

Влияние режима отверждения на формирование структуры эпоксикомпозитов в присутствии углеродных нанотрубок

**С. В. Кондрашов, П. С. Мараховский, И. А. Майорова, А. А. Егоров,
И. А. Мансурова, Г. Ю. Юрков**

Исследовано влияние режимов отверждения на термомеханические характеристики эпоксинанокмозита ЭД-20/4-4 диаминодифенилсульфон/ карбоксилированные углеродные нанотрубки (УНТ). Показано, что в условиях недостаточно высоких температур отверждения в модифицированных функционализированных УНТ (ФУНТ) эпоксидных композициях достигается большая степень конверсии и более высокая температура стеклования. При повышении температуры отверждения или использовании двухстадийного режима отверждения, температура стеклования в модифицированных ФУНТ композициях становится меньше, чем в исходных образцах. Вероятной причиной наблюдаемого эффекта может быть замедление процесса ветвления эпоксидного олигомера в приповерхностном слое ФУНТ, и как следствие образование более регулярных сеток поперечных химических связей в присутствии ФУНТ.

Ключевые слова: углеродные нанотрубки, эпоксидный олигомер, отверждение.

Введение

Одним из перспективных методов модификации эпоксидных олигомеров является введение углеродсодержащих наполнителей [1]. Хорошо известно, что введение УНТ в эпоксидную матрицу приводит к изменению температуры стеклования. Однако эти изменения носят неоднозначный характер [2].

В табл. 1 приведены экспериментальные данные [3 – 6] об изменении температуры стеклования T_g композиции ЕРІКОТЕ™ 862 / ЕРІКУРЕ™ W, модифицированной УНТ.

Как следует из представленных результатов, в случае использования одноступенчатого режима отверждения (температура 177 °С, время отверждения больше 120 мин), T_g отвержденной исходной композиции, в зависимости от способа определения составляет 160 – 170 °С, модификация углеродными нанотрубками приводит к уменьшению температуры стеклования на 10 – 20 °С. Если же использован двухступенчатый режим отверждения (температура первой стадии существенно ниже, ~ на 50 °С, чем температура второй стадии), то введение УНТ приводит к повышению температуры стеклования.

Достижимая величина T_g в зависимости от способа определения составляет 130 – 150 °С.

В [6] исследовано изотермическое отверждение при различных температурах исходной и модифицированной УНТ композиций на основе тетраглицидил-4,4 диаминодифенилметана. В работе установлено, что при температуре отверждения $T = 190$ °С степень конверсии композиции, модифицированной 5 % УНТ оказывается на 10 % выше, чем у исходной системы. Однако при увеличении температуры отверждения до 220 °С ситуация становится противоположной: степень конверсии исходной системы на 4 % превышала степень конверсии модифицированной композиции.

Подобным образом, более высокая степень конверсии композиции на основе диглицидилового эфира бисфенола А в присутствии диэтилентриамина при температуре отверждения 50 °С достигается в присутствии ОУНТ [8]. При этом с ростом температуры отверждения разница между конверсией в исходной и модифицированной системах уменьшается.

На основании представленных данных можно сделать обоснованный вывод о влиянии режима

Таблица 1

Зависимость температуры стеклования композиции ЕРИКОТЕ™ 862 / ЕРИКУРЕ™ W от условий получения нанокompозита

№	Способ приготовления нанокompозита		Тип УНТ; % содержания	Температуры стеклования		Источник
	Способ диспергирования	Режим отверждения		$T_{гисх}, ^\circ\text{C}$	$T_{гмод}, ^\circ\text{C}$	
1	УНТ предварительно УЗ диспергированы в растворе спирта и толуола, совмещали со смолой перемешиванием в вакууме при 60 °С до удаления растворителя с последующим охлаждением и добавкой отвердителя	121 °С, 120 мин, 175 °С, 120 мин	ОУНТ	129*	141*	[3]
			0			
			0,015			
			0,022			
2	УНТ, смолу, отвердитель перетирали в ступке в течение 30 мин	177 °С, 1440 мин	ОУНТ — 1 %	159****	135	[6]
			МУНТ — 1 %		143	
3	УНТ УЗ диспергировали в смоле при 80 °С (кавитационный режим), отвердитель совмещали со смолой перемешиванием	120 °С, 240 мин; 170 °С, 240 мин	МУНТ	150**	153**	[4]
			0			
			0,1			
			0,2			
			0,3			
0,4						
4	УНТ УЗ диспергировали в отвердителе, совмещали с раствором смолы в ацетоне, вновь подвергали УЗ диспергированию с перемешиванием, удаление растворителя методом вакуумирования	177 °С, 150 мин; 177 °С, 120 мин	МУНТ	170**	164**	[5]
			0			
			0,5			
			0,5***			

