

УДК 667.621:678.8

*Р.Р. Мухаметов¹, А.П. Петрова¹, С.А. Пономаренко¹,
Е.В. Долгова¹, Б.Ф. Павлюк¹*

СВОЙСТВА СВЯЗУЮЩЕГО ЭДТ-69Н И ПКМ НА ЕГО ОСНОВЕ

DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-4-28-37

В работе приведены свойства эпоксидного связующего ЭДТ-69Н и полимерных композиционных материалов, изготовленных на его основе с применением различных тканых наполнителей (углеродных, стеклянных, органических). Методами термического анализа и ИК спектроскопии оценены условия отверждения связующего и его эксплуатации, закономерности взаимодействия реакционных групп и влияние типа наполнителя. Приведены области применения ПКМ на основе связующего ЭДТ-69Н и различных волокнистых наполнителей: углеродных, стеклянных, органических.

Ключевые слова: *связующее, наполнитель, полимерные композиционные материалы (ПКМ), углепластик, стеклопластик, органопластик, механические, диэлектрические, теплофизические свойства, микросферы стеклянные.*

*R.R. Mukhametov¹, A.P. Petrova¹, S.A. Ponomarenko¹,
E.V. Dolgova¹, B.Ph. Pavlyuk¹*

PROPERTIES OF BINDER EDT-69N AND POLYMER COMPOSITES ON ITS BASIS

The article describes properties of epoxy binder EDT-69N and polymer composites on its basis and fibrous fillers of various types (carbon, glass, organic). The curing and operation conditions of binder, features of reaction between functional groups and the influence of filler nature during its curing are estimated by methods of the thermal analysis and IR-spectroscopy. The application fields for polymer composites on the basis of binder EDT-69N and fibrous fillers of various types are specified.

Keywords: *binder, filler, polymer composites, carbon plastics, fibreglasses, organoplasty, the mechanical, dielectric, heatphysical properties, microspheres glass.*

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 полимерные композиционные материалы (ПКМ) нашли широкое применение в различных областях машиностроения и в народном хозяйстве взамен металлов, что позволило существенно снизить массу и повысить тактико-технические характеристики изделий.

Как известно, некоторые ПКМ получают с применением связующих и тканых волокнистых наполнителей. Связующие на основе эпоксидных олигомеров традиционно занимают одно из ведущих мест при производстве ПКМ благодаря хорошим технологическим свойствам, адгезии к широкому кругу наполнителей, отсутствию летучих продуктов при отверждении, небольшой усадке по сравнению с другими типами связующих. Одним из ранее разработанных эпоксидных связующих является связующее ЭДТ-69Н, которое нашло применение в целой серии ПКМ с различными наполнителями.

На его основе разработано по 4 марки углепластиков и стеклопластиков, микро-сферотекстолит, органопластик и органотекстолит [1, 2]. Перечень материалов, в состав которых входит эпоксидное связующее ЭДТ-69Н, и области их применения приведены в табл. 1.

Таблица 1

ПКМ на основе эпоксидного связующего ЭДТ-69Н

Материал	Марка материала	Наполнитель; содержание, % (по массе)	Применение
Углепластики	КМУ-11Э	Углеродная лента ЭЛУР-П; 68±2	Для изготовления средне- и малонагруженных самолетных и вертолетных деталей конструкционного назначения (обшивка, элементы корпуса фюзеляжа и деталей ГТД)
	КМУ-11тр	Углеродная ткань УТ-900-2,5; 57±2	Для изготовления самолетных и вертолетных деталей конструкционного назначения класса «Б»
	КМУ-11л	Углеродная лента ЛУ-24П; 62±2	Для изготовления средненагруженных деталей с повышенными требованиями к их жесткости, работающих при сжатии и растяжении-сжатии
	КМУ-11э0,08	Углеродная лента ЭЛУР-0,08П; 63±4	Для изготовления тонколистовых обшивок сотовых и интегральных конструкций перспективных изделий
Органопластик	Органит 12Т	Ткань на основе органического волокна СВМ арт. 56313Н; 50±5	Для слабо- и средненагруженных элементов конструкций внешнего контура летательных аппаратов (обшивки трехслойных конструкций и монолитные детали сложной конфигурации)
Органотекстолит	Органит 12ТКС/42	Комбинированная ткань на основе органических и стеклянных волокон Т-42/1-76; 55–60	Для слабо- и средненагруженных элементов конструкций внешнего контура летательных аппаратов (обшивки трехслойных конструкций и монолитные детали сложной конфигурации)
Стеклопластики	СТ-69Н	Стеклоткань Т-10-80; 66±2	Для изготовления средненагруженных элементов внешнего контура летательных аппаратов конструкционного и радиотехнического назначения (преимущественно: обтекателей РЛС, изоляторов, створок шасси, капотов и др.)
	СТ-69Н-14	Стеклоткань Т-10-14; 66±2	
	СТ-520	Стеклоткань Т-15(П)-76; 50±5	Для изготовления средненагруженных элементов конструкций интерьера, в том числе трехслойных сотовых панелей, получаемых без применения клея
	СТ-69Н-15П	Стеклоткань Т-15(П)-76; 60±2	Для изготовления средненагруженных элементов внешнего контура летательных аппаратов конструкционного и радиотехнического назначения (преимущественно: обтекателей РЛС, изоляторов, створок шасси, капотов и др.)
Микросферотекстолит	МСТ-6П	Стеклоткань Т-15П-76; 20±2 Микросферы стеклянные МСО-А9; 23±2	Для изготовления изделий конструкционного и радиотехнического назначения (обтекателей, антенн, диэлектрических вставок и др.)

