

**РАСЧЕТ ПРОФИЛЯ ТЕМПЕРАТУР ПРИ АВТОКЛАВНОМ ФОРМОВАНИИ
СТЕКЛОПЛАСТИКА НА ОСНОВЕ ЭПОКСИДИАНОВОЙ СМОЛЫ
И ЛАТЕНТНОГО ОТВЕРДИТЕЛЯ**

П.С. Мараховский, М.Б. Хина, Н.Н. Воробьев, А.В. Славин

НИИ "Курчатовский институт" - ВИАМ, ул. Радио 17, Москва, Российская Федерация, 105005

E-mail: petr@bmstu@mail.ru

В работе исследованы теплофизические, физико-химические свойства препрега КМКС-3м.150.Т10.37 и стеклопластика на его основе. Применяя методы многовариантной регрессии изучен процесс отверждения препрега. Показано, что наилучшим образом можно охарактеризовать экспериментальные зависимости в виде дифференциальных уравнений расхода компонентов n-го порядка с автоускорением, происходящих в три стадии. По результатам кинетического анализа были спрогнозированы мощности тепловыделений при отверждении препрега по двухступенчатым температурно-временным режимам. Введение дополнительной термообработки при температуре 150 °С позволило снизить внутренний саморазогрев материала на 16 °С. Методом конечных элементов рассчитано температурное поле при формовании данного материала. Показано, что предложенная модель позволяет определить характеристики температурного поля с погрешностью до $\pm 3\%$. Исследована температура стеклования стеклопластика по объему изделия и показано, что разница между максимальными и минимальными значениями может достигать 35 °С.

Ключевые слова: стеклопластик, моделирование, температура стеклования

**CALCULATION OF THE TEMPERATURE PROFILE DURING THE PRESSING
OF FIBERGLASS BASED ON EPOXY RESIN AND LATENT HARDENER**

P.S. Marakhovsky, M.B. Khina, N.N. Vorobyov, A.V. Slavin

NRC "Kurchatov institute" - VIAM, 17 Radio str., Moscow, Russian Federation, 105005

E-mail: petr@bmstu@mail.ru

The thermophysical, physical and chemical properties of the KMKS-3m.150.T10.37 prepreg and fiberglass based on it are investigated. Using multivariate regression methods, the prepreg curing process has been studied. It is shown that the experimental dependences can be best characterized in the form of differential equations for the flow of n-th order components with auto-acceleration occurring in three stages. According to the results of the kinetic analysis, the heat release capacities during the curing of the prepreg were predicted according to two-stage temperature-time regimes. The introduction of additional heat treatment at a temperature of 150 °C allowed to reduce the internal self-heating of the material by 16 °C. The finite element method is used to calculate the temperature field during the molding of this material. It is shown that the proposed model makes it possible to determine the characteristics of the temperature field with an error of up to $\pm 3\%$. The glass transition temperature of fiberglass in the volume of the product is investigated and it is shown that the difference between the maximum and minimum values can reach 35 °C.

Key words: fiberglass, modeling, glass transition temperature

Для цитирования:

Мараховский П.С., Хина М.Б., Воробьев Н.Н., Славин А.В. Расчет профиля температур при автоклавном формировании стеклопластика на основе эпоксидиановой смолы и латентного отвердителя. *Рос. хим. ж. (Ж. Рос. хим. об-ва)*. 2022. Т. LXVI. № 1. С. 3–9

For citation:

Marakhovsky P.S., Khina M.B., Vorobyov N.N., Slavin A.V. Calculation of the temperature profile during the pressing of fiberglass based on epoxy resin and latent hardener. *Ros. Khim. Zh.* 2022. V. LXVI. N 1. P. 3–9

