

DOI: 10.15593/2224-9400/2017.3.08

УДК 678.05

**Д.М. Кисельков, А.И. Слободинюк, Т.Е. Ощепкова**

Институт технической химии УрО РАН

**ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМА ОТВЕРЖДЕНИЯ  
ТЕПЛОСТОЙКОГО СВЯЗУЮЩЕГО ДЛЯ ПКМ**

*В настоящее время полимерные композиционные материалы (ПКМ) нашли широкое применение в изделиях авиационного назначения. Однако существенным недостатком ПКМ является небольшой температурный диапазон эксплуатации, что ограничивает номенклатуру изготавливаемых деталей. Элементом ПКМ, ограничивающим допускаемую температуру эксплуатации, является полимерная матрица на основе эпоксидных смол.*

*Широкое применение этого класса материалов связано с решением целого спектра научно-технических задач, в том числе с выбором оптимального температурно-временного режима отверждения при изготовлении композитов методом RTM и инфузии. В связи с этим актуальным является разработка полимерного состава, работающего в условиях высоких механических и тепловых нагрузок.*

*Цель данного исследования – разработка связующего, обладающего высокими деформационно-прочностными характеристиками в интервале температур от 25 до 170 °С, необходимыми эксплуатационными и технологическими характеристиками, а также выбор оптимального режима отверждения.*

*В качестве исходных компонентов использовали эпоксидные смолы разной функциональности: двухфункциональную – диглицидиловый эфир бисфенола А, трехфункциональную – триглицидил-п-аминофенол, и четырехфункциональную – тетраглицидиламинодифенилметанан. В качестве отвердителя использовали 2,2'-диметил-4,4'-метиленбис-(циклогексилламин).*

*Для определения оптимального режима отверждения полимерного связующего было выбрано два режима при заданном составе связующего. Полноту конверсии реакционно-способных эпоксидных групп определяли методом ИК-спектроскопии по исчезновению полосы поглощения при 908 см<sup>-1</sup>.*

*Методом дифференциально сканирующей калориметрии показано, что при выборе оптимального режима отверждения можно достичь температуры стеклования 199 °С, что позволяет использовать разработанный состав при изготовлении ПКМ авиационного назначения.*

*Определен оптимальный режим отверждения, при котором достигается максимальная условная прочность, при стабильно высоком уровне критической деформации (более 10 %) и высоком значении температуры стеклования.*

**Ключевые слова:** полимерный композиционный материал, отверждение, эпоксидная смола, аминный отвердитель, температура стеклования, связующее, условная прочность.

**D.M. Kiselkov, A.I. Slobodinyuk, T.E. Oschepkova**

Institute of Technical Chemistry of Ural Branch of the RAS

## **OPTIMIZATION OF CURING PROCESS FOR HIGH TEMPERATURE RESISTANT BINDER FOR POLYMER COMPOSITE MATERIALS**

*Polymer composite materials (PCM) are widely used in construction of aircrafts and space crafts. However, a significant disadvantage of the PCM is a small temperature performance range, that limits its applicability. Temperature characteristics are limited by a polymer matrix usually based on epoxy resins.*

*Manufacturing process of this class of materials is associated with the solution of a whole range of scientific and technical problems, including the choice of the optimum temperature-time curing regime in the manufacture of composites by RTM and infusion. Thus the development of a polymer composition that operates under conditions of high mechanical and thermal loads.*

*The purpose of this study was to develop a polymer binder that has high deformation-strength characteristics in the temperature range from 25 °C to plus 170 °C and determine the optimum curing regime.*

*As base components, epoxy resins of different functionality were used: bifunctional diglycidyl ether of bisphenol A, 3-functional triglycidyl-p-aminophenol, and 4-functional – tetraglycidylaminodiphenylmethane. As the hardener, 2,2'-Dimethyl-4,4'-methylenebis-(cyclohexylamine) was used.*

*In order to select the optimum curing regime for the polymer binder, two modes were chosen. The conversion of reactive epoxy groups was measured by FTIR spectroscopy and the complete curing was confirmed by the disappearance of the absorption band at 908 cm<sup>-1</sup>.*