*Определено по перегибу температурной зависимости модуля,

** Определено по максимуму тангенса угла механических потерь,

*** УНТ функционализированы в отвердителе,

**** Определено по перегибу кривой ДСК.

отверждения на изменение температуры стеклования и степени конверсии композиций, модифицированных УНТ по отношению с исходным образцом.

Цель данной работы — исследование влияния режимов отверждения на изменение температуры стеклования и степени конверсии в эпоксидных связующих, модифицированных ФУНТ.

Методика эксперимента

Для приготовления образцов эпоксинанокompозита ЭНК-1 на основе эпоксидной смолы ЭД-22 и 4, 4-диаминодифенилсульфона (ДАДФС) использованы многостенные углеродные нанотрубки “ТаунитМ” (производитель ОАО “Нанотехцентр”, г. Тамбов), функционализированные карбоксильными группами (ФУНТ). Количество привитых групп (–COOH) на поверхности УНТ составляет 5 %.

Для образцов ЭНК-1, ФУНТ диспергировали в ацетоне с использованием УЗ-ванны “Сапфир” в течение 40 мин. В приготовленную дисперсию добавляли эпоксидную смолу ЭД-22 и ДАДФС взятые в стехиометрическом соотношении. Раствор перемешивали в течение 5 мин с помощью магнитной мешалки. Растворитель удаляли путем вакуумирования при температуре 40 °С в течение 180 мин. Концентрация ФУНТ составляла 2 масс %.

Приготовленные композиции разливали в алюминиевые чашечки для проведения испытаний методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) и отверждали в термошкафу по режимам, указанным далее.

Для определения степени конверсии образцы отверждали по выбранному режиму, затем охлаждали до комнатной температуры и вновь прогревали до 350 °С. Величину степени конверсии β определяли по формуле:

$$\beta = \frac{H_0 - H_{\text{ост}}}{H_0} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где H_0 и $H_{\text{ост}}$ величины теплового эффекта измеренные в динамическом режиме прогрева (скорость 10 °С/мин) до и после прогрева исследуемой композиции соответственно. Температуру начала процесса стеклования (α переход) композиций определяли по перегибу ДСК кривой прогрева отвержденных образцов. Температурный диапазон α перехода определяли как разность температур между окончанием и началом α пере-хода.

В качестве исходной выбрана композиция ЭД-22/ДАДФС в стехиометрическом соотношении (ЭК-1).

Изучение кинетики протекания отверждения образцов серии ЭНК-1 и ЭК-1 проводили методом

ДСК, при скоростях нагрева равных: 5, 10 и 20 К/мин. Для анализа кинетических данных использована комплексная программа для кинетического анализа различных типов измерений фирмы “NETZSH” (NETZSH Advanced Software).

Следует отметить, что использованный метод изготовления нанокompозита исключал воздействие на эпоксидный олигомер ультразвука (УЗ). Как известно [9] воздействие ультразвука может приводить к существенному изменению термомеханических характеристик и кинетики отверждения.

Начальную стадию формирования структуры композиции исследовали с помощью просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) на микроскопе JEOL JEM 1011 (ускоряющее напряжение 100 кВ катод LaB6).