ВВЕДЕНИЕ

Для совмещения армирующего наполнителя в композиционном материале (КМ) используются различные виды связующих на основе органических, элементоорганических и неорганических олигомеров. Одним из наиболее востребованных классов олигомеров с 60-х годов 20-го века, используемых для получения конструкционных пластиков, являются эпоксидные, так как эпоксидные группы являются стабильными и могут храниться до одного года. В присутствии катализаторов или сшивающих агентов (отвердителей) они вступают в реакцию с образованием сетчатых структур. Преимущественно для изготовления КМ применяют отвердители ароматического класса с торговым названием ДиаметХ (ТУ 2491-030-35785061-2010), Бензам АБА (ТУ 2225-415-048-72688-99), ДАДФС и т. д. [1–3]. Использование таких сшивающих агентов позволяет достичь теплостойкости полимерной матрицы вплоть до 200 °С, однако время жизнеспособности таких композиций при комнатной температуре составляет не более 2 недель. Если требуется создание системы с длительным временем хранения, то зачастую используются латентные отвердители, например, ДЦДА [4, 5]. Несмотря на явное преимущество над вышеупомянутыми отвердителями, при неправильном подборе режима формования КМ на его основе могут формироваться значительные перегревы в слоях пластика, приводящие к значительным термическим напряжениям или деструкции полимерной матрицы [6, 7].

Реакция сшивания олигомера может протекать по различным механизмам (радикальной полимеризации, поликонденсации, внутримолекулярных группировок и т.д.), тем не менее комплекс свойств полимера определяет соотношение физических и химических узлов сетки, топологическая структура которой зависит от условий отверждения материала [8]. В ряде работ показано, что использование одноступенчатых или двухступенчатых отверждения режимов не позволяет достигнуть максимальных физико-механических свойств полимера, в случае если первая или последующая ступень термообработки материала находится до

или после точки гелеобразования [9, 10]. Такие условия могут сформироваться и при отверждении крупногабаритных изделий. В случае изготовления многослойных изделий толщиной до 50 мм в ряде работ отмечалось зарождение термических трещин, различие температур стеклования по сечению, разное содержание полимерной матрицы по объему КМ вследствие неоднородного температурно-конверсионного поля при их формовании, которое может повлиять, в частности, на климатическое старение материалов [11–15].

Тем не менее для тонких материалов (от 2 до 5 мм) такие исследования преимущественно не проводились [7]. В основном сравниваются свойства материалов, изготовленных по различным технологиям, не привязываясь к температурному распределению при его отверждении [16 – 17].

Целью данной работы было оценить влияние температурного поля при автоклавном формовании на реализуемые значения температуры стеклования стеклопластика и ее распределение по поверхности плиты.

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 2.1 «Фундаментально-ориентированные исследования». «Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 г.» [18].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве связующего в стеклопластике КМКС-3м.150.Т10.37 применялся клеевой состав ВСК-14-3 на основе хлорсодержащей смолы и латентного отвердителя. В качестве армирующего наполнителя использовалась равнопрочная стеклоткань Т-10-14, изготовленная по ТУ 6-48-05786904-11-92 [19].

Технологический пакет собирался из препрега в направлении [20] и размещался в автоклаве на металлической оснастке. Контроль отверждения осуществлялся по термопарам, расположенным в технологическом пакете.

Для анализа температуры стеклования проводились измерения образцов стеклопластика размером 50×10×2 мм, вырезанных в направлении вдоль основы ткани. Отклонение от плоскопараллельности поверхностей составляло 0,01 мм. Они

нагревались со скоростью 5 К/мин в среде аргона со скоростью продувки 43 мл/мин в измерительной ячейке прибора динамического-механического анализа DMA 242С фирмы «Netzsch». Образцы подвергались первичному нагреву до 260 °С. На полученных зависимостях отмечались характеристические температуры области стеклования: T_{onset} – экстраполированное значение начала перехода на зависимости модуля упругости, °С; T_{loss} – пик на кривой модуля потерь, °С.

Температура термоокислительной деструкции материала определялась на приборе синхронного термического анализа STA 449 F1 фирмы «Netzsch» по ГОСТ 29127 [20]. Образец размером 4×4×1 мм нагревался со скоростью 20 К/мин в среде воздуха со скоростью продувки 70 мл/мин. Относительная погрешность измерения температуры 1,5 %.