Все материалы рекомендованы для работы в интервале температур от -60 до $+80^{\circ}\text{C}$ и большинство из них успешно эксплуатируются в авиационной технике. Поэтому представляет интерес сопоставить свойства ПКМ и их зависимость от наполнителя в их составе. Следует отметить, что для обеспечения надежной работы необходимо учитывать место эксплуатации материалов, в некоторых случаях для улучшения характеристик ПКМ рекомендуют также модифицировать состав связующего и/или режим его отверждения (для удаления легколетучих соединений и уменьшения пористости конечного материала) [3–6].

Работа выполнена в рамках реализации комплексной научной проблемы 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») [7–9].

Материалы и методы

Для проведения исследований использовали следующие материалы:

- связующее ЭДТ-69Н (ТУ-1-595-12-584–2006);
- в качестве наполнителей применяли углеродную ленту ЭЛУР-П0,1 (в углепластиках), стеклоткань Т-10-80 (в стеклопластиках), ткань из арамидных волокон СВМ (в органопластиках) и комбинированную ткань на основе органических и стеклянных волокон Т-42/1-76 (в органотекстолитах).

В статье представлены данные по прочности материалов:

- предел прочности при растяжении $\sigma_{\text{в}}$, МПа;
- предел прочности при сжатии $\sigma_{\text{в.сж}}$, МПа;
- предел прочности при межслойном сдвиге τ_{13} , МПа.

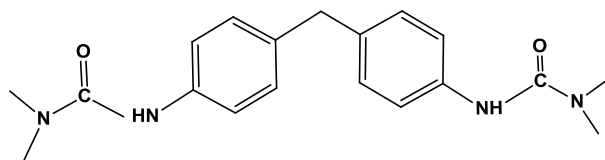
Исследования проводили методами ИК спектроскопии, динамического термического анализа (ДТА), динамического термогравиметрического анализа (ДТГА) и дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК).

Результаты и обсуждение

Связующее является важным компонентом ПКМ, определяющим его технологические и эксплуатационные характеристики. Его применение в процессе получения ПКМ позволяет фиксировать форму конечного изделия. Природа связующего определяет теплостойкость ПКМ, а его реологические свойства в значительной степени влияют на выбор способа получения препрега и свойства получаемого ПКМ [10–17].

В связи с этим целесообразно рассмотреть свойства эпоксидного связующего ЭДТ-69Н, широко и в течение длительного времени применяющегося в промышленности в составе ПКМ, что позволило наработать значительную статистику по его эксплуатационным характеристикам.

В состав связующего ЭДТ-69Н входят три эпоксидные смолы и отвердитель №9 (бис-(N, N'-диметилкарбамид)-дифенилметан, температура его плавления 217°C). Отвердитель №9 имеет следующую химическую формулу:



Механизм отверждения связующего исследовали с применением методов ДТА и ИК спектроскопии [18–20]. Анализ ИК спектров компонентов, входящих в состав связующего ЭДТ-69Н, позволил установить, что спектры всех эпоксидных олигомеров

имеют высокую интенсивность полосы поглощения в области длин волн $\lambda=920\text{ см}^{-1}$, связанной с колебаниями эпоксидных циклов. Инфракрасный спектр отвердителя №9 содержит интенсивные полосы поглощения в области $\lambda=1650\text{ см}^{-1}$, вызванные колебаниями связи C=O во вторичных амидах, каким и является отвердитель №9.