Результаты

На рис. 1 приведены кинетические кривые отверждения композиций ЭК-1_{исх} и ЭНК-1_{мод} при скоростях нагрева 5, 10, 20 °С/мин. Видно, что во всем исследованном диапазоне скоростей, пик максимальной скорости отверждения композиций, модифицированных ФУНТ сдвигается относительно пика максимальной скорости отверждения исходной в сторону более низких температур на 2 – 4 °С. Величина теплового эффекта для модифицированной смолы на 10 % меньше, чем для исходной системы.

На рис. 2 приведены зависимости “кажущейся” энергии активации реакции отверждения исходной и модифицированной композиций от степени конверсии по методу Фридмана. Видно, что в случае исходной композиции “кажущаяся” энергия активации процесса отверждения начинает резко увеличиваться при достижении степени конверсии равной 40%, а в случае модифицированной — “кажущаяся” энергия активации остается практически постоянной в течение всего процесса отверждения.

На рис. 3а приведены кривые ДСК композиций ЭК-1_{исх} и ЭНК-1_{мод}, отвержденных при температуре 140 °С в течение 8 ч, и тех же композиций, отвержденных в условиях двухступенчатого прогрева: 140 °С — 1 ч, 180 °С — 3 ч. Видно, что композиция, модифицированная ФУНТ и отвержденная в изотермических условиях, отличается более высокой температурой начала α-перехода по сравнению с исходной: 152 и 123 °С, соответственно. При этом температурный интервал α-перехода, обусловленный размораживанием сегментальной подвижности молекул уменьшается от 48 до 17 °С. Величина

конверсии эпоксидных групп, согласно формуле (1), в модифицированной композиции оказывается выше, чем в образце сравнения (92,8 % и 88,8 %, соответственно).

Аналогичные результаты получены для композиций, отвержденных при температурах 160 и 180 °С (табл. 2).

В условиях двухступенчатого режима отверждения температура начала процесса стеклования модифицированной композиции ЭНК-1_{мод} уменьшается на 10 °С по сравнению с исходной ЭК-1_{исх} (167 и 177 °С, соответственно) (рис. 3б), при этом величина конверсии эпоксидных групп составляет 98,5 % в ЭК-1_{исх} и 96 % в ЭНК-1_{мод}.

На рис. 4 приведены ДСК кривые исходных и модифицированных композиций отвержденных в условиях двухступенчатого нагрева (температура

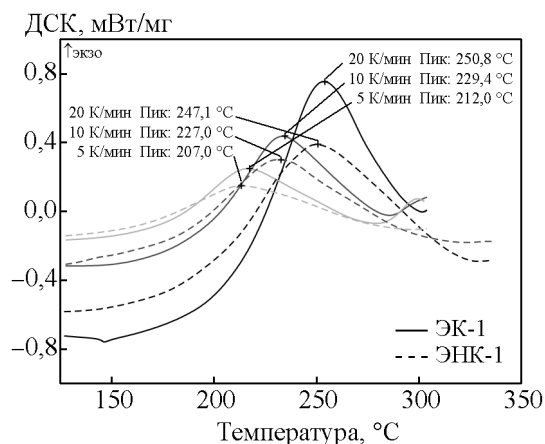


Рис. 1. Кинетические кривые отверждения исходной ЭК-1_{исх} и модифицированной ЭНК-1_{мод} композиций при скоростях нагрева 5, 10 и 20 °С/мин.

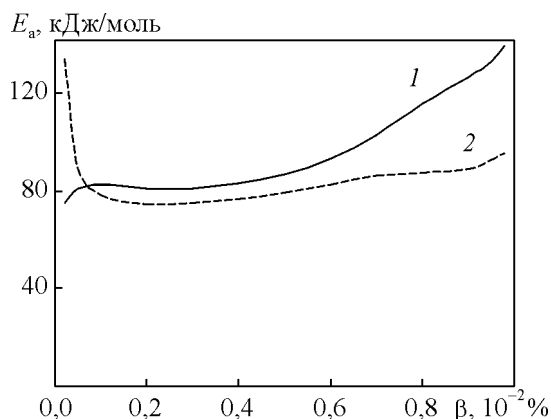


Рис. 2. Зависимости “кажущейся” энергии активации E_a реакции отверждения от степени конверсии β для исходной (1) и модифицированной ФУНТ (2) композиции.