Прогнозирование теплового эффекта отверждения олигомера в препреге производилось в программе Netzsch Termokinetics v 3.1.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ ПРИ ФОРМОВАНИИ ПОЛИМЕРНОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА В АВТОКЛАВЕ

В качестве физической модели объекта исследований представляется монолитное тело из калиброванного препрега толщиной 12 мм, размещенное на металлической оснастке пресса толщиной 15 мм в технологическом пакете. Вводится допущение, что контакт антиадгезионной пленки, препрега и металлической подложки является идеальным. Нагрев контролируется по термоэлектрическому преобразователю, расположенному в толще технологического пакета сборки. Считается, что диаметр спая пренебрежимо мал и не способен повлиять на регистрацию температуры, теплоотвод по термопарной проволоке не учитывался. Предполагается, что температурное поле, создаваемое при таком способе формования, является однородным. При достижении температуры T_i происходит реакция отверждения материала. Теплоперенос в материале осуществляется исключительно теплопроводностью. Радиационный теплообмен не учитывается в модели. При переходе связующего из вязко-текучего в вязко-упругое состояние к многослойному пакету прикладывается избыточное давление, при этом толщина и содержание наполнителя в технологическом пакете не изменяется. В силу того, что рассматриваемая краевая задача теплопроводности симметрична, для упрощения расчетов будет моделироваться 1/4 технологического пакета препрега. В модели не будет учитываться изменение теплофизических свойств препрега от степени конверсии.

Моделирование температурных полей при прессовании стеклопластика КМКС-3м.150.Т10.37 осуществлялось в программном продукте Comsol Multiphysics, при этом теплофизические свойства материала будут задаваться в виде констант (табл. 1).

Таблица 1

Теплофизические свойства препрега стеклопластика КМКС-3м.150.Т10.37

Наименование показателя	Значение
c_p , Дж/(кг·К)	1490
λ , Вт/(м·К)	0,41
ρ , (кг/м ³)	1520

Процессы отверждения клеевого связующего ВСК–14–3м и мощности тепловыделений при этом исследовали на установке термического анализа модульного типа DSC-1 производства швейцарской компании «Mettler-Toledo». Методом дифференциальной сканирующей калориметрии определены температурные и калориметрические характеристики реакций отверждения. Этим же методом, по результатам анализов, проведенных при скоростях нагрева 2,5, 5 и 10 °С/мин были исследованы кинетические параметры реакций.

Анализ реакции отверждения с использованием метода безмодельной кинетики показал, что результаты ДСК представляют собой прямолинейную зависимость в координатах уравнения Аррениуса (рис. 1).

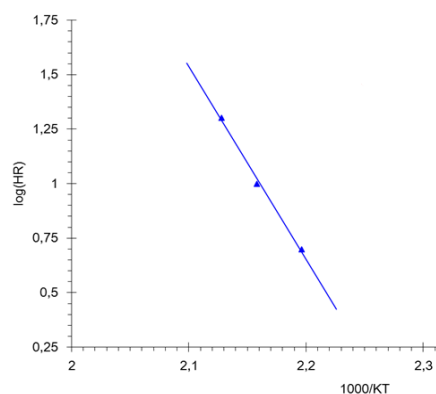


Рис. 1. Предварительная оценка кинетических параметров по методу безмодельной кинетики (ASTM E698)

Для определения количества стадий реакции была использована программа Peak Separation. При математическом описании экспериментальных кривых ДСК наилучшее совпадение аппроксимирующей кривой к экспериментальной наблюдается при представлении процесса отверждения как трех-стадийной реакции. Результаты разделения экспериментальной кривой на стадии показаны на рис. 2.