Методом ДТА предварительно установлено, что отверждение связующего ЭДТ-69Н проходит в интервале температур $115\text{--}185^\circ\text{C}$ с максимальной скоростью отверждения при $\sim 150^\circ\text{C}$. Для выбора оптимального режима отверждения образцы связующего, отвержденные по различным режимам, дополнительно проанализированы методом ИК спектроскопии.

Необходимо отметить, что на ИК спектре композиции связующего ЭДТ-69Н, для изготовления которого компоненты смешивают при температуре 60°C , в области длин волн $\lambda=1650\text{ см}^{-1}$ наблюдаются две полосы поглощения: одна полоса – при $\lambda=1680\text{ см}^{-1}$, характерная для жидких амидов, и перекрывающаяся с ней полоса – при $\lambda=1650\text{ см}^{-1}$, характерная для исходного состояния отвердителя №9. Это позволяет предположить, что отвердитель №9 находится в составе связующего ЭДТ-69Н в двух агрегатных состояниях.

Для установления оптимального режима отверждения образцы связующего ЭДТ-69Н выдерживали при различных температурах. Анализ ИК спектров полученных таким образом образцов связующего ЭДТ-69Н позволил установить, что, при нагревании связующего до температуры 100°C и его термообработке при этих условиях, в области длин волн $\lambda=1730\text{--}1680\text{ см}^{-1}$ наблюдается появление новой полосы поглощения при $\lambda=1750\text{ см}^{-1}$ и постепенное уменьшение интенсивности полосы поглощения при $\lambda=1680\text{ см}^{-1}$. При последующей термообработке образца при 140°C в течение 1 ч последняя полоса поглощения полностью исчезает, а полоса поглощения при $\lambda=1750\text{ см}^{-1}$ увеличивается до максимального значения. Интенсивность полосы поглощения при $\lambda=920\text{ см}^{-1}$ (соответствует колебаниям эпоксидного кольца) при нагревании связующего до температуры 100°C не изменяется, при дальнейшем повышении температуры наблюдается уменьшение ее интенсивности.

Схема химического процесса отверждения эпоксидных олигомеров отвердителем №9 представлена на рис. 1. Изменение содержания эпоксидных групп в связующем при нагревании приведено на рис. 2.

