

УДК 667.621:678.8

К.А. Павловский¹, Г.А. Ямщикова¹, А.Г. Гуняева¹, М.Ю. Улькин¹**РАЗРАБОТКА СВЯЗУЮЩЕГО, НЕ ПОДДЕРЖИВАЮЩЕГО ГОРЕНИЕ УГЛЕПЛАСТИКА, ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ТОЛСТОСТЕННЫХ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПКМ МЕТОДОМ ПРЕССОВОГО ФОРМОВАНИЯ**

DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-4-8-8

Приведен обзор по применению различных веществ для снижения горючести полимерных материалов. Представлены результаты исследований по разработке связующего, не поддерживающего горение углепластика. Представлены результаты исследований по разработке и оптимизации режимов изготовления образцов углепластика различной толщины. Проведены исследования электрофизических, термо- и физико-механических характеристик образцов углепластика.

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 13.1. «Связующие для полимерных и композиционных материалов конструкционного и специального назначения» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [1].

Ключевые слова: полимерные композиционные материалы, эпоксидное связующее, углеродный наполнитель, препрег, углепластик, пожаробезопасность, опорные плиты.

The overview on application of different substances for decrease in combustibility of polymeric materials is provided. Results of researches on development of binding, not sustaining combustion of CFRP are provided. Results of researches on development and optimization of manufacture modes of CFRP samples of different thickness are provided. Researches of electrophysical, thermo – and physicomachanical characteristics of samples of CFRP are conducted.

Work is executed within implementation of the complex scientific direction 13.1. «Binding for polymeric and composite materials of structural and special purpose» («The strategic directions of development of materials and technologies of their processing for the period till 2030») [1].

Keywords: polymeric composite materials, epoxy binding, CFRP, prepreg, carbon, fire safety, bearing plates.

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

В настоящее время современное авиа-, машиностроение и другие отрасли промышленности немыслимы без композиционных материалов [2]. В последние десятилетия интенсивно развивается наука о композиционных материалах, и современное материаловедение в значительной мере посвящено изучению именно композиционных материалов [1, 3].

На базе одного полимера можно создать большое количество различных композитов. Их разнообразие определяется химической природой, размерами, формой и количеством дисперсной фазы, а также характером взаимодействия фаз на границе раздела [4]. С целью создания материалов с заданными свойствами базовые полимеры смешивают с другими веществами. Как правило, современные полимерные материалы являются многокомпонентными системами, в которых наряду с полимерной основой

присутствуют различные добавки. Содержание добавок в полимерной композиции может изменяться в очень широких пределах. В зависимости от поставленной задачи выбирается вид добавки и его природа [5].

В данной работе стояла задача создания полимерных связующих, не поддерживающих горение полимерных композиционных материалов (ПКМ) [6]. Для предотвращения возникновения пожара или существенного ограничения его распространения большое значение приобретают противопожарная профилактика и применение огнезащитных материалов, изделий и пр. [7]. Эффективным способом повышения пожаробезопасности изделий или конструкций является создание и применение ПКМ пониженной горючести [8, 9].

При разработке полимерных материалов пониженной горючести можно выделить следующие направления: синтез негорючих полимеров, введение наполнителей, применение антипиренов, комбинирование различных способов получения материалов пониженной горючести, основанных на требованиях в отношении их технологических показателей, стоимости и т. д. Анализ научной литературы о применении различных веществ для снижения горючести полимерных материалов показывает, что к антипиренам обычно относят неорганические и органические вещества, которые содержат в своих молекулах такие элементы, как галогены, фосфор, азот, бор, металлы, группировки с тем или иным сочетанием этих элементов [9–11]. Существует условное разделение антипиренов на две группы – инертные и реакционноспособные. Инертные антипирены по объему потребления занимают ведущее положение. Среди них на первом месте стоят оксиды, гидроксиды и соли металлов, затем идут производные на основе фосфорной кислоты и галогенсодержащие соединения. Реакционноспособные антипирены в большинстве своем являются органическими или элементоорганическими соединениями. Введение инертного антипирена в композицию может быть осуществлено на стадии переработки полимеров в изделия без изменения технологии производства материалов. Это существенно расширяет возможности создания новых материалов. В то же время инертные антипирены имеют значительный недостаток – они в большей степени влияют на физико-химические свойства и термостабильность полимерных материалов [12]. Круг используемых материалов для создания полимерной матрицы в рамках работы был ограничен с учетом некоторых принципов, включающих следующие параметры отбора ингредиентов: доступность и невысокая стоимость, пониженная токсичность, невысокая экзотермичность реакции отверждения. Оптимальный выбор исходных компонентов позволяет: получить связующее с необходимой исходной вязкостью [13], которая будет способствовать хорошей пропитке волокнистого наполнителя; сбалансировать технологические свойства композиции, с возможностью получения ПКМ с необходимыми физико-механическими и термомеханическими характеристиками. Наиболее распространенными смолами, используемыми при производстве ПКМ, являются эпоксидные смолы – один из лучших видов связующих для большого числа волокнистых композитов, что объясняется следующими причинами:

- хорошей адгезией к большому числу наполнителей, армирующих компонентов и подложек;
- разнообразием доступных эпоксидных смол и отверждающих агентов, позволяющим получить после отверждения материалы с широким сочетанием свойств для удовлетворения различных требований технологии;
- отсутствием выделения воды или каких-нибудь летучих веществ в ходе химической реакции и небольшими усадочными явлениями при отверждении;
- химической стойкостью и хорошими электроизоляционными свойствами.