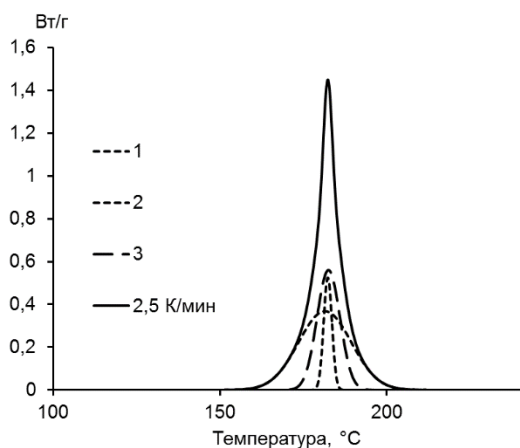


Рис. 2. Количество стадий реакции отверждения при нагреве связующего ВСК-14-3м со скоростью 2,5 К/мин

В программе Kinetics v. 3.1 каждая стадия трех-стадийной реакции воспроизводилась в качестве множества типов простых реакций для брутто-процесса. На рис. 3 приведен сравнительный анализ результатов расчета и экспериментальных данных, полученных при различных скоро-

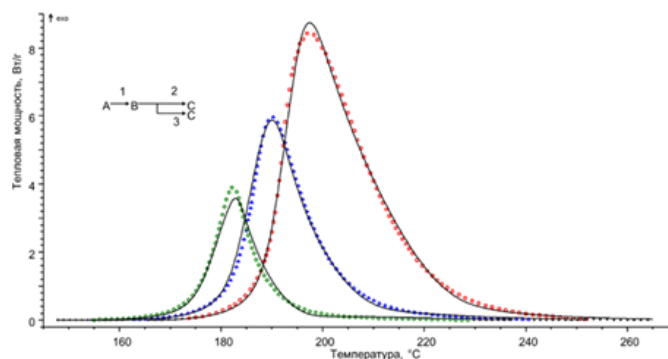


Рис. 3. Кривые ДСК, смоделированные с использованием рассчитанных кинетических параметров (сплошная линия), и их экспериментальные значения (точки)

Таблица 2

Кинетические параметры реакции отверждения клеевого связующего

1-я стадия			2-я стадия			3-я стадия		
E_1 , кДж/моль	$\log(K_0)_1$	n_1	E_2 , кДж/моль	$\log(K_0)_2$	n_2	E_3 , кДж/моль	$\log(K_0)_3$	n_3
69,35	6,89	0,24	71,78	7,47	0,87	88,67	10,62	2,33

Объемное тепловыделение в препреге стеклопластика при заданном температурно-временном режиме отверждения задавалось в зависимости от времени по результатам расчета в программе Netzsch Termokinetics v. 3.1 (рис. 4).

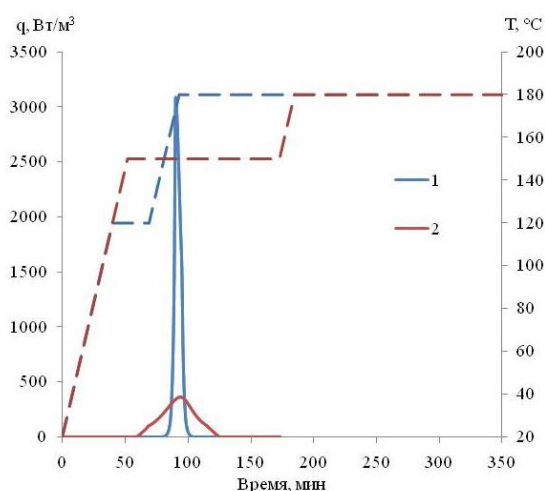


Рис. 4. Прогнозируемый тепловой эффект при отверждении препрега стеклопластика КМКС-3м.150.Т10.37 в условиях двухступенчатых режимов нагрева

стях нагрева. Результаты подтверждают адекватность выбранной модели брутто-процесса. Оптимизированные методом нелинейной регрессии Рунге-Кутты 4-го порядка кинетические параметры, рассчитанные для каждой из трех стадий представлены в табл. 1.