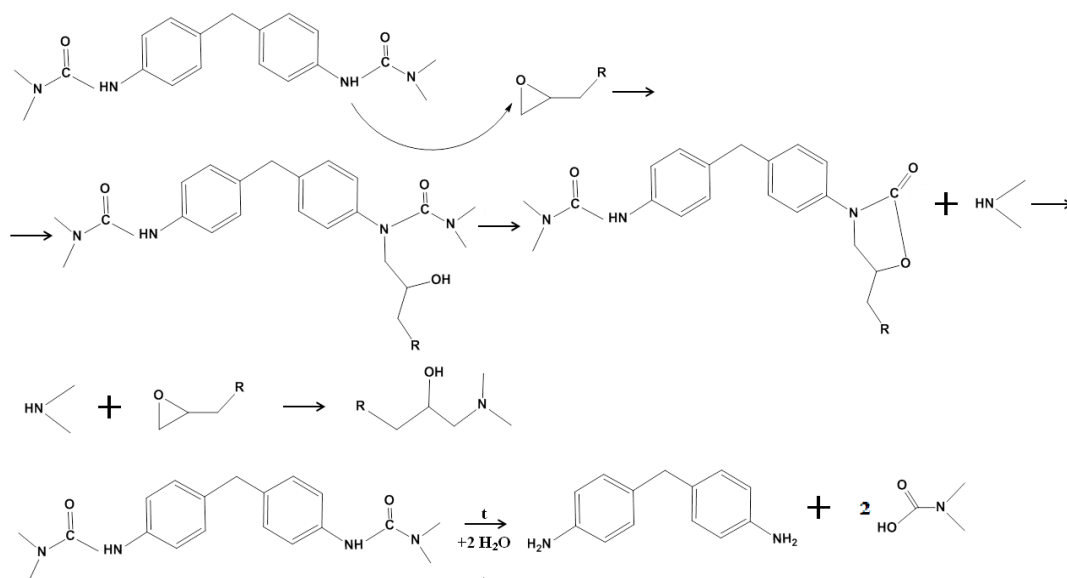


Рис. 1. Схема отверждения эпексидных олигомеров отвердителем №9

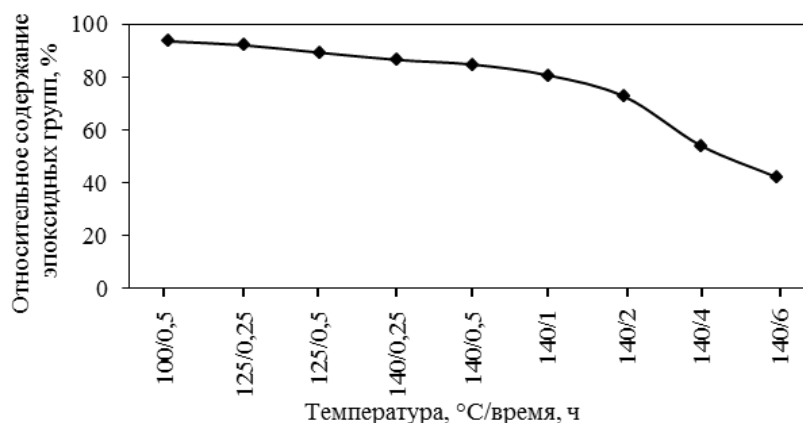


Рис. 2. Изменение относительного содержания эпоксидных групп при ступенчатом отверждении связующего ЭДТ-69Н в интервале температур 100–140°C

Дальнейшая выдержка связующего в этих температурных условиях сопровождается резким уменьшением содержания эпоксидных групп, изменением характера полосы поглощения в области длин волн $\lambda=1750\text{ см}^{-1}$ («плечо» при $\lambda=1765\text{ см}^{-1}$ и $\lambda=1740\text{ см}^{-1}$) и появлением полосы поглощения в области длин волн $\lambda=3600\text{--}3200\text{ см}^{-1}$, характерной для гидроксильных групп в ассоциативной форме. Наблюдаемые изменения в спектрах, вероятно, связаны с переходом отвердителя №9 при повышении температуры из «пассивной» формы в «активную» с изменением его химического строения и появлением новых полос поглощения в спектрах связующего, отвержденного при 140°C (продолжительность экспозиции 2 и 4 ч).

До перехода отвердителя в «активную» форму раскрытия эпоксидного кольца, а следовательно, и отверждения связующего ЭДТ-69Н не наблюдается.

С появлением «активной» формы отвердителя и раскрытием эпоксидного кольца сразу же наблюдается уменьшение интенсивности полосы поглощения при $\lambda=920\text{ см}^{-1}$ (режим отверждения – температура 140°C, продолжительность 0,25 ч). Последующая термообработка при 140°C сопровождается дальнейшим уменьшением интенсивности этой полосы поглощения и, как следствие, резким увеличением интенсивности широкой полосы поглощения в области $\lambda=3600\text{--}3200\text{ см}^{-1}$, соответствующей колебаниям образующихся при раскрытии эпоксидного цикла гидроксильных групп. Однако при данных условиях отверждения (при постепенном подъеме температуры с 100 до 140°C) значительное количество эпоксидных групп в реакции отверждения не участвовало (рис. 2). Дальнейшее изучение процесса отверждения связующего ЭДТ-69Н проводили при температуре 125°C при содержании в композиции 5% отвердителя. На рис. 3 приведена кривая изменения относительного содержания эпоксидных групп в связующем в процессе его отверждения. Характер этой кривой подтверждает предположение об эффективности отвердителя №9 только при определенных температурных условиях отверждения эпоксидных связующих. Обращает на себя внимание высокая степень содержания свободных эпоксидных групп для этого образца, что можно объяснить его небольшими размерами и практически полным удалением из него в процессе отверждения кислоты и диметиламина, выделяющихся при переходе отвердителя №9 в «активную» форму (см. схему реакции на рис. 1). При проведении отверждения связующего в объеме (при больших размерах образцов) степень его отверждения повышается.

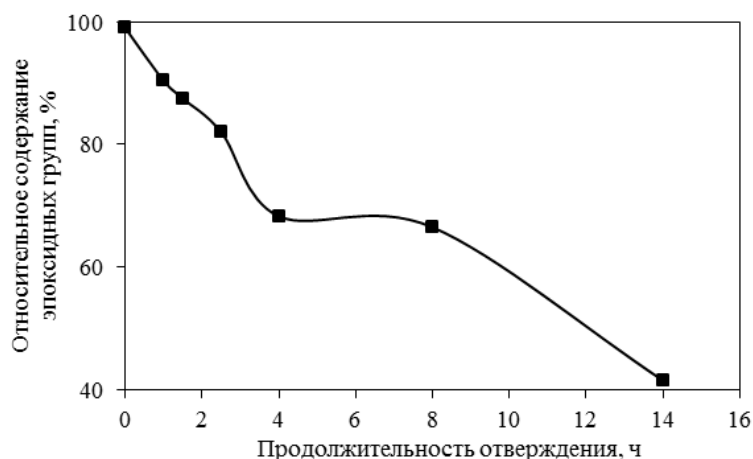


Рис. 3. Изменение относительного содержания эпоксидных групп при отверждении связующего ЭДТ-69Н при температуре 125°C с 5% отвердителя