*Using the differential scanning calorimetry method, it was shown that glass transition temperature of 199 °C can be achieved with optimum curing regime, which makes it possible to use the developed composition in the manufacture of PCM for aerospace industry.*

*The optimal curing regime was determined, highest level of relative strength was achieved with a high level of critical deformation (more than 10 %) and a high glass transition temperature.*

**Keywords:** *polymeric composite material, curing, epoxy resin, amine curing agent, glass transition temperature, binder, nominal strength.*

Применение полимерных композиционных материалов (ПКМ) в авиастроении решает целый комплекс задач. Наряду с существенным снижением массы конструкции планера, а следовательно, повышением эффективности полетов, резко снижаются затраты на производство и эксплуатацию транспортного средства. По целому комплексу характеристик, в частности плотности, модулю Юнга, прочности при растяжении, ползучести, демпфирующей способности, современные ПКМ в диапазоне температур от 60 до 170 °С превосходят алюминиевые сплавы, а в некоторых случаях и титановые сплавы. В связи с этим в современных, а также разрабатываемых пассажирских авиалайнерах доля деталей из ПКМ неизбежно растет и достигает 22–39 % в Airbus A380, A350 и 50 % в Boeing 787. Основные классы ПКМ, которые применяются для данного типа изделий, – углепластики и стеклопластики [1, 2].

Широкое применение этого класса материалов связано с решением целого спектра научно-технических задач, в том числе с выбором оптимального температурно-временного режима отверждения при изготовлении композитов методом RTM и инфузии. Процесс отверждения изделий из термореактивных ПКМ сопровождается, как правило, экзотермической реакцией. Вследствие низкой теплопроводности композитов при их отверждении возникает существенная неоднородность температурно-конверсионного поля, перпендикулярного слоям препрега, которая неуклонно возрастает с увеличением толщины изделия. При неоптимальном температурно-временном режиме отверждения это приводит к существенному перегреву внутренних слоев материала изделия, неоднородной плотности сетки, деструкции связующего, накоплению внутренних напряжений, что снижает физико-механические характеристики конечного материала.

При выборе оптимального режима отверждения ПКМ, гарантирующими стабильно высокое качество материала, необходимо:

- снижение температурно-конверсионных неоднородностей в ПКМ;
- снижение продолжительности режима отверждения;
- полное отверждение связующего или клеевого препрега [3].

Функции матрицы в стекло-, углепластике многообразны. В зависимости от химического строения основного компонента и выбранного отвердителя регулируются теплостойкость материала, герметичность, трансверсальные и сдвиговые характеристики, технологические свойства.

Для того чтобы полимерное связующее эффективно выполняло свое назначение в ПКМ, оно должно отвечать ряду требований:

1. Хорошая смачивающая способность и высокая адгезия к волокнистому наполнителю.
2. Высокая когезионная прочность и высокий модуль упругости при вязком характере разрушения.
3. Достаточная деформативность в широком интервале температур.
4. Незначительная усадка при отверждении и значение коэффициента термического расширения, близкое к значению этого показателя армирующего наполнителя.
5. Отсутствие при отверждении выделений побочных продуктов, нарушающих монолитность ПКМ.
6. Достаточная теплостойкость и стабильность физико-механических характеристик при хранении и эксплуатации в широком интервале температур.
7. Гидрофильность и водостойкость.
8. Приемлемые технологические свойства (вязкость, жизнеспособность, температура отверждения и т.д.) [4].

В качестве связующих для высокомодульных и высокопрочных ПКМ в ответственных конструкциях, как правило, используют эпоксидные олигомеры [5].

Теплостойкость ПКМ определяется сохранением прочностных характеристик ПКМ при высоких температурах и зависит от температуры стеклования связующих. При этом наблюдается снижение температуры стеклования связующих в контакте с армирующими волокнами по сравнению с температурой стеклования связующих в блоке [6, 7].