Для снижения горючести эпоксидных смол в них вводят атомы галогенов и фосфора. С этой целью для синтеза эпоксидных смол используют галоген- и фосфорсодержащие мономерные и олигомерные диолы или содержащие галоген отверждающие агенты.

Материалы и методы

Выбор типа полимерного связующего для процесса прессового формования ПКМ является важнейшим этапом данной работы, так как тип связующего частично или полностью определяет ряд эксплуатационных свойств изделий, таких как химическая и влагостойкость, горючесть, эластичность и пр. [14, 15].

В качестве полимерной основы выбраны галогенсодержащие эпоксидные смолы марок ЭХД и УП-631, которые широко используются в качестве составных негорючих связующих.

В качестве отверждающего агента выбран ароматический диамин – диаминодифенилсульфон, который является твердым компонентом, обеспечивающим высокие прочностные характеристики создаваемых материалов [16].

С целью улучшения технологических характеристик разрабатываемой композиции использован деаэратор для эпоксидных систем на основе кремнийорганических соединений марки ВУК А-530. Деаэратор способствует выводу воздушных пузырьков из объема полимерной массы, тем самым снижая пористость изготавливаемого ПКМ.

Анализ литературных источников, научно-технической документации и международных стандартов позволил выбрать наиболее эффективные методы и режимы исследования образцов препрегов и углепластиков, обеспечивающие гармонизацию отечественных методик с зарубежными аналогами. К ним можно отнести широко применяемые в международной экспериментально-методической практике физико-химические методы анализа. Наибольшее распространение среди них получили методы термического анализа и, в частности, дифференциальная сканирующая калориметрия (ДСК).

Метод ДСК [17] в соответствии с ISO 6721-1-10 и ГОСТ 2812–83 применяют для определения температуры стеклования (T_g), температурных характеристик (T_0 , T_{max} и теплового эффекта ΔH) реакции отверждения связующего в составе препрега.

Для проведения работ могут быть использованы калориметры, производимые фирмами Netzsch (Германия), Setaram, Comef (Франция), Mettler Toledo (Швейцария), Intertech Corp. (США), либо иное аналогичное оборудование.

В методике приведены рекомендуемые параметры испытаний, размеры и навески образцов для испытания, описаны основные принципы обработки результатов испытаний образцов препрегов: скорость нагрева $10^\circ\text{C}/\text{мин}$; температурный интервал определяют по результатам предварительных испытаний – рекомендуемые значения: от -70 до $+300^\circ\text{C}$ (для большинства эпоксидных связующих), до $+350^\circ\text{C}$ (для фенолформальдегидных и эпоксидных связующих с повышенной теплостойкостью) и до $+400^\circ\text{C}$ (для циануратных и бис-малеинимидных связующих); испытания проводят в динамической воздушной среде при скорости продувки 50 мл/мин, но если термоокислительная деструкция начинается до завершения реакции отверждения в ходе эксперимента, влияя тем самым на результаты определения теплового эффекта, то испытания проводят в динамической среде инертного газа (гелия или азота).

Для проведения испытаний вырезают несколько слоев препрега размером 4×4 мм, чтобы навеска образца составляла ~ 14 мг. Кривую ДСК процесса отверждения связующего представляют в виде графика температурной зависимости скорости теплового потока dq/dt (тепловой мощности W , W/m).

Температуру стеклования T_c неотвержденного образца связующего определяют по термограмме ДСК как температуру, соответствующую эндотермическому скачкообразному изменению тепловой мощности.

Температурные характеристики реакции отверждения (температуры: начала пика T_s , максимума T_{max} , конечная T_f , начала активной реакции отверждения T_o) в заданных условиях нагрева определяют по термограмме. Процедура определения теплового эффекта реакции отверждения на приборах, снабженных автоматизированной системой сбора и обработки информации, подробно изложена в инструкции по эксплуатации калориметра.

Количество образцов для испытаний – не менее трех. Достоверными результаты считаются в том случае, если значения температурных характеристик процесса отверждения, определенные по двум образцам, не отличаются более чем на 5%. Если эта разница больше, то необходимы дополнительные испытания.

Методом термомеханического анализа (ТМА) на модуле марки SDTA 840 в соответствии с методическим материалом ММ1-595-11-138–2002 «Методика определения времени желатинизации терморезактивного связующего в препреге» определяют время желатинизации связующего. Исследования проводят в изотермических условиях при температуре 120°C, при воздействии сжимающей переменной нагрузки величиной от 0,1 до 0,3 Н с частотой 1 Гц.

Методом ТМА [17] на модуле марки SDTA 840 в соответствии с ММ1-595-11-137–2002 «Методика определения температуры стеклования матрицы в полимерных композиционных материалах» определяют температуры стеклования отвержденных композиций связующих и углепластика.

При исследовании физико-механических и реологических характеристик применяли следующие стандарты для определения:

- предела прочности и модуля упругости при трехточечном изгибе – ГОСТ 25.604–82;
- предела прочности при сжатии – ГОСТ 25.602–80;
- модуля упругости при растяжении – ГОСТ 25.601–80;
- плотности пластика – ГОСТ 15139–69;
- толщины монослоя – ММ1.2.039–2005;
- горючести – ОСТ1 90094–79.

Результаты и обсуждение

Проведены исследования по выбору состава и технологических режимов изготовления связующего для ПКМ, получаемых методом прессового формования.

Метод прессового формования заключается в послойной укладке пропитанного полимерным связующим наполнителя на подготовленную форму с последующим сдавливанием в прессе. Пропитка наполнителя может осуществляться не только до его укладки в форму, но и на стадии выкладки пакета [18].

