПа	85	85	83
После термовлажностного старения в течение 3 мес в климатической камере при температуре 40°C и влажности 98%			
Предел прочности при растяжении, МПа	2120	2168	2180
Модуль упругости при растяжении, ГПа	112	115	131
Предел прочности при изгибе, МПа	1308	1310	1325
Модуль упругости при изгибе, ГПа	105	100	116
Предел прочности при сжатии, МПа	1174	1180	1205
Предел прочности при сдвиге (межслойный), МПа	83	82	85

выбранного режима с конечной температурой отверждения $180 \pm 5^\circ\text{C}$.

По разработанному режиму формования изготовлены плиты углепластиков размером $500 \times 500 \times 2$ мм. С помощью фрезерного станка изготовлены образцы из углепластиков для испытаний их механических свойств при сжатии (ГОСТ 25.602–80), изгибе (ГОСТ 25.604–82), растяжении (ГОСТ 25.601–80) и сдвиге (ГОСТ 32659–2014) [21–23].

Исследовали изменения механических свойств образцов в исходном состоянии и после термоциклирования (5 циклов при температуре от -60 до $+100^\circ\text{C}$), а также термовлажностного старения в течение 3 мес в климатической камере при температуре 40°C и влажности 98% [24–27].

Механические испытания углепластиков проводили согласно ГОСТ. В табл. 4 приведены сведения по механическим испытаниям углепластиков – ГОСТы, испытательные машины, скорости нагружения, базы испытаний.

Результаты испытаний механических свойств углепластиков приведены в табл. 5.

Заключения

В результате проделанной работы изучено взаимодействие углеродных армирующих наполнителей различных номиналов (3К, 12К, 24К) с эпоксидным связующим расплавленного типа

ВСЭ-1212 при формировании ПКМ. Показано, что указанные армирующие наполнители не влияют на процесс отверждения связующего в составе препрегов. Исследована кинетика отверждения связующего в препреге, рассчитаны кинетические параметры реакции отверждения. На основе расчета кинетических данных построена модель реакции и выбран режим отверждения углепластика. Изготовлены плиты из углепластиков и исследованы их механические свойства. Исследовано влияние на эксплуатационные характеристики углепластиков внешних факторов с использованием лабораторных и натуральных методов экспозиции при повышенных ($+100^\circ\text{C}$) и экстремально низких температурах (-60°C), а также термовлажностного старения в течение 3 мес в климатической камере при температуре 40°C и влажности 98%). Проведенные исследования показали, что значения механических свойств углепластиков после термоциклирования и термовлажностного старения снизились незначительно – на $\sim 10\%$. Но для рекомендации углепластиков к эксплуатации в условиях арктического и субарктического климата в строительных и нагруженных конструкциях необходимы дополнительные длительные испытания образцов в течение нескольких лет в этих условиях.

ЛИТЕРАТУРА

1. 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.
2. Гращенков Д.В., Чурсова Л.В. Стратегия развития композиционных и функциональных материалов // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №S. С. 231–242.
3. Соколов И.И., Раскутин А.Е. Углепластики и стеклопластики нового поколения // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2013. №4. Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 15.03.2016).
4. Гуняев Г.М., Чурсова Л.В., Раскутин А.Е., Гуняева А.Г. Конструкционные полимерные углеродные композиты – новое направление материаловедения // *Все материалы*. 2012. №12. С. 2–9.
5. 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.
6. Бузник В.М., Каблов Е.Н., Кошурина А.А. Материалы для сложных технических устройств арктического применения // *Научно-технические проблемы освоения Арктики: сб. М.: Наука*, 2015. С. 275–285.
7. Петрова А.П., Дементьева Л.А., Куцевич К.Е., Бузник В.М. О возможности использования материалов на основе клеевых препрегов в арктических условиях // *Клеи, герметики, технологии*. 2015. №8. С.12–16.
8. Петрова А.П., Шарова И.А., Лукина Н.Ф., Бузник В.М. Возможности применения клеев в арктических условиях // *Клеи. Герметики. Технологии*. 2015. №7. С. 10–15.
9. Каблов Е.Н., Старцев О.В., Кротов А.С., Кириллов В.Н. Климатическое старение композиционных материалов авиационного назначения. II. Релаксация исходной структурной неравновесности и градиент свойств по толщине // *Деформация и разрушение материалов*. 2012. №6. С. 17–19.
10. 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.
11. Кириллов В.Н., Голиков Н.И., Попов В.Н., Ефимов В.А., Барботько С.Л. Проведение натурных испытаний материалов в условиях холодного климата Якутии // *Сб. докл. III Евразийского симпозиума по проблемам прочности материалов и машин для регионов холодного климата*. Якутск, 2006. С. 57–60.
12. Антюфеева Н.В., Алексашин В.М., Железина Г.Ф., Столянков Ю.В. Методические подходы термоана-