В работах [8–10] для создания теплостойкого связующего использовали в качестве отвердителя эпоксидных олигомеров 3,3'-диаминодифенилсульфон, использование которого позволяет достичь показателя температуры стеклования не менее 190 °С. Однако существенным недостатком такого типа систем является крайне низкий уровень деформационных свойств отвержденного композита, что не позволяет использовать его в качестве полимерной матрицы для ПКМ, а также для изготовления формообразующих оснасток.

В работе [11] с целью создания теплостойкого связующего использовали смеси эпоксидных смол разной функциональности: двухфункциональную – диглицидиловый эфир бисфенола А, трехфункциональную – триглицидил-*n*-аминофенол, и четырехфункциональную – тетраглицидиламинодифенилметанан. В качестве отвердителя авторы использовали 3,3'-диаминодифенилсульфон. Авторы показывают, что, варьируя соотношение эпоксидных смол в смеси, можно регулировать комплекс физико-механических характеристик: температуру стеклования и прочность. Однако авторами не указан оптимальный температурно-временной режим отверждения с целью обеспечения стабильно высоких физико-механических характеристик в широком интервале температур эксплуатации.

Таким образом, создание теплостойких ПКМ для изделий, работающих в условиях высоких механических и тепловых нагрузок, до сих пор является актуальной задачей.

Целью данного исследования являлась разработка связующего, обладающего высокими деформационно-прочностными характеристиками в интервале температур от 25 до 170 °С, необходимыми эксплуатационными и технологическими характеристиками.

Согласно литературным данным [12, 13], было выбрано два режима отверждения.

### **Объекты и методы исследований**

В качестве полимерной основы ПКМ использовали смесь эпоксидных смол разной функциональности и отвердитель аминного типа, приобретенных в компании Sigma-Aldrich. Характеристики смол и отвердителя приведены в табл. 1.

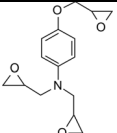
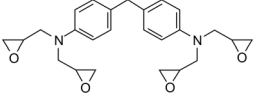
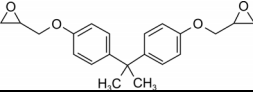
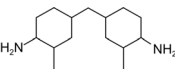
Механические характеристики – условную прочность при растяжении  $\sigma_k$  (максимальное напряжение, рассчитанное на начальное сечение образца), относительную критическую деформацию  $\epsilon_k$  – определяли на универсальной испытательной машине INSTRON-3365 при температуре 25 и 170 °С.

Температуру стеклования образцов измеряли на дифференциальном сканирующем калориметре DSC 822<sup>e</sup> фирмы METLER-TOLEDO при скорости сканирования 0,02 °С/с.

Полноту конверсии реакционно-способных эпоксидных групп определяли методом ИК-спектроскопии на фурье-спектрометре Vertex80 фирмы Bruker по исчезновению полосы поглощения при 908 см<sup>-1</sup>. Образцы препарировали согласно методике, описанной в работе [12].

Таблица 1

## Состав связующего для ПКМ

Структурная формула	Название	Брутто-формула	Молекулярная масса, г/моль <sup>-1</sup>	Плотность, г/см <sup>3</sup> , при 25 °С	Показатель преломления, <i>n</i> D при 20 °С	Температура вспышки, °С
	N,N,N'-Glycidyl-p-aminophenol	C <sub>15</sub> H <sub>19</sub> NO <sub>4</sub>	277,32	1,22	1,567	>110
	4,4'-Methylenebis (N,N'-diglycidyl aniline)	C <sub>25</sub> H <sub>30</sub> N <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	422,52	1,15	1,601	>110
	Poly(Bisphenol-A-co-epichlorohydrin)	C <sub>21</sub> H <sub>24</sub> O <sub>4</sub>	340,42	1,17	1,580	>110
	2,2'-Dimethyl-4,4'-methylenebis-(cyclohexylamin)	C <sub>15</sub> H <sub>30</sub> N <sub>2</sub>	238,00	0,94	1,499	>110