При проведении работы изготовили экспериментальные композиции эпоксидного связующего с разным набором исходных компонентов – варьировали марки эпоксидных смол и отвердителей. Композициям присвоены условные обозначения 1, 2, 3 и проведены их исследования. Исследование изготовленных экспериментальных образцов эпоксидных связующих показало, что их время желатинизации при температуре 145±1°C находится в интервале 94–120 мин; кажущаяся вязкость по Брукфильду при температуре переработки 70°C соответствует 25 (образец 3) и 30 Па·с (образец 2), при этом композиция 1 по своим реологическим показателям не подходит для переработки при температуре 70°C. Технологические свойства экспериментальных композиций 2 и 3 делают их пригодными для переработки в ПКМ по технологии прессового формования (табл. 1).

Таблица 1

**Физико-химические, технологические и теплофизические свойства
экспериментальных образцов эпоксидных связующих**

Свойства	Значения свойств образца		
	1	2	3
Кажущаяся вязкость по Брукфильду при температуре $70 \pm 1^\circ\text{C}$, Па·с	Композиция не подходит по технологическим свойствам – хрупкая, не липкая	30	25
Время желатинизации при температуре $145 \pm 2^\circ\text{C}$, мин	120	94	112
Температура стеклования, $^\circ\text{C}$	188,7	152	192
Горючесть (время экспозиции 60 с)	Самозатухающая	Трудногорающая	

Проведены испытания на горючесть экспериментальных образцов связующих, разработанных для метода прессового формования. Результаты испытаний показали, что композиция 1 является самозатухающей, а композиции 2 и 3 – трудногорающими. Данные по горючести позволяют сделать вывод о возможности создания не поддерживающих горения ПКМ на основе разрабатываемых композиций. Наиболее подходящей по свойствам в качестве негорючего эпоксидного связующего для изготовления ПКМ методом прессового формования выбрана композиция связующего 3, которой присвоена марка ВСЭ-37.

Проведены дополнительные исследования физико-механических и реологических свойств экспериментальной партии эпоксидного связующего ВСЭ-37 с формованием в интервале температур $140\text{--}180^\circ\text{C}$ для прессового формования, которое характеризуется оптимальными технологическими характеристиками. Установлено значение предела прочности при статическом изгибе при температуре 20°C : 105 МПа, модуль упругости составляет 3,1 ГПа.

Исследование процесса нарастания вязкости связующего ВСЭ-37 при изотермической выдержке при температуре 70°C показало, что время сохранения вязкости связующего до 30 Па·с находится в интервале 25–220 мин, что и определяет его технологическую жизнеспособность при температуре переработки (рис. 1).

Определены основные свойства связующего ВСЭ-37 (табл. 2).

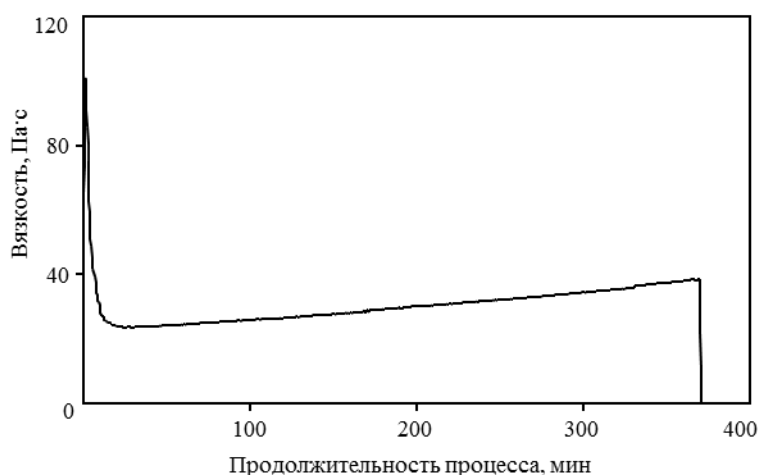


Рис. 1. Изменение кажущейся вязкости композиции ВСЭ-37 при температуре 70°C

Таблица 2

Технологические свойства опытной партии эпоксидного связующего ВСЭ-37

Кажущаяся вязкость по Брукфильду при температуре $70\pm 1^\circ\text{C}$, Па·с	Время желатинизации при температуре $145\pm 2^\circ\text{C}$, мин	Температура стеклования, $^\circ\text{C}$	Температурные параметры отверждения	
			тепловой эффект связующего, Дж/г	температура максимума реакции, $^\circ\text{C}$
23,5	106	185,8	224,2	207,3

Установлено, что вязкость связующего при температуре переработки $70\pm 1^\circ\text{C}$ соответствует 23,5 Па·с, время желатинизации при температуре 145°C составляет 106 мин. Температура стеклования отвержденного связующего ВСЭ-37, определенная методом термомеханического анализа, соответствует $185,5^\circ\text{C}$.

Проведены исследования процесса структурирования эпоксидного связующего ВСЭ-37 методом ДСК. Установлено, что процесс формообразования связующего начинается при температуре $158,3^\circ\text{C}$, дальнейшее отверждение связующего способствует его структурированию с максимумом при температуре $207,3^\circ\text{C}$, которое сопровождается образованием трехмерной сетки и, вследствие этого, наблюдается его переход в нетекучее и неплавкое состояние, т. е. в твердый, стеклообразный материал. На рис. 2 представлено определение температурных параметров отверждения связующего ВСЭ-37 методом ДСК.