Таким образом, исследование процесса отверждения связующего ЭДТ-69Н позволило выявить его специфику, связанную с переходом отвердителя №9 в «активную» форму в диапазоне температур 125–140°C. Отвержденный полимер содержит значительное количество гидроксильных групп, что указывает на незавершенность структурирования связующего при этих температурах.

Известно, что препрег ПКМ, в состав которого входит связующее, как правило, не сразу идет на переработку, и срок его хранения может быть значительным. В этот период в связующем в составе препрега происходят изменения, которые могут привести к ухудшению свойств ПКМ, изготовленных на его основе. В связи с этим исследованы изменения, наблюдающиеся в связующем ЭДТ-69Н в процессе хранения препрегов, изготовленных с использованием данного связующего и различных наполнителей.

Препреги изготавливали в лабораторных условиях путем окунания небольших полосок наполнителя в раствор связующего ЭДТ-69Н. Исследования препрегов проводили непосредственно после их изготовления.

В качестве методов исследования применяли ИК спектроскопию, динамический термический анализ (ДТА) и дифференциальную сканирующую калориметрию (ДСК).

При проведении исследований методом ИК спектроскопии образцы препрега предварительно нарезали (масса образца ~1 г), затем взвешивали, помещали в бюкс и заливали ацетоном (~3,8 мл), после чего бюкс плотно закрывали. Экстракцию компонентов связующего из препрега проводили в течение 2,5 сут при комнатной температуре, после чего раствор связующего в ацетоне отделяли от наполнителя и наносили на пластину из бромида калия (KBr). После удаления избыточного количества растворителя образовавшуюся пленку на пластине из бромида калия (KBr) дополнительно сушили при 60°C в течение 1 ч до полного удаления ацетона – контролировали по исчезновению в спектре полосы при $\lambda=1720 \text{ см}^{-1}$. Спектры регистрировали в диапазоне полос поглощения при $\lambda=4000\text{--}400 \text{ см}^{-1}$.

На рис. 4 приведены кривые скорости выделения тепла при отверждении препрегов (dH/dt), в состав которых входили различные наполнители (в качестве образца сравнения приведена кривая теплового эффекта исходного связующего). Из представленных данных следует, что природа наполнителя оказывает существенное влияние на процесс отверждения связующего, вероятно, из-за некоторой пассивации отвердителя реакционноспособными группами на поверхности наполнителя. В табл. 2 представлены некоторые параметры процесса отверждения самого связующего и препрегов на его основе.

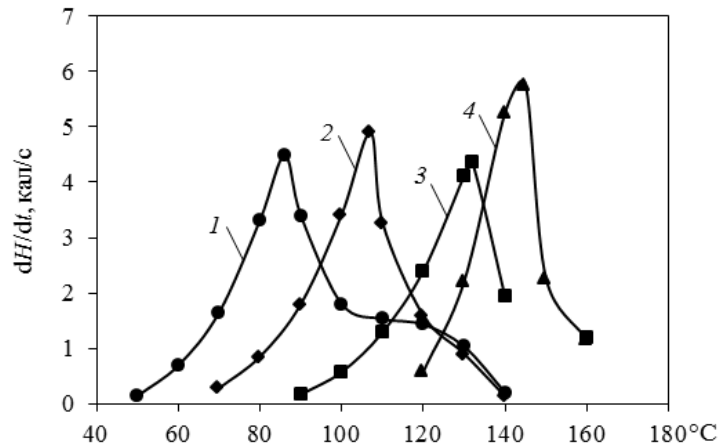


Рис. 4. Кривые ДТА неотвержденных связующего ЭДТ-69Н (1) и препрегов на его основе с наполнителями в виде ленты ЭЛУР-П0,1 (2) и тканей СВМ (3) и Т-10-80 (4)

Таблица 2

Некоторые параметры отверждения связующего ЭДТ-69Н и препрегов на его основе

Состав образца	Температура, °С			H, кал/г	E _{эфф} , ккал/моль
	T ₀	T _{max}	T _к		
ЭДТ-69Н	47	86	116	52,1	16,0
ЭДТ-69Н+Т-10-80	100	144	175	72,5	19,0
ЭДТ-69Н+СВМ	89	133	181	99,1	17,4
ЭДТ-69Н+ЭЛУР	66,5	107	136	77,6	24,0

Примечание. T₀, T_{max}, T_к – температуры начала, максимума и конца пика теплового эффекта отверждения, H – удельная теплота реакции, E_{эфф} – эффективная энергия активации отверждения.