Конечно-элементный анализ проводился в программном обеспечении Comsol Multiphysics. Геометрическая модель разбивалась на 29071 треугольных элементов. На внешней поверхности модели задавался типовой температурный режим отверждения ПКМ с общим временем термообработки до 300 мин. Тепловой поток, проходящий сквозь боковые поверхности принимался равным нулю в силу симметрии рассматриваемой краевой задачи. Расчет температуры производился в середине многослойного пакета.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Как видно из представленных результатов при отверждении пакета разброс температур как по его площади, так и по толщине составляет не более 26 °С, даже при отверждении по режиму с максимальными внутренним тепловыделениями. Предложенная модель позволяет прогнозировать температурное поле с погрешностью до ± 3% (рис. 5,6). Значительные градиенты температур при изготовлении материала могут повлиять на распределение физико-механических свойств материала, поэтому производилась оценка температуры стеклования

на образцах № 1 – 24, вырезанных в различных местах плиты толщиной 12 мм. Результаты приведены в табл. 3. Условно монолитная плита стеклопластика была разделена на 2 части, 1-я из которых находится в непосредственной близости к технологическому пакету, 2-я к металлической оснастке. Термопары в пакете препрега располагались в центре плиты слева направо под номерами 4, 3 и 2.

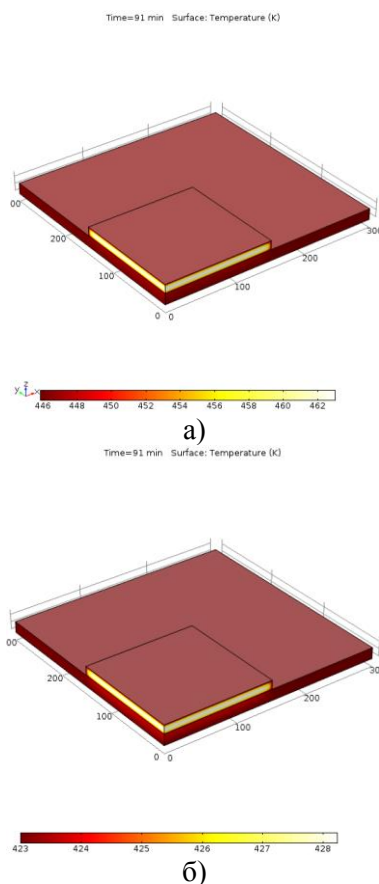


Рис. 5. Распределение температур в срединной плоскости технологического пакета препрега стеклопластика КМКС-Зм.150.Т10.37 на 90 мин формования при отверждении по режиму 1 и 2

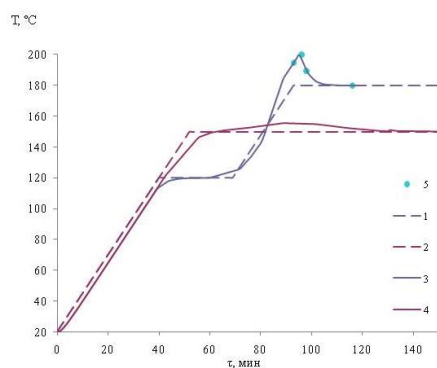


Рис. 6. Распределение температур в срединной плоскости технологического пакета препрега стеклопластика КМКС-Зм.150.Т10.37 (3,4) при отверждении по режиму 1 и 2 (1, 2), 5 – экспериментальные данные

Таблица 3

Характеристические температуры области стеклования образцов стеклопластика

Наименование показателя	Номер образца			
Образцы стеклопластика, вырезанные вдоль термопары №4 (плита №1)				
	1	2	3	4
$T_{onset}, ^\circ\text{C}$	177,3	177,6	183,8	190,1
$T_{loss}, ^\circ\text{C}$	198,4	195,7	197,1	199,3
Образцы стеклопластика, вырезанные вдоль термопары №3 (плита №1)				
	5	6	7	8
$T_{onset}, ^\circ\text{C}$	186,5	188,5	190,2	195,7
$T_{loss}, ^\circ\text{C}$	201,3	207,5	201,1	214,6
Образцы стеклопластика, вырезанные вдоль термопары №2 (плита №1)				
	9	10	11	12
$T_{onset}, ^\circ\text{C}$	174,4	175,2	179,1	184,6
$T_{loss}, ^\circ\text{C}$	204,8	202,3	202,5	198,7
Образцы стеклопластика, вырезанные вдоль термопары №4 (плита №2)				
	13	14	15	16
$T_{onset}, ^\circ\text{C}$	182,0	182,7	180,1	189,0
$T_{loss}, ^\circ\text{C}$	188,5	196,3	189,8	199,1
Образцы стеклопластика, вырезанные вдоль термопары №3 (плита №2)				
	17	18	19	20
$T_{onset}, ^\circ\text{C}$	188,8	198,5	187,7	180,0
$T_{loss}, ^\circ\text{C}$	201,6	202,3	190,6	193,7
Образцы стеклопластика, вырезанные вдоль термопары №2 (плита №2)				
	21	22	23	24
$T_{onset}, ^\circ\text{C}$	163,8	167,3	185,1	188,4
$T_{loss}, ^\circ\text{C}$	186,7	188,2	201,8	192,2