## Результаты и обсуждение

Стабильно высокие физико-механические характеристики полимерной матрицы определяются регулярностью структуры полимерной сетки, которую при использовании смесей эпоксидных смол разной функциональности можно достичь многоступенчатым режимом отверждения, при этом происходит поэтапное отверждение каждого из компонентов. После каждой ступени отверждения должна повышаться температура стеклования связующего. При таком подходе можно ждать образования взаимопроникающих сеток, с регулярной структурой полимерной сетки. Данный подход должен приводить к образованию продукта с оптимальными физико-механическими характеристиками, а также к реализации максимально возможной температуры стеклования.

Для определения оптимального режима отверждения полимерного связующего было выбрано два режима при заданном составе связующего. Состав приведен в табл. 2.

Таблица 2

Состав связующего

Компонент	Массовая доля, %	Мольная доля
N,N,N-Glycidyl p-aminophenol	22	0,24
4,4'-Methylenebis(N,N-diglycidylaniline)	17	0,12
Poly(Bisphenol A-co-epichlorohydrin)	27	0,23
2,2'-Dimethyl-4,4'-methylenebis-(cyclohexylamin)	34	0,41

При первом режиме отверждения «25→120→205» образцы отверждали при комнатной температуре (25 °С) в течение 24 ч, затем нагревали при 120 °С в течение 6 ч, после этого 6 ч при 205 °С. При втором режиме отверждения «80→150→180» образец нагревали в течение 1 ч при 80 °С, затем происходил нагрев до 150 °С в течение 1,5 и 1 ч при 180 °С.

На рис. 1, 2 приведены ИК-спектры композиций, отвержденных по режимам 1 и 2. Видно, что в обоих случаях после последней стадии отверждения не остается свободных эпоксидных групп (полоса поглощения 908 см<sup>-1</sup>), что свидетельствует о полноте прохождения реакции.

Анализ данных, полученных с помощью ДСК-калориметрии (рис. 3), показывает, что при режиме отверждения «25→120→205» температура стеклования закономерно повышается с 55 до 131 °С и до 173 °С после третьей стадии отверждения.

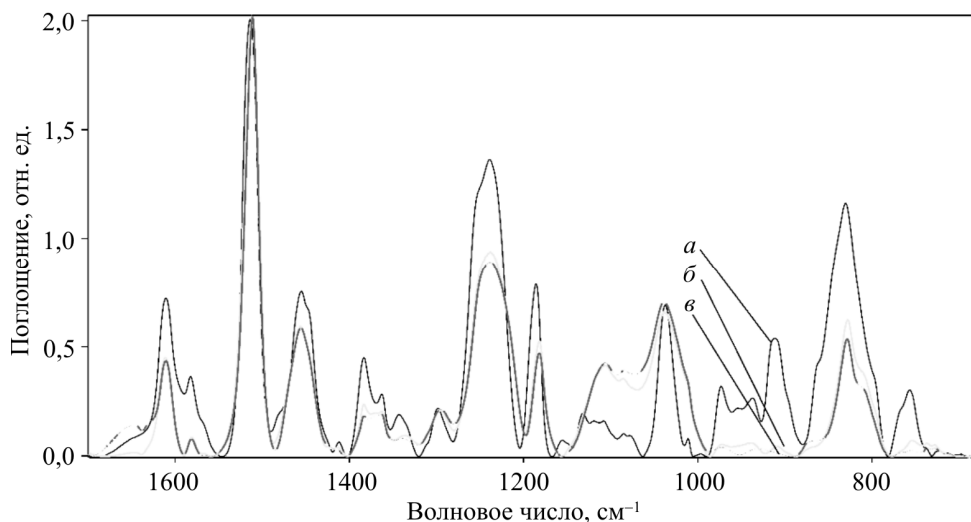


Рис. 1. ИК-спектр этапов отверждения композиции по режиму «25→120→205»: а – исходная смесь; б – 120 °С, 6 ч; в – 205 °С, 6 ч