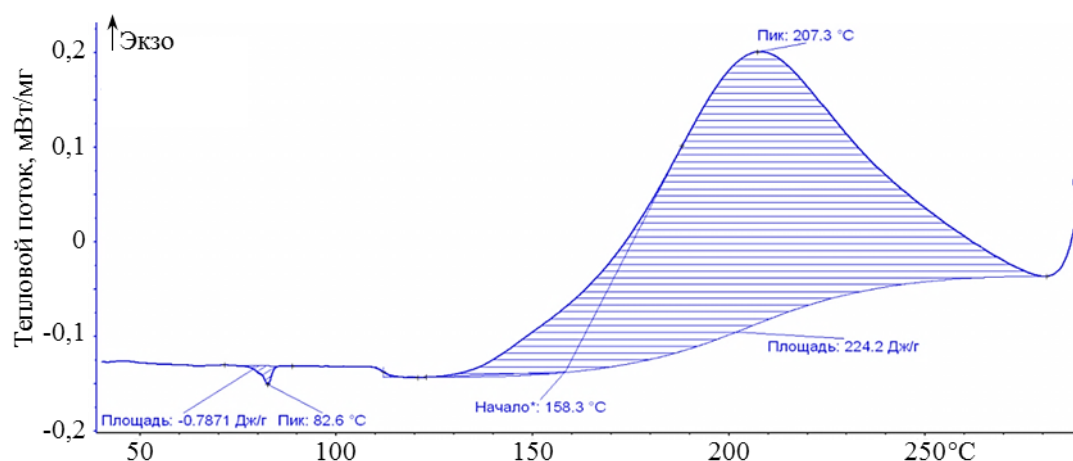


Рис. 2. Определение температурных параметров отверждения связующего ВСЭ-37 методом ДСК

Надежность и долговечность изделий на основе отверждающихся полимерных связующих зависят от температурно-временных режимов отверждения. Правильный выбор режима отверждения композиции, как правило, обеспечивает получение материала с оптимальными физическими и механическими свойствами [19].

Для подбора оптимального температурно-временного режима на начальном этапе рассчитывали кинетические параметры реакции отверждения. Для этого проведены ДСК исследования отверждения исследуемого препрега при различных скоростях нагревания. Результаты представлены на рис. 3.

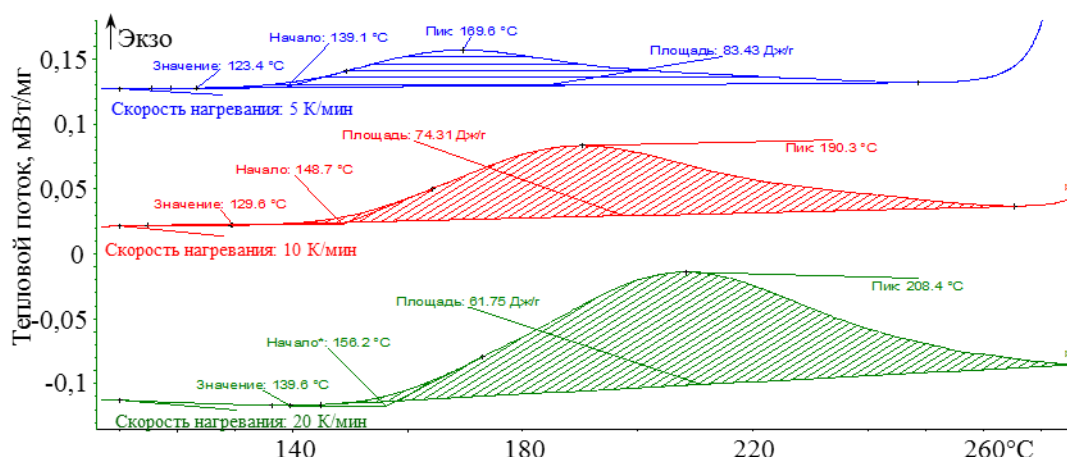


Рис. 3. ДСК-кривые препрега на основе связующего ВСЭ-37, снятые при различных скоростях нагревания

По полученным результатам с помощью программного обеспечения Netzsch Thermokinetics 3.0 рассчитаны кинетические параметры реакции отверждения исследуемого препрега [20]. При этом использовали модель двух параллельных химических реакций вследствие специфики исследуемого связующего.

При расчетах использовали следующие выражения для скорости химической реакции:

$$\frac{d[B]}{dt} = - \left(A_1 \cdot e^{-\frac{E_1}{RT}} \cdot (1 + K_{cat_1} \cdot [B]) \right) \cdot [A]^{n_1}; \tag{1}$$

$$\frac{d[C]}{dt} = - \left(A_2 \cdot e^{-\frac{E_2}{RT}} \cdot (1 + K_{cat_2} \cdot [C]) \right) \cdot [A]^{n_2}, \tag{2}$$

где $[A]$, $[B]$ и $[C]$ – концентрации исходного отвердителя, отвердителя, прореагировавшего с компонентом 1, и отвердителя, прореагировавшего с компонентом 2, соответственно; A_x – предэкспоненциальный множитель реакции x ; E_x – энергия активации реакции x ; n_x – порядок реакции x ; K_{cat_x} – константа скорости автокаталитической реакции x ; T – температура; R – универсальная газовая постоянная.

Для аппроксимации полученных ДСК-кривых использовали приближение пропорциональности изменения скорости теплового потока и скорости превращения связующего. Для учета вкладов в суммарную энтальпию H процесса отверждения двух реакций использовали выражение:

$$\frac{dH(t)}{dt} = \Delta H_{общ} \cdot \left(\text{ПрР}_1 \cdot \frac{[A \rightarrow B]}{dt} + \text{ПрР}_2 \cdot \frac{[A \rightarrow C]}{dt} \right), \tag{3}$$

где ПрР_x – коэффициенты, учитывающие вклад реакций x в общий тепловой поток.