Приведенные данные свидетельствуют об отверждении связующего при температурах до 100°C, что можно объяснить присутствием в его составе оставшихся спирта и воды, обычно успевающих улетучиться при переработке связующего.

Изучался также процесс старения препрегов на основе связующего ЭДТ-69Н и различных наполнителей (ткань на основе органического волокна СВМ, стеклоткань Т-10-80 и углеродная лента ЭЛУР-П0,1). Состояние образцов анализировали после каждого месяца хранения препрегов как при комнатной температуре (среднее значение 20°C), так и в условиях бытового холодильника.

Результаты спектральных исследований и расчеты, выполненные на основании обработки спектральных данных, показали, что независимо от исследованных условий и продолжительности хранения, а также типа наполнителя в препрегах на основе связующего ЭДТ-69Н, в них не наблюдается изменения содержания эпоксидных групп. На основании анализа кривых ИК спектров экстрагированного связующего сделан вывод, что на них не появляются новые и не исчезают ранее существовавшие полосы поглощения.

Вместе с тем, судя по данным ДТА, хранение препрегов в существенной степени зависит от типа наполнителя. Следует отметить, что с учетом отсутствия изменения содержания эпоксидных групп при хранении препрегов, наблюдаемые процессы, по-видимому, обусловлены частичным связыванием отвердителя реакционными группами на поверхности наполнителя и/или переходом отвердителя в «активную» форму. Влияние сроков хранения на тепловые эффекты процессов отверждения (ΔQ) показано на примере препрегов на основе связующего ЭДТ-69Н и тканей СВМ и Т-10-80 (рис. 5). В частности, из исследованных наполнителей наиболее инертным является лента ЭЛУР-П0,1 (кривая

ДТА для препрега наиболее близка к аналогичной кривой для исходного связующего), а наиболее активным – стеклоткань Т-10-80. При этом при хранении образцов препрега на ткани СВМ кривая ДТА сначала смещается в область более высоких температур (вероятно, за счет частичного связывания отвердителя), а при более длительном хранении смещается в обратную сторону. С учетом расположения кривых ДТА для препрегов при различных сроках хранения (при более высоких температурах по сравнению с кривой ДТА для исходного связующего) и данных по содержанию эпоксидных групп в образцах сроки хранения исследуемых препрегов, по-видимому, составляют не менее 4–5 мес.

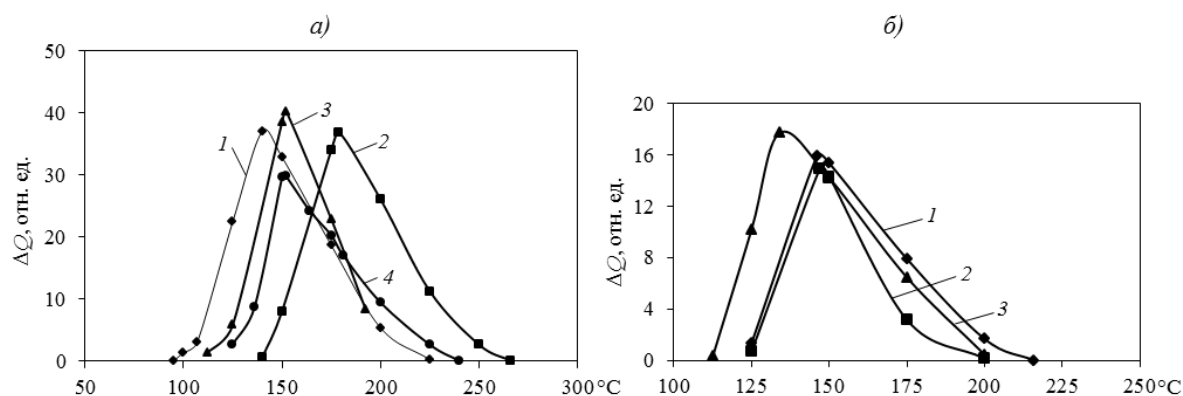


Рис. 5. Кривые ДТА процесса отверждения препрегов на основе связующего ЭДТ-69Н и тканей СВМ (а) и Т-10-80 (б) в исходном состоянии (1) и после 3 (2), 4 (3) и 5 мес хранения (4)

Исследование устойчивости ПКМ на основе связующего ЭДТ-69Н к термоокислительному воздействию выполняли с применением метода ДТГА. Образцы для исследований (однослойные пластики) изготавливали способом вакуумного формования по режиму: при 90°C в течение 0,5 ч+при 125°C в течение 2,5 ч.