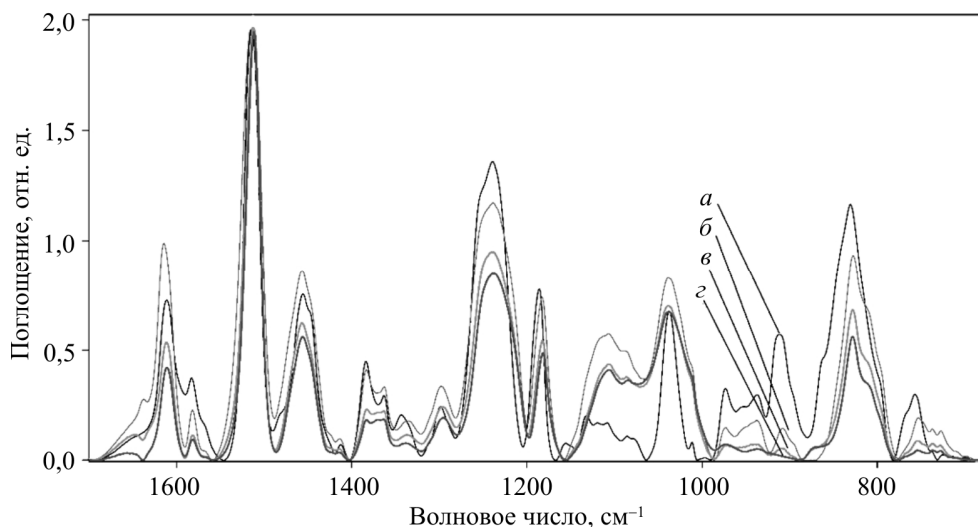


Рис. 2. ИК-спектр этапов отверждения композиции по режиму «80→150→180»: *a* – исходная смесь; *б* – 80 °С, 1 ч; *в* – 150 °С, 1,5 ч; *г* – 180 °С, 1 ч

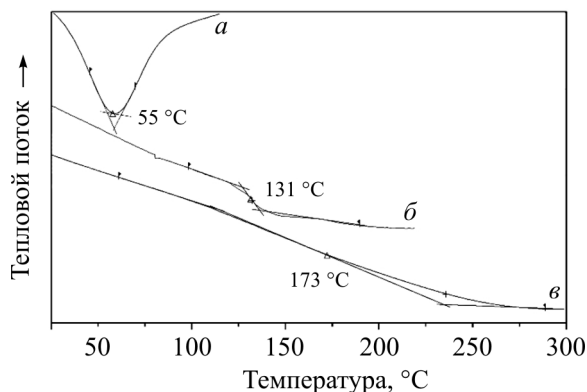


Рис. 3. Кривые ДСК этапов отверждения при режиме «25→120→205»: *a* – 25 °С, 24 ч; *б* – 120 °С, 6 ч; *в* – 205 °С, 6 ч

При втором режиме отверждения температура стеклования повышается с 72 до 164 °С. Для достижения максимальной температуры стеклования проводили постотверждение при 180 °С в течение 5 ч, в результате чего температура стеклования повысилась до 199 °С, причем температура стеклования отвержденного композита выше на 26 °С при данном режиме отверждения, что свидетельствует о получении полимера с более регулярной структурой полимерной матрицы (рис. 4).



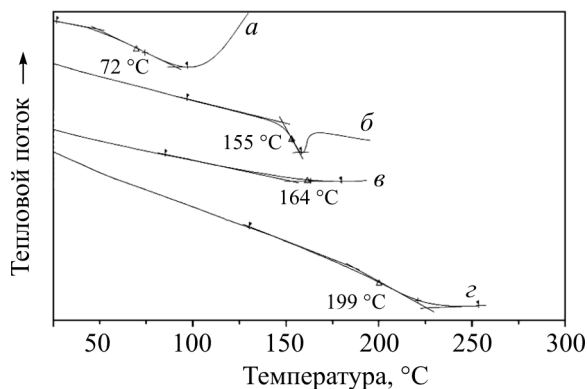


Рис. 4. Кривые ДСК этапов отверждения при режиме «80→150→180»: а – 80 °С, 1 ч; б – 150 °С, 1,5 ч; в – 180 °С, 1 ч; г – 180 °С, 5 ч

Были определены физико-механические характеристики после каждой стадии отверждения (табл. 3).