Результаты расчета представлены на рис. 4 и в табл. 3.

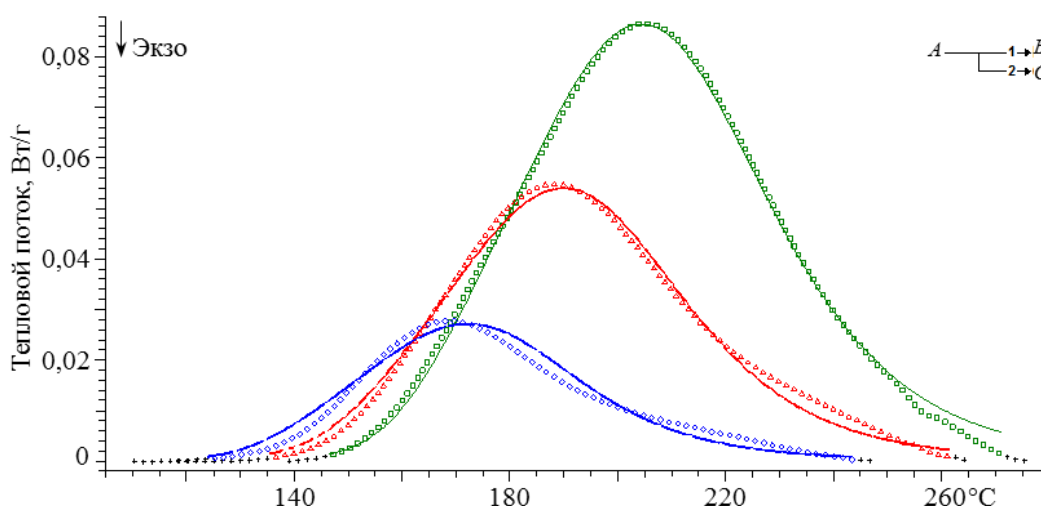


Рис. 4. Кривые расчета кинетических параметров реакции отверждения препрега на основе связующего ВСЭ-37 при скорости нагрева 5 (□); 2,5 (△) и 1 К/мин (◇)

Таблица 3

Расчетные параметры реакции отверждения – см. формулы (1)–(3)

Параметр	Значение
$\log(A_1)$	4,77575
E_1 , Дж/моль	81,47968
n_1	1,73698
$\log(K_{cat1})$	3,27683
$\log(A_2)$	7,08127
E_2 , Дж/моль	81,81539
n_2	2,81757
$\log(K_{cat2})$	0,87975
ПрР ₁	6,45406
ПрР ₂	$-2,38 \cdot 10^{-2}$

На основании полученной модели и равномерности скорости отверждения связующего предложен температурно-временной режим отверждения 1. Зависимость степени превращения от времени для предложенной температурной программы представлена на рис. 5, а.

Отметим, что в данном случае используют небольшую навеску препрега (связующего) и не учитывают процессы массо- и теплопереноса при изготовлении толсто-стенного изделия. В этой связи, с учетом ряда режимов отверждения для эпоксидных композиций, приведенных в научных литературных источниках, в рекламных каталогах иностранных производителей связующих и технологических инструкциях на связующее, используемых в отечественной авиапромышленности, а также на основании данных о превращениях в ходе процесса отверждения, времени желатинизации и требований к длительности процесса отверждения композиции, выбран режим, теоретически способный привести к образованию высокопрочного углепластика.

На рис. 5, б представлено расчетное изменение степени превращения в процессе температурно-временного режима 2. Отметим достаточно равномерное прогнозируемое изменение степени превращения связующего при выбранном режиме, что, возможно, соответствует достаточно равномерному протеканию реакции отверждения. Это, в свою очередь, не должно приводить к локальным перегревам в процессе производства пластика и, как следствие, ухудшению физико-химических и механических свойств конечного изделия.