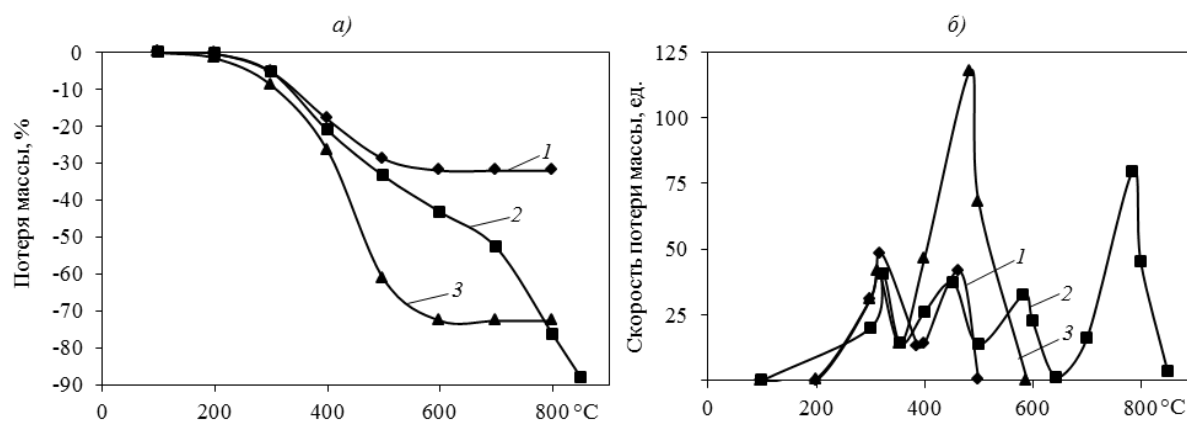


Рис. 6. Термогравиметрические кривые (а) и кривые скорости распада пластиков (б) на основе связующего ЭДТ-69Н и различных наполнителей:

1 – ткань Т-10-80; 2 – лента ЭЛУР-ПУ,1; 3 – ткань Т-42/1-76

На рис. 6 представлены кривые уменьшения массы и скорости уменьшения массы исследованных пластиков на основе связующего ЭДТ-69Н, в которых в качестве наполнителей использованы органо-, стеклоткани и углеродная лента ЭЛУР-ПУ,1. Из

данных на рис. 6 следует, что деструкция ПКМ интенсивно происходит при температурах $\geq 250^\circ\text{C}$. Обращает на себя внимание необычный характер кривых, полученных методами ТГА и ДТГА, для ПКМ с наполнителем в виде ленты ЭЛУР-П0,1. В присутствии этого наполнителя значительно замедляется деструкция связующего ЭДТ-69Н, которая, вероятно, сопровождается образованием «первичных» структур, трансформирующихся во «вторичные» при более высоких температурах. Убедительным подтверждением этому является многомодальная кривая скорости распада ПКМ с наполнителем в виде ленты ЭЛУР-П0,1. В табл. 3 приведены данные по термоокислительной устойчивости пластиков.

Таблица 3

Эмпирические константы термоокислительной устойчивости ПКМ на основе связующего ЭДТ-69Н и различных наполнителей

Тип ПКМ	Наполнитель	ТГИ, °С	T_{10} , °С	$(\Delta m/\Delta t)_{\max}$, мг/мин	Δm_k , %
Однослойный	Ткань Т-10-80	233,7	410	1,08	41,5
	Лента ЭЛУР-П0,1	144,9	390	1,96	94
	Ткань Т-42/1-76	138,8	360	1,96	86
	Ткань СВМ	118,4	300	3,3	86,5
Многослойный	Ткань Т-10-80	138,8	345	0,84	31
	Лента ЭЛУР-П0,1	144,9	330	1,6	89,5
	Ткань Т-42/1-76	138,8	310	2,4	72,5

Примечание. ТГИ – термогравиметрический индекс (расчетная величина), указывающий на способность пластика эксплуатироваться в течение 1000 ч при данной температуре; T_{10} – температура 10%-ной потери массы; $(\Delta m/\Delta t)_{\max}$ – максимальная скорость распада пластика; Δm_k – относительная доля разложившегося пластика.