Таблица 3

Физико-механические характеристики этапов отверждения

Режим отверждения	Стадия отверждения	Условная прочность $\sigma_{к}$ , МПа	Максимальная деформация $\varepsilon_{к}$ , %
25→120→205	25 °С (24 ч)	5,5	25
	25 °С (24 ч) → 120 °С (6 ч)	20,1	17
	25 °С (24 ч) → 120 °С (6 ч) → 205 °С (6 ч)	12,7 7,6*	9 12*
80→150→180	80 °С (1 ч)	56,5	29
	80 °С (1 ч) → 150 °С (1,5 ч)	35,3	24
	80 °С (1 ч) → 150 °С (1,5 ч) → → 180 °С (1 ч)	24,1 8*	17 16*
	80 °С (1 ч) → 150 °С (1,5 ч) → → 180 °С (1 ч) → 180 °С (5 ч)	21,7 15,3*	12 26*

\* Характеристики при 170 °С.

При первом режиме отверждения максимальная прочность наблюдается для образца после отверждения 1 сут при 25 °С и 6 ч при 120 °С. При этом на ИК-спектре наблюдается полоса поглощения при 908 см<sup>-1</sup>, что свидетельствует о неполной конверсии эпоксидных групп. При дальнейшем отверждении возрастает плотность сетки, повышается температура стеклования с 131 до 173 °С.

При втором режиме отверждения условная прочность и критическая деформация аддитивно снижаются с каждой последующей стадией отвер-

ждения с 56,5 до 21,7 МПа. При этом необходимо отметить, что уровень критической деформации остается неизменно высоким (более 10 %).

Сравнение отвержденных образцов при первом и втором режиме отверждения показывает, что наилучшие физико-механические характеристики для данного связующего достигаются при режиме отверждения «80→150→180». При этом условная прочность при комнатной температуре в 1,7 раза выше, чем при режиме «25→120→205», а при температуре 170 °С в 2,01 раза при стабильно высокой уровне критической деформации (более 10 %). При этом важный технологический параметр, такой как время отверждения, значительно ниже при режиме «80→150→180». В связи с этим данная полимерная композиция представляет интерес для использования ее в качестве связующего для изготовления ПКМ авиационного назначения.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 16-48-590404р\_а) и программы УМНИК (договор 8999ГУ/2015).*

### **Список литературы**

1. Клеевые препреги / Л.А. Дементьева, А.А. Серезников, Л.И. Бочарова, Л.И. Аниховская // Клей. Герметики. Технологии. – 2008. – № 11. – С. 14–16.
2. Зорин В.А. Опыт применения композиционных материалов в изделиях авиационной и ракетно-космической техники (обзор) // Конструкции из композиционных материалов. – 2011. – № 4. – С. 44–59.
3. Оптимизация режима отверждения изделий из полимерных композитов на основе клеевых препрегов / О.С. Дмитриев, В.Н. Кириллов, С.В. Мищенко, С.О. Дмитриев // Клей. Герметики. Технологии. – 2009. – № 5. – С. 17–24.
4. Калинин В.А., Макаров М.С. Намотанные стеклопластики. – М.: Химия, 1986, 268с.
5. Чичерин И.З., Смехов Ф.М., Жердев Ю.В. Эпоксидные полимеры и композиции. – М.: Химия, 1982. – 230 с.
6. Сидоров О.И. Исследование процессов формирования свойств органопластиков // Конверсия в машиностроение. – 2002. – № 4. – С. 62–67.
7. Высокопрочные органопластики на основе жгута Армос-600 / Н.В. Пименов, Ю.В. Антипов, А.А. Кульков, Л.Ф. Киркина // Вопросы оборонной техники. – 2003. – Вып. 3-4. – С. 59–61.