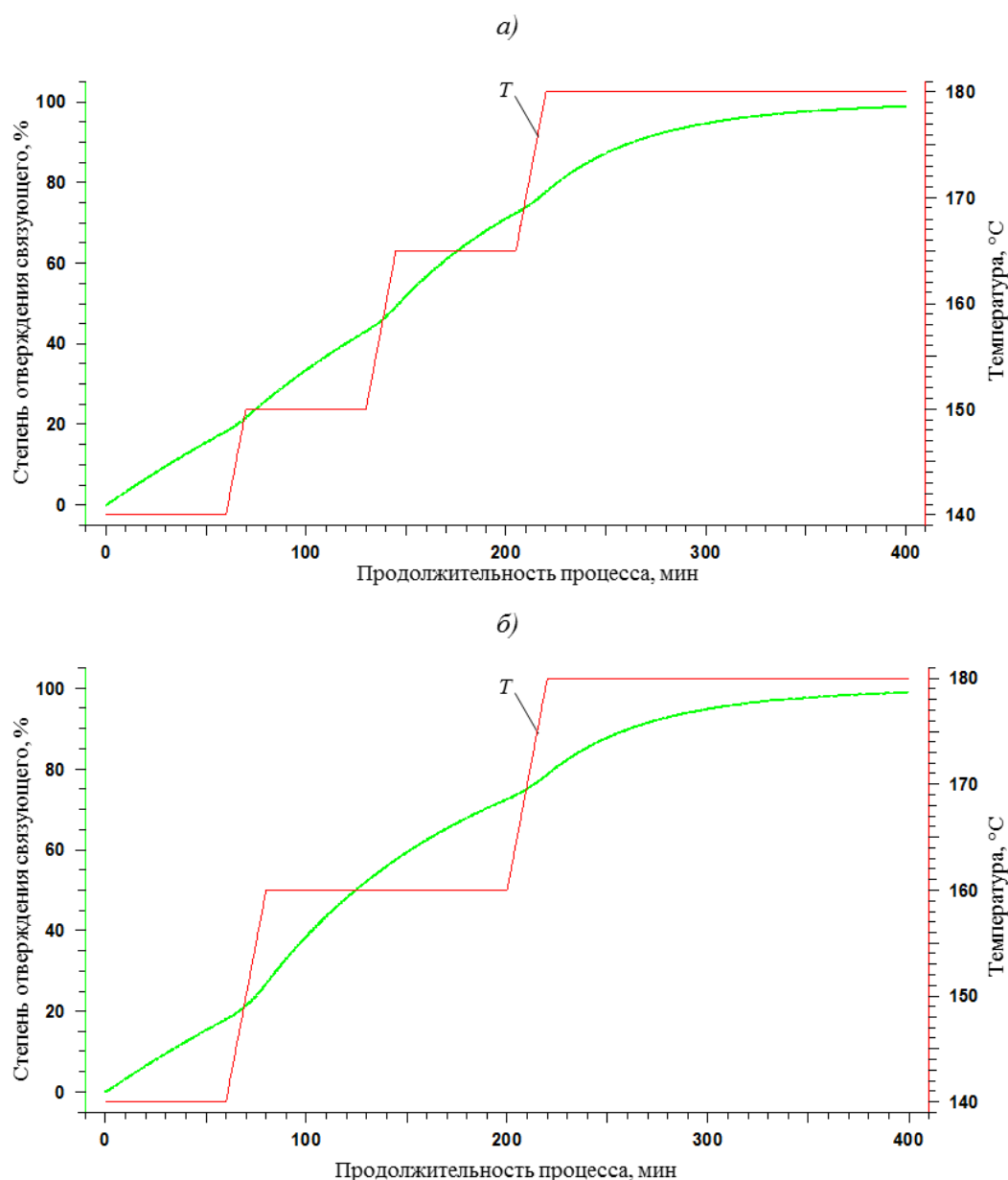


Рис. 5. Изменение степени превращения связующего (—) для предложенного температурно-временного режима 1 (а) и 2 (б)

По режиму 2 изготовили образцы углепластика на основе связующего ВСЭ-37 толщиной до 2 мм и исследовали их физико-механические свойства. Исследование показало, что модули упругости при растяжении и изгибе равны 70 и 59 ГПа соответственно. Полученные характеристики позволяют утверждать, что оптимальным является подобранный ступенчатый режим отверждения с конечной температурой 180°C.

Затем проводили отработку технологических параметров процесса изготовления толстостенных плит – толщиной ≥ 20 мм. Применительно к толстостенным плитам скорректировали и рассчитали режимы формования (рис. 6).

Для анализа нестационарных процессов теплообмена, которые возникают в толстостенной плите углепластика, применяется метод элементарных балансов. Объект исследования разбивается на ячейки, в пределах которых теплофизические характеристики материала (теплопроводность, удельная теплоемкость, плотность) и температура постоянны.

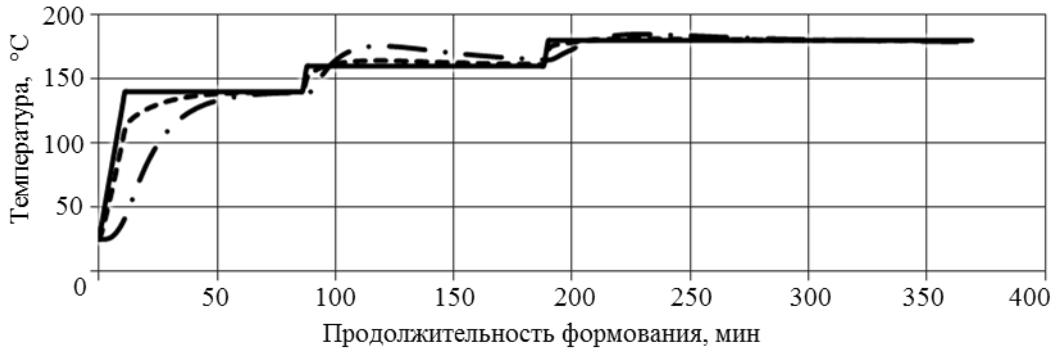


Рис. 6. Режим формирования толстостенных плит при температуре внешнего (---) и серединного (-·-) слоев (— по разработанной программе)

В основе метода элементарных балансов лежит уравнение нестационарного теплового баланса для элементарной ячейки. В уравнение входят компоненты, характеризующие различные виды передачи тепловой энергии, такие как теплопроводность и объемные распределенные источники.

В основу метода элементарных балансов заложено решение нестационарного уравнения теплового баланса для элементарной ячейки:

$$c(T) \cdot \rho(T) \cdot V \frac{dT}{dt} = \sum_i q_{\lambda i} + q_v, \tag{4}$$

где $q_{\lambda i} = \lambda_i \frac{S_i}{\Delta L_i} (T_i - T)$ – тепловой поток с теплопроводностью из i -й смежной ячейки, Вт; $q_v = W_v \cdot V$ – внутреннее объемное тепловыделение, Вт; $c(T)$ – удельная теплоемкость, Дж/(кг·К); $\rho(T)$ – плотность, кг/м³; V – объем ячейки, м³; T – температура рассматриваемой ячейки, К; λ_i – теплопроводность между рассматриваемой и i -й смежной ячейками, Вт/(м·К); ΔL_i – расстояние между центрами рассматриваемой и i -й смежной ячейками, м; T_i – температура i -й смежной ячейки, К; S_i – площадь контакта с i -й смежной ячейкой, м²; W_v – мощность объемных тепловыделений, Вт/м³.