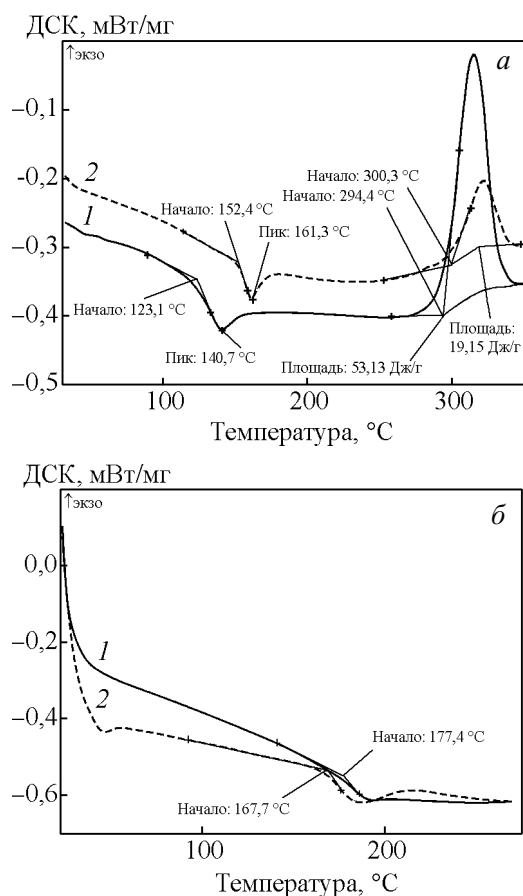


Рис. 3. ДСК кривые композиций ЭК-1_{исх} (1) и ЭНК-1_{мод} (2) отвержденных в изотермическом режиме при температуре 140 °С в течение 8 ч (а), и отвержденных по ступенчатому режиму 140 °С 1 ч, 180 °С 3 ч (б).

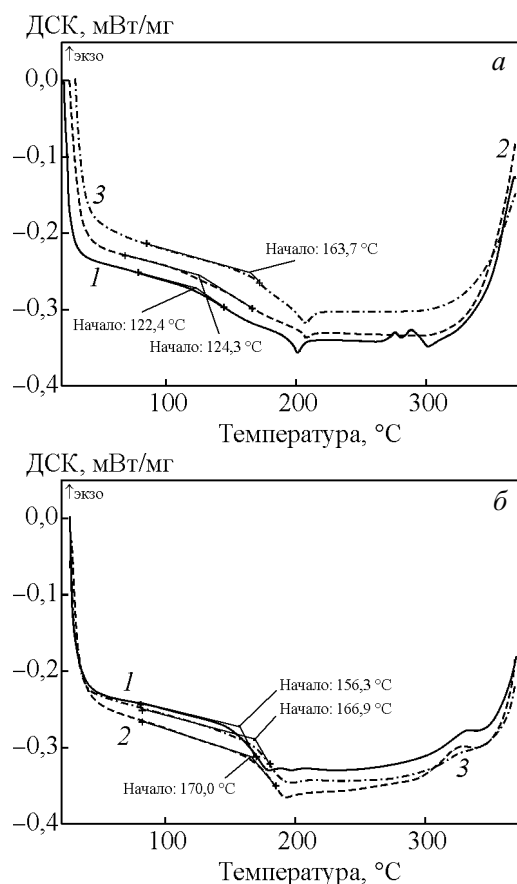


Рис. 4. ДСК кривые прогрева исходных (а) и модифицированных ФУНТ (б) отвержденных по ступенчатому режиму. Температура термообработки на первой стадии, °С: 1 – 140, 2 – 160, 3 – 180, время термообработки 1 ч, температура термообработки на второй стадии 180 °С, время термообработки 3 ч.