Заключения

Исследованы процессы, происходящие при отверждении эпоксидного связующего ЭДТ-69Н. На примере связующего и ПКМ, полученных на его основе с использованием различных волокнистых наполнителей (углеродных, стеклянных и арамидных), показано влияние типа наполнителя на процесс отверждения препрегов, проявляющееся в различном положении кривых ДТА для исследуемых образцов. Сопоставление кривых ДТА, полученных для образцов препрегов в исходном состоянии и по мере их хранения, позволяет оценить сроки хранения препрегов ≥ 5 мес. По степени влияния на термоокислительную устойчивость ПКМ на основе связующего ЭДТ-69Н наполнители можно расположить в следующий ряд: ткань СВМ → углеродная лента ЭЛУР-П0,1 → стеклоткань Т-10-80. Деструкция ПКМ, в состав которых входит связующее ЭДТ-69Н, интенсивно происходит при температурах $\geq 250^\circ\text{C}$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кириллов В.Н., Кавун Н.С. Исследование влияния тепловлажностного воздействия на свойства эпоксидных стеклопластиков // Пластические массы. 2008. №9. С. 14–17.
2. Вешкин Е.А. Особенности безавтоклавного формования низкопористых ПКМ // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2016. №2 (38). Ст. 07 (дата обращения: 02.03.2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-2-7-7.
3. Эпоксидное связующее: пат. 2015997 Рос. Федерация; опубл. 15.07.94.
4. Эпоксидное связующее для стеклопластиков: пат. 2028334 Рос. Федерация; опубл. 19.08.91.
5. Раскутин А.Е. Стратегия развития полимерных композиционных материалов // Авиационные материалы и технологии. 2017. №S. С. 344–348. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-344-348.

6. Кутыинов В.Ф., Киреев В.А., Старцев О.В., Шевалдин В.Н. Влияние климатического старения на характеристики упругости и прочности полимерных композиционных материалов // Ученые записки ЦАГИ. 2006. №4. Т. XXXVII. С. 54–64.
7. 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.
8. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения // Защита и безопасность. 2014. №4. С. 28–29.
9. Каблов Е.Н. Из чего сделать будущее? Материалы нового поколения, технологии их создания и переработки – основа инноваций // Крылья Родины. 2016. №5. С. 8–18.
10. Постнова М.В., Постнов В.И. Опыт развития безавтоклавных методов формования ПКМ // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2014. №4. Ст. 06. (дата обращения: 03.03.2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-4-6-6.
11. Панина Н.Н., Ким М.А., Гуревич Я.М., Григорьев М.М. и др. Связующие для безавтоклавного формования изделий из полимерных композиционных материалов // Клеи. Герметики. Технологии. №10. 2013. С. 18–27.
12. Каблов Е.Н., Чурсова Л.В., Бабин А.Н., Мухаметов Р.Р., Панина Н.Н. Разработки ФГУП «ВИАМ» в области расплавных связующих для полимерных композиционных материалов // Полимерные материалы и технологии. 2016. Т. 2. №2. С. 37–42.
13. Михайлин Ю.А. Конструкционные полимерные композиционные материалы. СПб.: НОТ, 2008. 822 с.
14. Справочник по композиционным материалам / под ред. Дж. Любина. М.: Машиностроение, 1988. Т.1. 448 с.
15. Перепёлкин К.Е. Армирующие волокна и волокнистые полимерные композиты. СПб.: НОТ, 2009. 386 с.
16. Молчанов Б.И., Гудимов М.М. Свойства углепластиков и области их применения // Авиационная промышленность. 1997. №3–4. С. 58–60.
17. Кербер М.Л., Виноградов В.М. Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология. СПб.: Профессия, 2009. 560 с.
18. Алексахин В.М., Антюфеева Н.В. Развитие методов термического анализа в исследованиях полимерных композиционных материалов // 75 лет. Авиационные материалы. Избранные труды «ВИАМ» 1932–2007: юбил. науч.-технич. сб. М.: ВИАМ, 2007. С. 245–249.
19. Антюфеева Н.В., Алексахин В.М., Железина Г.Ф., Столянков Ю.В. Методические подходы термоаналитических исследований для оценки свойств препрегов и углепластиков // Приложение к журналу «Все материалы. Энциклопедический справочник». 2012. №4. С. 18–28.
20. 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.