Рассматриваемая задача моделирования температурных полей в плите при ее отверждении является квазиодномерной. Это обуславливается низким термическим контактным сопротивлением отверждаемой заготовки и нагревателей пресса, а также допущением незначительности потерь тепла через торцы плиты (рис. 7).

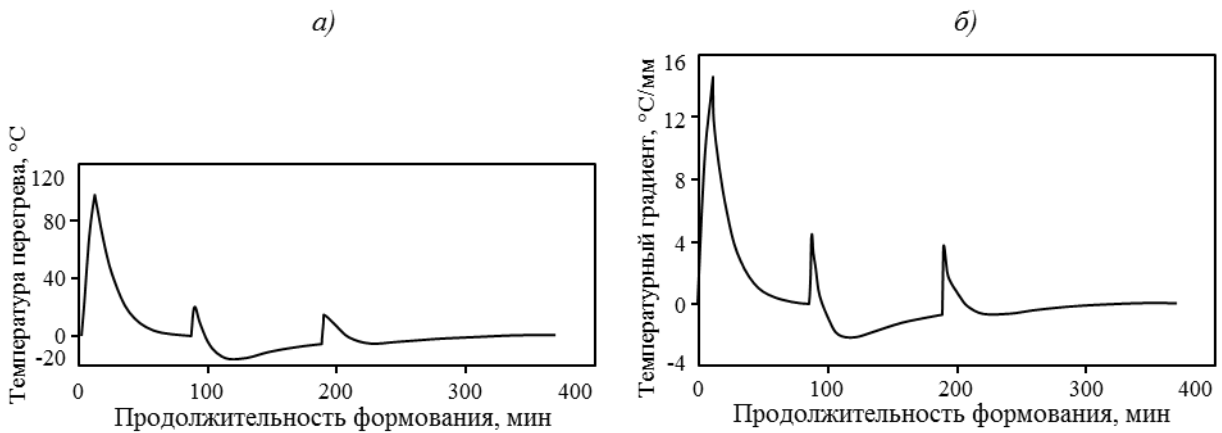


Рис. 7. Разность температур поверхностного и серединного слоев (а) и максимальные градиенты температуры по толщине (б)

В результате данного исследования увеличена продолжительность выдержек и снижена максимальная температура формования до 160°C , а также добавлены стадии вакуумирования и подпрессовки.

Изготовление толстостенных образцов [21, 22] углепластика проводили на лабораторном гидравлическом прессе фирмы LabTech Engineering LTD LP-S-20. Процесс изготовления углепластика включает два основных этапа – сборка заготовки и формование (рис. 8).

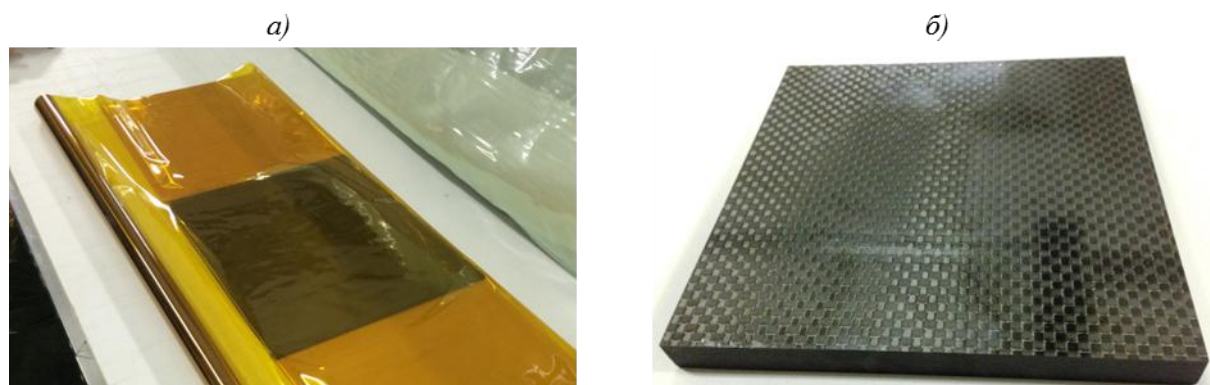


Рис. 8. Сборка технологического пакета (а) и внешний вид плиты из углепластика толщиной 20 мм (б)

После формования оценивали физические свойства углепластиков: плотность, содержание связующего, толщину монослоя. Плотность углепластика составляет $1,66 \text{ г/см}^3$; толщина монослоя $0,32 \text{ мм}$; содержание наполнителя 69% и связующего 30% ; пористость 1% . Полученные характеристики свидетельствуют о получении качественного ПКМ.

В ходе исследования физико-механических свойств экспериментальных образцов углепластика получены следующие результаты: предел прочности при сжатии 470 МПа ; модуль упругости при растяжении 70 ГПа ; модуль упругости при изгибе 59 ГПа .