термообработки на первой стадии, °С: 1 — 140, 2 — 160, 3 — 180, время термообработки 1 ч, температура термообработки на второй стадии 180 °С, время термообработки 3 часа). Видно, что для исходных композиций во всем исследованном интервале температур 140 – 180 °С термообработки на первой стадии отверждения характерно существенное расширение температурного интервала α перехода

до 60 °С. Температура начала α перехода сдвигается в область температур 90 – 110 °С. В то время как в композиции, модифицированной ФУНТ температурный интервал α перехода не превышает 20 – 30 °С для всех использованных режимов отверждения. Пик “доотверждения” модифицированной композиции

Таблица 2

Зависимость температуры начала α перехода, ширины температурного диапазона α перехода, степени конверсии от режима отверждения для исходной ЭК-1_{исх} и модифицированной ЭНК-1_{мод}

Режим отверждения	Композиции	Температура начала α перехода, °С	Ширина температурного диапазона α перехода*, ΔT , °С	Конверсия, %
140 °С, 8 ч	ЭК-1 _{исх}	123,1	48,5	88,8
	ЭНК-1 _{мод}	152,4	17,2	92,8
160 °С, 8 ч	ЭК-1 _{исх}	132,8	49,6	89,6
	ЭНК-1 _{мод}	162,7	25,1	94,5
180 °С, 4 ч	ЭК-1 _{исх}	111,6-171	60,6	98,6
	ЭНК-1 _{мод}	166,8	32,3	96,2

* Разница между температурой начала и завершения α перехода.

по сравнению с исходной сдвинут в сторону более высоких температур на 30–40 °С.

На рис. 5 приведена микроструктура образца модифицированной композиции, отвержденной при температуре 140 °С в течение 1 ч. Видно, что процесс отверждения начинается на поверхности УНТ с формированием глобулярных структур.

Обсуждение результатов

Как видно из экспериментальных данных исходные и модифицированные ФУНТ композиции, отвержденные в условиях изотермического или двухступенчатого нагрева, существенно различаются по температуре начала α перехода, величине температурного интервала α перехода, степени превращения эпоксидных групп. Объяснить данный эффект можно влиянием нанотрубок на химическую и топологическую структуру образующейся пространственной сетки.

Известно [10], что пространственная сетка композита формируется за счет химических узлов, образованных аминогруппами диамина и физических узлов зацеплений олигомерных молекул. Как следует из [11] даже при умеренных температурах отверждения в исходном эпоксидном олигомере формируются узлы различной функциональности. Формирующаяся сетка является крайне неоднородной, с большим количеством циклов, “висячих” концов [12], и, как следствие, характеризуется широким спектром структурных элементов с различной сегментальной подвижностью. Это, как показано в эксперименте, отражается на величине температурного интервала α перехода. Он составляет для исходных композиций в зависимости от температуры отверждения от 49 до 60 °С (табл. 2).

Из рис. 5 видно, что процесс отверждения нанокompозита начинается на поверхности ФУНТ. Это, вероятно, связано с предпочтительной адсорбцией отвердителя на поверхности углеродных нанотрубок за счет π - π -взаимодействий ароматического ядра ДАДФС и π -электронной плотности нанотрубки. Протонодонорный характер карбоксильных групп, расположенных на поверхности ФУНТ ускоряет процесс взаимодействия первичных аминогрупп отвердителя и эпоксидных групп смолы [7, 8, 13]. Таким образом, на первоначальном этапе отверждение осуществляется вблизи поверхности УНТ в условиях избытка отвердителя с преимущественным образованием длинных, неразветвленных макромолекул, способствуя повышению конверсии эпоксидных групп и увеличению температуры стеклования.

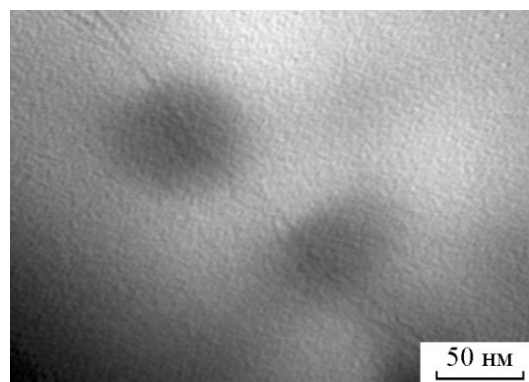


Рис. 5. Начальная стадия отверждения эпоксинанокомпозита ЭД-20/ДАДФС/ФУНТ (режим отверждения: 140 °С в течение 1 часа)

Избыток отвердителя подавляет “ветвление” растущей полимерной цепи, и следовательно, способствует формированию более однородных, регулярных сеток, обладающих меньшим количеством структурных дефектов [11]. Вероятно, именно поэтому температурный интервал α перехода в модифицированных образцах уменьшается по сравнению с исходным образцом и составляет от 32 до 17 °С.