8. Self-healing epoxy composite with heat-resistant healant / Y.C. Yuan, X.J. Ye, M.Z. Rong, M.Q. Zhang, G.C. Yang, J.Q. Zhao // *ACS applied materials & interfaces*. – 2011. – Vol. 3, № 11. – P. 4487–4495.

9. Curing and thermal behavior of epoxy resin in the presence of silicon-containing amide amines / P. Khurana, S. Aggarwal, A.K. Narula, V.Choudhary // *Journal of applied polymer science*. – 2003. – № 87 (8). – P. 1345–1353.

10. Levchik S.V., Weil E.D. Thermal decomposition, combustion and flame-retardancy of epoxy resins—a review of the recent literature // *Polymer International*. – 2004. – Vol. 53, № 12. – P. 1901–1929.

11. Hourston D.J., Lane J.M., Zhang H.X. Toughening of epoxy resins with thermoplastics: 3. An investigation into the effects of composition on the properties of epoxy resin blends // *Polymer international*. – 1997. – Vol. 42, № 4. – P. 349–355.

12. Mounif E., Bellenger V., Tcharkhtchi A. Time–temperature-transformation (TTT) diagram of the isothermal crosslinking of an epoxy/amine system: Curing kinetics and chemorheology. *Journal of applied polymer science*. – 2008. – Vol. 108, no. 5. – P. 2908–2916.

13. Time–temperature-transformation (TTT) and temperature–conversion-transformation (TxT) cure diagrams by RheoDSC: Combined rheometry and calorimetry on an epoxy-amine thermoset / C. Block [et al.] // *Reactive and Functional Polymers*. – 2013. – Vol. 73, № 2. – P. 332–339.

14. Synthesis and characterization of a novel epoxy resin containing naphthyl/dicyclopentadiene moieties and its cured polymer / H. Ren, J. Sun, B. Wu, Q. Zhou // *Polymer*. – 2006. – Vol. 47, № 25. – P. 8309–8316.

## References

1. Dement'eva L.A., Serezhnikov A.A., Bocharova L.I., Anikhovskaia L.I. Kleevye prepregi [Adhesive prepregs]. *Klei. Germetiki. Tekhnologii*, 2008, no. 11, pp. 14-16.

2. Zorin V.A. Opyt primeneniia kompozitsionnykh materialov v izdelliakh aviatsionnoi i raketno-kosmicheskoi tekhniki [Experience of application of composite materials in products of aviation and rocket-space technology]. *Konstruktsii iz kompozitsionnykh materialov*, 2011, no. 4, pp. 44-59.

3. Dmitriev O.S., Kirillov V.N., Mishchenko S.V., Dmitriev S.O. Optimizatsiia pezhima otvepzhdeniia izdelii iz polimepnykh kompozitov na osnove kleevykh ppepegov [Optimization of mode of curing of polymer composites on the basis of glutinous prepregs]. *Klei. Germetiki. Tekhnologii*, 2009, no. 5, pp. 17-24.

4. Kalinchev V.A., Makarov M.S. Namotannye stekloplastiki [Wound fiberglass]. Moscow, Khimiia, 1986, 268 p.

5. Chicherin I.Z., Smekhov F.M., Zherdev Iu.V. Epoksidnye polimery i kompozitsii [Epoxy polymers and compositions]. Moscow, Khimiia, 1982, 230 p.

6. Sidorov O.I. Issledovanie protsessov formirovaniia svoistv organoplastikov [Research of processes of formation of properties of organic plastics]. *Konversia v mashinostroenie*, 2002, no. 4, pp. 62-67.

7. Pimenov N.V., Antipov Iu.V., Kul'kov A.A., Kirkina L.F. Vysokoprochnye organoplastiki na osnove zhguta Armos-600 [High strength organoplastic on the basis of the harness Armos-600]. *Voprosy oboronnoi tekhniki*, 2003, Vol. 3-4, pp. 59-61.