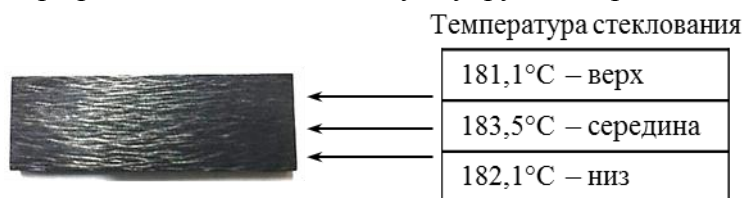


Рис. 9. Термоаналитические исследования образцов, вырезанных из различных мест по всей толщине толстостенной плиты

Проведены термоаналитические исследования образцов, вырезанных из различных мест по всей толщине толстостенной плиты (рис. 8, б) – сверху, из середины и снизу. На рис. 9 показано, что температура стеклования во всех случаях находится на одном уровне, что свидетельствует о верно подобранном режиме формования.

Заключение

По совокупности представленных результатов исследований видно, что разработанное связующее марки ВСЭ-37 является самозатухающим и позволяет получать методом прессового формования толстостенные изделия из ПКМ, не поддерживающих горения.

Работа выполнена в рамках инновационного субсидированного проекта: договор №13412.0924900.13.002 от 20.12.2003 г. с Минпромторгом России о предоставлении субсидии из Федерального бюджета на реализацию комплексного инновационного проекта по созданию высокотехнологичной продукции «Разработка технологий

получения композиционных материалов нового поколения и конструктивных решений для создания опорных плит и электроизолирующих стяжек соединительных элементов из композиционных материалов для силовых сборок блоков коммутаторов на основе импульсных фототиристоров, предназначенных для создания сверхмощных электромагнитных полей в схемах импульсной энергетики, а также освоение производства высокотехнологичной продукции на основе технологических решений».

ЛИТЕРАТУРА

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.
2. Гуняев Г.М., Каблов Е.Н. Конструкционные углепластики на рубеже веков / В кн. *Авиационные материалы. Избранные труды «ВИАМ» 1932–2002: юбилейный науч.-технич. сб.* М.: МИСИС–ВИАМ, 2002. С. 242–247.
3. Каблов Е.Н. России нужны материалы нового поколения // *Редкие земли*. 2014. №3. С. 8–13.
4. Плюдеман Э. Поверхности раздела в полимерных композитах. М.: Мир. Композиционные материалы, 1978. Т. 6. 296 с.
5. Бобылев В.А. Отвердители эпоксидных смол // *Композитный мир*. 2006. №4. С. 20–24.
6. Гуняев Г.М., Каблов Е.Н., Алексахин В.М. Модифицирование конструкционных углепластиков углеродными наночастицами // *Российский химический журнал*. 2010. Т. LIV. №1. С. 5–11.
7. Барботько С.Л. Пожаробезопасность авиационных материалов // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №S. С. 431–439.
8. Копылов В.В., Новиков С.Н. Полимерные материалы пониженной горючести. М.: Химия, 1986. 224 с.
9. Кодолов В.И. Горючесть и огнестойкость полимерных материалов. М.: Химия, 1976. 160 с.
10. Михайлин Ю.А. Тепло-, термо- и огнестойкость полимерных материалов. СПб.: НОТ, 2011. 416 с.
11. Способ получения огнестойкого связующего для создаваемых в пултрузионном технологическом процессе композиционных материалов, огнестойкое связующее и изделие: пат. 2420542 Рос. Федерация; опубл. 10.11.10.
12. Кодолов В.И. Замедлители горения полимерных материалов. М.: Химия, 1980. 274 с.
13. Железняк В.Г., Чурсова Л.В. Модификация связующих и матриц на их основе с целью повышения вязкости разрушения // *Авиационные материалы и технологии*. 2014. №1. С. 47–50.
14. Федосеев М.С., Девятериков Д.М., Шелудяков В.Д. Синтез и свойства полимеров, полученных при отверждении эпоксидных олигомеров различной функциональности метилэндиковым ангидридом // *Химическая технология*. 2013. Т. 14. №12. С. 739–744.
15. Мухаметов Р.Р., Ахмадиева К.Р., Чурсова Л.В., Коган Д.И. Новые полимерные связующие для перспективных методов изготовления конструкционных волокнистых ПКМ // *Авиационные материалы и технологии*. 2011. №2. С. 38–42.
16. Мошинский Л.М. Эпоксидные смолы и отвердители. Тель-Авив: Аркадия пресс ЛТД, 1995. 370 с.
17. Алексахин В.М., Антюфеева Н.В. Развитие методов термического анализа в исследованиях полимерных композиционных материалов / В кн. *75 лет. Авиационные материалы. Избранные труды «ВИАМ» 1932–2007: юбилейный науч.-технич. сб.* М.: ВИАМ, 2007. С. 245–249.
18. Душин М.И., Хрульков А.В., Раскутин А.Е. К вопросу удаления излишков связующего при автоклавном формовании изделий из полимерных композиционных материалов // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн*. 2013. №1. Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 03.09.2015).
19. Чурсова Л.В., Ким М.А., Панина Н.Н., Швецов Е.П. Наномодифицированное эпоксидное связующее для строительной индустрии // *Авиационные материалы и технологии*. 2013. №1. С. 40–47.
20. Алямовский А.А. Инженерные расчеты в SolidWorks Simulation. М.: ДКМ-пресс, 2013. 464 с.
21. Биргер И.А., Иосилевич Г.Б. Резьбовые и фланцевые соединения. М.: Машиностроение, 1990. 368 с.
22. Пахаренко В.А., Пахаренко В.В., Яковлева Р.А. Пластмассы в строительстве. СПб.: Научные основы и технологии, 2010. 350 с.