Отсутствие в составе сетки фрагментов, обладающих низкой температурой стеклования, приводит к тому, что в условиях недостаточного высоких температур отверждения, стерического ограничения останавливающие реакцию отверждения возникают при больших конверсиях, а, следовательно, температура начала α перехода модифицированных образцов оказывается выше.

Однако в условиях практически полного отверждения, замедление ветвления играет отрицательную роль. В окрестностях ФУНТ формируются более редкие и регулярные сетки, что приводит к некоторому уменьшению температуры начала α перехода эпоксинанокомпозита по сравнению с исходной композицией (167 и 177 °С, соответственно, рис. 3б) и сужению температурного интервала α перехода в два раза.

Выводы

Показано, что режим отверждения эпоксинанокомпозита оказывает существенное влияние на его термомеханические свойства. В условиях недостаточно высоких температур отверждения в модифицированных ФУНТ эпоксидных композициях достигается большая степень конверсии и более высокая температура начала α перехода. При повышении температуры отверждения или использовании

двухстадийного режима отверждения, температура начала α перехода в модифицированных ФУНТ композициях становится меньше, чем в исходных образцах. Вероятной причиной наблюдаемого эффекта является замедление процесса ветвления эпоксидного олигомера в приповерхностном слое ФУНТ и как следствие образование более регулярных сеток поперечных химических связей в присутствии ФУНТ.

Работа поддержана грантом РФФИ 13-03-00922-а и 13-03-12039-офи_м.

Литература

1. Каблов Е.Н., Кондрашов С.В., Юрков Г.Ю. Перспективы использования углеродсодержащих наночастиц в связующих для полимерных композиционных материалов. *Российские нанотехнологии*, 2013, т. 8, № 3 – 4, с. 28 – 46.
2. Allaoui A., El Bounia N. How carbon nanotubes affect the cure kinetics and glass transition temperature of their epoxy composites? *eXPRESS Polymer Letters*, 2009, v. 3, no. 9, p. 588 – 594.
3. Thakre P.R., Yordanos B., Lagoudas D.C. Electrical and mechanical properties of carbon nanotube – epoxy nanocomposites. *Journal of Applied Polymer Science*, 2010, v. 116, p. 191 – 202.
4. Zhou Y.X., Wu P.X., Cheng Z.Y., Ingram J., Jeelani S. Improvement in electrical, thermal and mechanical properties of epoxy by filling carbon nanotube. *eXPRESS Polymer Letters*, 2008, v. 2, no. 1, p. 40 – 48.
5. Wang S., Liang Z., Liu T., Wang B., Zhang C. Effective amino-functionalization of carbon nanotubes for reinforcing epoxy polymer composites. *Nanotechnology*, 2006, v. 17, no. 6, p. 1551 – 1557.
6. Kun T., Shuying Y., Jaime C. Grunlan, Yeon-Seok K., Bachlien D., Yuanjian D., L. Thomas R., L. Wilson B., Xin W. Effects of carbon nanotube fillers on the curing processes of epoxy resin-based composites. *Journal of Applied Polymer Science*, 2006, v. 102, p. 5248 – 5254.
7. Hongfeng X., Binghau L., Zuanru Y., Jiany S., Rongshi C. Cure kinetics of carbon nanotube/tetrafunctional epoxy nanocomposites by isothermal differential scanning calorimetry. *Journal of Polymer Science: Part B: Polymer Physics*, 2004, v. 42, p. 3701 – 3712.
8. Valentini L., Armentano I., Puglia D., Kenny J.M. Dynamics of amine functionalized nanotubes/epoxy composites by dielectric relaxation spectroscopy. *Carbon*, 2004, v. 42, p. 323 – 329.
9. Хозин В.Г. Усиление эпоксидных полимеров. К.: Дом печати, 2004, 446 с.
10. Межиковский С.М., Иржак В.И. Химическая физика отверждения олигомеров. М.: Наука, 2008, 269 с.
11. Иржак Т.Ф., Иржак В.И. Критическая конверсия в процессах формирования полимеров. *Успехи химии*, 2010, т. 79, № 10, с. 1001 – 1024.
12. Иржак В.И., Межиковский С.М. Структурные аспекты формирования сетчатых полимеров при отверждении олигомерных систем. *Успехи химии*, 2009, т. 78, № 2, с. 176 – 206.
13. Puglia D., Valentini L., Armentano I., Kenny J.M. Effects of single-walled carbon nanotube incorporation on the cure reaction of epoxy resin and its detection by Raman spectroscopy. *Diamond and Related Materials*, 2003, v. 12, p. 827 – 832.