- литических исследований для оценки свойств препрегов и углепластиков // Все материалы. Энциклопедический справочник: приложение. 2012. №4. С. 18–27.
13. Антюфеева Н.В., Столянков Ю.В., Исходжанова И.В. Исследование и оценка свойств полимерных композиционных материалов по методикам, гармонизированным с международными стандартами // Конструкции из полимерных композиционных материалов. 2013. №3. С. 41–45.
 14. Антюфеева Н.В., Комарова О.А., Павловский К.А., Алексахин В.М. Опыт применения калориметрического контроля реакционной способности препрега КМУ-11тр // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2014. №2. Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 15.03.2016). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-2-6-6.
 15. Гуляев А.И., Журавлева П.Л., Филонова Е.В., Антюфеева Н.В. Влияние отвердителя каталитического действия на морфологию микроstructures эпоксидных углепластиков // Материаловедение. 2015. №5. С. 41–46.
 16. Антюфеева Н.В., Алексахин В.М., Столянков Ю.В. Современное методическое обеспечение термоаналитических исследований полимерных композитов и препрегов // Композиты и наноструктуры. 2014. Т. 6. №3. С. 176–184.
 17. Куцевич К.Е., Алексахин В.М., Петрова А.П., Антюфеева Н.В. Исследование кинетики реакций отверждения клеевых связующих // Клеи. Герметики. Технологии. 2014. №11. С. 27–31.
 18. Панина Н.Н., Ким М.А., Гуревич Я.М., Григорьев М.М., Чурсова Л.В., Бабин А.Н. Связующие для безавтоклавного формования изделий из полимерных композиционных материалов // Клеи. Герметики. Технологии. 2013. №10. С. 27–35.
 19. Мухаметов Р.Р., Ахмадиева К.Р., Ким М.А., Бабин А.Н. Расплавные связующие для перспективных методов изготовления ПКМ нового поколения // Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 260–265.
 20. Душин М.И., Хрульков А.В., Мухаметов Р.Р., Чурсова Л.В. Особенности изготовления изделий из ПКМ методом пропитки под давлением // Авиационные материалы и технологии. 2012. №1. С. 18–26.
 21. Столянков Ю.В., Исходжанова И.В., Антюфеева Н.В. К вопросу о дефектах образцов для испытаний углепластиков // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2014. №10. Ст. 10. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 17.03.2016). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-10-10-10.
 22. Исходжанова И.В., Быщенко О.А., Антюфеева Н.В., Столянков Ю.В. Оценка влияния различных видов реза на качество поверхности образцов из полимерных композиционных материалов методом количественного анализа видеоизображений // Композиты и наноструктуры. 2014. Т. 6. №4. С. 238–244.
 23. Антюфеева Н.В., Журавлева П.Л., Алексахин В.М., Куцевич К.Е. Влияние степени отверждения связующего на физико-механические свойства углепластика и микроstructure межфазного слоя углеродное волокно/матрица // Клеи. Герметики. Технологии. 2014. №12. С. 26–30.
 24. Ильичев А.В., Раскутин А.Е. Исследование влияния концентратора напряжений на напряженно-деформационное состояние углепластика методом корреляции цифровых изображений // Авиационные материалы и технологии. 2014. №3. С. 62–66. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-3-62-66.
 25. Большаков В.А., Кондрашов С.В., Меркулова Ю.И., Дьячкова Т.П., Юрков Г.Ю., Ильичев А.В. Исследование свойств наномодифицированных углекомполитов до и после термовлажностного старения // Авиационные материалы и технологии. 2015. №2 (35). С. 61–66. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-2-61-66.
 26. Ильичев А.В., Раскутин А.Е., Гуляев И.Н. Сравнение геометрических размеров образцов ПКМ, используемых в международных стандартах ASTM и отечественных ГОСТ // Новости материаловедения. Наука и техника: электрон. науч.-технич. журн. 2015. №4. Ст. 05. URL: <http://www.materialnews.ru> (дата обращения: 17.03.2016).
 27. Ильичев А.В. Сравнение стандартов ГОСТ и ASTM для проведения механических испытаний ПКМ на растяжение // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2015. №8. С. 2–9.