Для образцов № 5-8, 17-20, вырезанных из середины плиты наблюдаются самые высокие значения температуры стеклования. Для других образцов, вырезанных из края плиты, наблюдаются самые низкие значения температуры стеклования.

ВЫВОДЫ

Изучена кинетика отверждения препрега КМКС -Зм. 150.Т10.37. Установлено, что клеящее связующее отверждается в три стадии, которые однозначно определяются уравнениями n-го порядка с автоускорением. Спрогнозировано температурное поле при прессовании данного материала методом конечных элементов.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» - ВИАМ.

This study was carried out using the equipment of the Collective use center "Core facilities" National research center "Kurchatov institute" - VIAM

Авторы заявляют об отсутствии кон-

фликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

The authors declare the absence a conflict of interest warranting disclosure in this article.

ЛИТЕРАТУРА

1. Еселев А.Д., Бобылев В.А. Отвердители для клеев на основе эпоксидных смол. Клеи. Герметики. Технологии. 2005. № 4. С. 2–8.
2. Бобылев В.А. Отвердители эпоксидных смол. Композитный мир. 2006. № 4. С. 20–24. Электронный ресурс: URL: <http://www.npkstep.ru>, <http://www.npkstep.ru> (дата обращения: 12.07.2021).
3. Чурсова Л.В., Бабин А.Н., Панина Н.Н., Ткачук А.И., Терехов И.В. Использование ароматических аминных отвердителей для создания эпоксидных связующих для ПКМ конструкционного назначения. Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн. 2016. № 2. С. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 12.07.2021) dx/doi/org/10.18577/2307-6046-2016-0-6-4-4.
4. Хрульков А.В., Григорьев М.М., Язвенко Л.Н. Перспективные внедрения безавтоклавных технологий для изготовления конструкционных материалов. Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн. 2016. № 2. С. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 12.07.2021) DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-2-6-6.
5. Ткачук А.И., Чурсова Л.В., Панина Н.Н., Гуревич Я.М., Бабин А.Н., Малков Г.В. Влияние состава комплексной каталитической системы отверждения дициандиамида-несимметричная мочевины на тепловой эффект реакции полимеризации эпоксидиановых олигомеров. Клеи. Герметики. Технологии. 2014. № 11. С. 2–8.
6. 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.
7. Баринов Д.Я., Майорова И.А., Мараховский П.С., Зуев А.В., Куцевич К.Е., Лукина Н.Ф. Математическое моделирование температурных полей при отверждении толстостенной плиты стеклопластика. Перспективные материалы. 2015. № 4. С. 5–14.
8. Marakhovskii P.S., Ospennikova O.G., Vorob'ev N.N., Shorstov S.Y., Vasyukov A.N., Barinov D.Y. Evaluation of the variability of glass transition temperature of carbon-fiber-reinforced plastic fabricated by autoclave molding. Polymer Science. Series D. 2020. V. 13. N 1. P. 73-79.
9. Тайгер А.А. Физико-химия полимеров. М: Научный мир, 2007. 573 с.
10. Marakhovskiy P.S., Kondrashov S.V., Gurevich Y.M., Mayorova I.A., Shvedkova A.K., Valevin E.O., Dyachkova T.P., Yurkov G.Y. Structurization and moisture absorption features of epoxy nanocomposites with carbon nanotubes. Inorganic Materials: Applied Research. 2015. V. 6. N 5. P. 515-520.
11. Kondrashov S.V., Marakhovskiy P.S., Mayorova I.A., Egorov A.A., Mansurova I.A., Yurkov G.Y. Influence of curing mode on formation of epoxy composite structure in the presence of carbon nanotubes. Inorganic Materials: Applied Research. 2014. V. 5. N 5. P. 516-521.