References

1. Kablov Ye.N., Kondrashov S.V., Yurkov G. Yu. Perspektivy ispolzovaniya uglerodsoderzhashchikh nanochastits v svyazuyushchikh dlya polimernykh kompozitsionnykh materialov [Prospects for use of carbon-containing nanoparticles in polymeric binders for composite materials]. *Rossyskiye nanotekhnologii — Russian Nanotechnology*, 2013, vol. 8, no. 3 – 4, pp. 28 – 46.
2. Allaoui A., El Bounia N. How carbon nanotubes affect the cure kinetics and glass transition temperature of their epoxy composites? *eXPRESS polymer letters*, 2009, vol. 3, no. 9, pp. 588 – 594.
3. Thakre P.R., Yordanos B., Lagoudas D.C. Electrical and mechanical properties of carbon nanotube – epoxy nanocomposites. *J. of Applied Polymer Science*, 2010, vol. 116, pp. 191 – 202.
4. Zhou Y. X., Wu P. X., Cheng Z. Y., Ingram J., Jeelani S. Improvement in electrical, thermal and mechanical properties of epoxy by filling carbon nanotube. *eXPRESS polymer letters*, 2008, vol. 2, no. 1, pp. 40 – 48.
5. Wang S., Liang Z., Liu T., Wang B., Zhang C. Effective amino-functionalization of carbon nanotubes for reinforcing epoxy polymer composites. *Nanotechnology*, 2006, vol. 17, no. 6, pp. 1551 – 1557.
6. Kun T., Shuying Y., Jaime C. Grunlan, Yeon-Seok K., Bachlien D., Yuanjian D., L. Thomas R., L. Wilson B., Xin W. Effects of carbon nanotube fillers on the curing processes of epoxy resin-based composites. *Journal of Applied Polymer Science*, 2006, vol. 102, pp. 5248 – 5254.
7. Hongfeng X., Binghau L., Zuanru Y., Jiany S., Rongshi C. Cure kinetics of carbon nanotube/tetrafunctional epoxy nanocomposites by isothermal differential scanning calorimetry. *Journal of Polymer Science: Part B: Polymer Physics*, 2004, vol. 42, pp. 3701 – 3712.
8. Valentini L., Armentano I., Puglia D., Kenny J.M. Dynamics of amine functionalized nanotubes/epoxy composites by dielectric relaxation spectroscopy. *Carbon*, 2004, vol. 42, pp. 323 – 329.
9. Khozin V.G. Usileniye epoksidnykh polimerov [Strengthening of epoxy polymers]. Kiev, Dom pechati Publ., 2004, 446 p.
10. Mezhevikovsky S.M., Irzhak V.I. Khimicheskaya fizika otverzheniya oligomerov [Chemical physics of oligomers curing]. Moscow, Nauka Publ., 2008, 269 p.
11. Irzhak T.F., Irzhak V.I. Kriticheskaya konversiya v protsessakh formirovaniya polimerov [Critical conversion under formation of polymers]. *Uspekhi khimii — Russian Chemistry*, 2010, vol. 79, no 10, pp. 1001 – 1024.