8. Yuan Y.C., Ye X.J., Rong M.Z., Zhang M.Q., Yang G.C., Zhao J.Q. Self-healing epoxy composite with heat-resistant healant. *ACS applied materials & interfaces*, 2011, vol. 3, no. 11, pp. 4487-4495.

9. Khurana P., Aggarwal, S., Narula, A. K., &Choudhary, V. Curing and thermal behavior of epoxy resin in the presence of silicon-containing amide amines. *Journal of applied polymer science*, 2003, no. 87(8), pp. 1345-1353.

10. Levchik S.V., Weil E.D. Thermal decomposition, combustion and flame-retardancy of epoxy resins—a review of the recent literature. *Polymer International*, 2004, vol. 53, no. 12, pp. 1901-1929.

11. Hourston D. J., Lane J. M., Zhang H. X. Toughening of epoxy resins with thermoplastics: 3. An investigation into the effects of composition on the properties of epoxy resin blends. *Polymer international*, 1997, vol. 42, no. 4, pp. 349-355.

12. Mounif E., Bellenger V., Tcharkhtchi A. Time–temperature-transformation (TTT) diagram of the isothermal crosslinking of an epoxy/amine system: Curing kinetics and chemorheology. *Journal of applied polymer science*, 2008, vol. 108, no. 5, pp. 2908-2916.

13. Block C. et al. Time–temperature-transformation (TTT) and temperature–conversion-transformation (TxT) cure diagrams by RheoDSC: Combined rheometry and calorimetry on an epoxy-amine thermoset. *Reactive and Functional Polymers*, 2013, vol. 73, no. 2, pp. 332-339.

14. Ren H., Sun J., Wu B., Zhou Q. Synthesis and characterization of a novel epoxy resin containing naphthyl/dicyclopentadiene moieties and its cured polymer. *Polymer*, 2006, vol. 47, no. 25, pp. 8309-8316.

Получено 04.09.2017

### **Об авторах**

**Кисельков Дмитрий Михайлович** (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, научный сотрудник Института технической химии УрО РАН – филиала Пермского федерального исследовательского центра (614013, г. Пермь, ул. Академика Королева, 3, e-mail: dkiselkov@yandex.ru).

**Слободинюк Алексей Игоревич** (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, научный сотрудник Института технической химии УрО РАН – филиала Пермского федерального исследовательского центра (614013, г. Пермь, ул. Академика Королева, 3, e-mail: lewaizpermi@yandex.ru).

**Ощепкова Тамара Евгеньевна** (Пермь, Россия) – инженер Института технической химии УрО РАН – филиала Пермского федерального исследовательского центра (614013, г. Пермь, ул. Академика Королева, 3, e-mail: tomasic2013@yandex.ru).

### **About the authors**

**Dmitriy M. Kiselkov** (Perm, Russian Federation) – Ph.D of Technical Sciences, Research Fellow of Institute of Technical Chemistry of Ural Branch of Russian Academy of Sciences – branch of Federal State-Funded Institution of Science of Perm Federal Research Center of Ural Branch of Russian Academy of Sciences (3, Ak. Korolev str., 614013, Perm, e-mail: dkiselkov@yandex.ru).

**Aleksei I. Slobodinyuk** (Perm, Russian Federation) – Ph.D of Technical Sciences, Research Fellow of Institute of Technical Chemistry of Ural Branch of Russian Academy of Sciences – branch of Federal State-Funded Institution of Science of Perm Federal Research Center of Ural Branch of Russian Academy of Sciences (3, Ak. Korolev str., 614013, Perm, e-mail: lewaizpermi@yandex.ru).

**Tamara E. Oschepkova** (Perm, Russian Federation) – Ph.D of Technical Sciences, Research Fellow of Institute of Technical Chemistry of Ural Branch of Russian Academy of Sciences – branch of Federal State-Funded Institution of Science of Perm Federal Research Center of Ural Branch of Russian Academy of Sciences (3, Ak. Korolev str., 614013, Perm, e-mail: tomasic2013@yandex.ru).