REFERENCES

1. Yeselev A.D., Bobylev V.A. Hardeners for adhesives based on epoxy resins // Klei. Germetiki. Technologii. 2005. N 4. P. 2–8. (In Russian).
2. Bobylev V.A. Hardeners of epoxy resins // Kompozitnyi mir. 2006. N 4. P. 20-24. Electronic resource: URL: <http://www.npkstep.ru>, <http://www.npkstep.ru> (date of application: 12.07.2021) (In Russian).
3. Chursova L.V., Babin A.N., Panina N.N., Tkachuk A.I., Terekhov I.V. Use of aromatic amine hardeners to create epoxy binders for PCM for structural purposes // Trudu VIAM: electron. nauch.-tech. jurnal.. 2016. N. 2. St. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (accessed: 12.07.2021) dx/doi/org/10.18577/2307-6046-2016-0-6-4-4 (In Russian).
4. Khruikov A.V., Grigoriev M.M., Yazvenko L.N. Promising implementations of autoclave-free technologies for the manufacture of structural materials // Trudu VIAM: electron. nauch.-tech. jurnal. 2016. N 2. St. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (accessed: 12.07.2021) DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-2-6-6 (In Russian)
5. Tkachuk A.I., Chursova L.V., Panina N.N., Gurevich Ya.M., Babin A.N., Malkov G.V. Influence of the composition of the complex catalytic system of curing dicyandiamide-asymmetric urea on the thermal effect of the polymerization reaction of epoxidian oligomers // Glues. Sealants. Technologies. 2014. N 11. P. 2-8.
6. Kutsevich K.E., Aleksashin V.M., Petrova A.P., Antyufeeva N.V. Investigation of kinetics of curing reactions of adhesive binders // Klei. Germetiki. Technologii. 2014. N 11. P. 27–31 (In Russian).
7. Barinov D.Ya., Mayorova I.A., Marakhovskiy P.S., Zuev A.V., Kutsevich K.E., Lukina N.F. Mathematical modeling of temperature fields during curing of thick-walled fiberglass plate // Perspektivnye materialy. 2015. N 4. P. 5–14 (In Russian).
8. Marakhovskii P.S., Ospennikova O.G., Vorob'ev N.N., Shorstov S.Y., Vasyukov A.N., Barinov D.Y. Evaluation of the variability of glass transition temperature of carbon-fiber-reinforced plastic fabricated by autoclave molding // Polymer Science. Series D, 2020. V. 13. N 1. P. 73–79.
9. Tiger A.A. Physico-chemistry of polymers. M: Nauchny mir, 2007. 573 p. (In Russian)
10. Marakhovskiy P.S., Kondrashov S.V., Gurevich Y.M., Mayorova I.A., Shvedkova A.K., Valevin E.O., Dyachkova T.P., Yurkov G.Y. Structurization and moisture absorption features of epoxy nanocomposites with carbon nanotubes // Inorganic Materials: Applied Research. 2015. V. 6. N 5. P. 515-520.
11. Kondrashov S.V., Marakhovskiy P.S., Mayorova I.A., Egorov A.A., Mansurova I.A., Yurkov G.Y. Influence of curing mode on formation of epoxy composite structure in the presence of carbon nanotubes // Inorganic Materials: Applied Research. 2014. V. 5. N 5. P. 516-521