12. Irzhak V.I., Mezhevikovsky S.M. Strukturnye aspekty formirovaniya setchatykh polimerov pri otverzhenii oligomernykh sistem [Structural aspects of cross-linked polymers formation under cured of oligomeric systems]. *Uspekhi khimii — Russian Chemistry*, 2009, vol. 78, no. 2, pp. 176 – 206.
13. Puglia D., Valentini L., Armentano I., Kenny J.M. Effects of single-walled carbon nanotube incorporation on the cure reaction of epoxy resin and its detection by Raman spectroscopy. *Diamond and related materials*, 2003, vol. 12, pp. 827 – 832.

Статья поступила в редакцию 31.03.2014 г.

Кондрашов Станислав Владимирович — Федеральное государственное унитарное предприятие “Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов”, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, специалист в области нанотехнологий. E-mail: stasru_59@mail.ru.

Мараховский Петр Сергеевич — Федеральное государственное унитарное предприятие “Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов”, инженер, специалист в области теплофизических исследований, нанотехнологий, процессах теплообмена. E-mail: petr@bmstu@mail.ru.

Майорова Ирина Андреевна — Федеральное государственное унитарное предприятие “Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов”, инженер 1-категории, специалист в области теплофизических исследований, нанотехнологий, процессах теплообмена. E-mail: irina.a.mokretsova@gmail.com.

Мансурова Ирина Алексеевна — Вятский государственный университет, кандидат химических наук, доцент, специалист в области химических технологий. E-mail: irinamansurova@mail.ru.

Егоров Андрей Алексеевич — Федеральное государственное унитарное предприятие “Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов”, инженер 2-категории, специалист в области теплофизических исследований, нанотехнологий, процессах теплообмена. E-mail: egorov.a.a@bk.ru.

Юрков Глеб Юрьевич — Институт металлургии и материаловедения им. А. А. Байкова РАН, доктор технических наук, специалист в области нанотехнологий. E-mail: gy_yurkov@mail.ru.

Curing influence on epoxycomposites structuer formation in carbon nanotube presence

**S. V. Kondrashov, P. S. Marakhovskiy, I. A. Mayorova, A. A. Egorov,
I. A. Mansurova, G. Y. Yurkov**

The influence of curing conditions on thermo-mechanical properties of epoxy nanocomposite (ED-20/4-4/DDS/carboxylated carbon nanotubes) was researched. It is shown, than under sufficiently high curing temperature in epoxy composites modified by functional carbon nanotubes a high conversion level and high glass transition temperature achieved. Increase of curing temperature or using two-step curing process leads to decrease of glass transition temperature for compositions modified with functional carbon nanotubes compare to initial materials. The probable cause of the observed effect is slowing down the process of branching epoxy oligomer in the surface layer FCNT and formation of chemical cross-links regular grid in the presence of functionalized carbon nanotubes.

Key words: carbon nanotubes, epoxy, curing.

Kondrashov Stanislav — Federal state unitary enterprise “All-russian scientific research institute of aviation materials”, PhD (Phys-Math.), head scientist. E-mail: stasru_59@mail.ru.

Marakhovskiy Petr — Federal state unitary enterprise “All-russian scientific research institute of aviation materials”, engineer. E-mail: petrstmstu@mail.ru.

Mayorova Irina — Federal state unitary enterprise “All-russian scientific research institute of aviation materials”, 1-st degree engineer. E-mail: irina.a.mayorova@gmail.com.

Mansurova Irina — Vyatka State University, PhD (Chem.), associate professor. E-mail: irinamansurova@mail.ru.

Egorov Andrey — Federal state unitary enterprise “All-russian scientific research institute of aviation materials”, 2-nd degree engineer. E-mail: egorov.a.a@bk.ru.

Yurkov Gleb — Baykov Institute of metallurgy and materials science RAS, Dr.Sci. (Eng.). E-mail: gy_yurkov@mail.ru.