12. *Stringer L.G., Hayman R.J., Hinton M.J., Badcock R.A., Wisnom M.R.* Curing stresses in thick polymer composite components part II: management of residual stresses. 12th International Conference on Composite Materials. (Paris, July, 1999). 1999. 861 p.
13. *Лантев А.Б., Николаев Е.В., Колпачков Е.Д.* Термодинамические характеристики старения полимерных композиционных материалов в условиях реальной эксплуатации. *Авиационные материалы и технологии*. 2018. № 3. С. 80-88. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-3-80-88.
14. *Каблов Е.Н., Старцев В.О.* Климатическое старение полимерных композиционных материалов авиационного назначения. I. Оценка влияния значимых факторов воздействия. *Деформация и разрушение материалов*. 2019. № 12. С. 7 – 16.
15. *Каблов Е.Н., Старцев В.О.* Системный анализ влияния климата на механические свойства полимерных композиционных материалов по данным отечественных и зарубежных источников (обзор). *Авиационные материалы и технологии*. 2018. № 2. С. 47 – 58. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-2-47-58.
16. *Петрова А.П., Чурсова Л.В., Коган Д.И.* Технология пропитки ПКМ способом пропитки пленочным связующим. *Клеи. Герметики. Технологии*. 2016. № 6. С. 25 – 29.
17. *Adeodu A., Anyaeche C., Oluwole O., Alo D.* Effect of microwave and conventional autoclave post-curing on mechanical and micro-structural properties of particulate reinforced polymer matrix composites. *Advances in materials*. 2015. 4 (5). P. 85–94.
18. *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.
19. *Раскутин А.Е.* Российские полимерные композиционные материалы нового поколения, их освоение и внедрение в перспективных разрабатываемых конструкциях. *Авиационные материалы и технологии*. 2017. № 5. С. 349–367. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-349-367.
20. *ГОСТ 29127.* Пластмассы. Термогравиметрический анализ. Метод сканирования по температуре. 1993.
12. *Stringer L.G., Hayman R.J., Hinton M.J., Badcock R.A., Wisnom M.R.* Curing stresses in thick polymer composite components part II: management of residual stresses // 12th International Conference on Composite Materials. (Paris, July, 1999). 1999. 861 p.
13. *Laptev A.B., Nikolaev E.V., Kolpachkov E.D.* Thermodynamic characteristics of aging of polymer composite materials in real operation // *Aviatsionnue materialu i tehnologii*, 2018. N 3. P. 80 – 88. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-3-80-88. (In Russian).
14. *Kablov E.N., Startsev V.O.* Climatic aging of polymer composite materials for aviation purposes. I. Assessment of the influence of significant impact factors // *Deformatsiya i razrushenie materialov*. 2019. N 12. P. 7 – 16. (In Russian).
15. *Kablov E.N., Startsev V.O.* System analysis of climate influence on mechanical properties of polymer composite materials according to domestic and foreign sources (review) // *Aviatsionnue materialu i tehnologii*. 2018. N 2. P. 47 – 58. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-2-47-58. (In Russian).
16. *Petrova A.P., Chursova L.V., Kogan D.I.* Technology of impregnation of PCM by the method of impregnation with a film binder // *Klei. Germetiki. Tehnologii*. 2016. N 6. P. 25 – 29 (In Russian).
17. *Adeodu A., Anyaeche C., Oluwole O., Alo D.* Effect of microwave and conventional autoclave post-curing on mechanical and micro-structural properties of particle reinforced polymer matrix composites // *Advances in materials*. 2015. 4 (5). P. 85 – 94.
18. *Kablov E.N.* Innovative developments of FSUE "VIAM" SSC RF for the implementation of "Strategic directions of development of materials and technologies of their processing for the period up to 2030" // *Aviatsionnue materialu i tehnologii*. 2015. N 1 (34). P. 3 – 33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33. (In Russian).
19. *Raskutin A.E.* Russian polymer composite materials of a new generation, their development and implementation in promising designs being developed // *Aviatsionnue materialu i tehnologii*. 2017. N 5. P. 349-367. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-349-367 (In Russian).
20. *GOST 29127.* Plastics. Thermogravimetric analysis. Temperature scanning method. 1993. (In Russian).

*Поступила в редакцию (Received) 26.11.2021
Принята к опубликованию (Accepted) 27.12.2021*