



# ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЭПОКСИКОМПОЗИТОВ, НАПОЛНЕННЫХ НАНОЧАСТИЦАМИ

## STUDY OF THERMAL PROPERTIES OF EPOXY COMPOSITES FILLED WITH NANOPARTICLES

УДК 667.64:678.026

А.Сапронов\*, Н.Букетова\*, А.Лещенко\* / [sapronov.a2012@yandex.ru](mailto:sapronov.a2012@yandex.ru)

A.Sapronov\*, N.Buketova\*, A.Leshchenko\*

Исследованы композиты на основе эпоксидной диановой смолы марки ЭД-20, для сшивания которой использован низкомолекулярный отвердитель полиэтиленполиамин (ПЭПА). В качестве добавки применяли нанодисперсный наполнитель фуллерен  $C_{60}$ . Исследованы теплофизические свойства эпоксидных композитов в диапазоне температур  $\Delta T=303-473$  К. Определены показатели теплостойкости по Мартенсу, коэффициент теплового линейного расширения, температура стеклования, относительная усадка разработанных композитов. Установлено, что для формирования композитов с улучшенными теплофизическими свойствами целесообразно незначительное содержание  $C_{60}$   $q=0,010-0,050$  масс. % на 100 масс. % ЭД-20 и 10 масс. % ПЭПА.

Composites on the basis of bisphenol epoxy resin ED-20 with the low molecular weight polyethylene polyamine (PEPA) curing agent were studied. As an additive the nano-filler  $C_{60}$  was used. Thermal properties of epoxy composites in the temperature range  $T=303-473$  K were investigated. Martens heat resistance temperature, thermal expansion coefficient, glass transition temperature and the relative shrinkage of the developed composites were estimated. It was found that the low content of nanofiller ( $q=0.01-0.05$  wt. % of  $C_{60}$  with 100 wt. % of ED-20 and 10 wt. % of PEPA) is optimal for the formation of composites with improved thermal properties.

Современная промышленность нуждается в разработке новых эффективных материалов с улучшенным комплексом свойств. Применение композитных материалов (КМ) на основе эпоксидной матрицы позволяет снизить металлоемкость конструкций и защитить их поверхности от влияния внешних факторов (агрессивных сред, переменных температур и др.). При этом эксплуатационные свойства конструкций в значительной степени зависят от теплостойкости новых материалов. Улучшить свойства конечного композиционного материала возможно путем введения в его состав наночастиц различной физико-химической природы [1-4]. Поэтому модификация теплофизических свойств в результате введения наноразмерных частиц является актуальной задачей современного полимерного материаловедения.

Анализ работ [1, 2, 4-9] позволяет утверждать, что одним из эффективных способов улучшения

теплофизических свойств эпоксидных композитов является введение наполнителей различной дисперсности и физико-химической природы. Сочетание таких материалов позволяет отказаться от применения традиционных лакокрасочных материалов и использовать КМ в виде защитных покрытий. Для оценки температурного диапазона эксплуатации новых КМ проводится исследование их свойств при нагревании [9-11].

Цель настоящей работы – исследовать влияние количества фуллерена  $C_{60}$  на теплостойкость и коэффициент теплового линейного расширения нанокompозитов.

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве основного компонента связующего при формировании нанокompозитных материалов (НКМ)

\* Херсонская государственная морская академия / Kherson State Maritime Academy.

выбран эпоксидный диановый олигомер марки ЭД-20 (ГОСТ 10587-84). Использование низкомолекулярного отвердителя полиэтиленполиамина (ПЭПА)  $[-CH_2-CH_2-NH-]_n$  (ТУ 6-05-241-202-78) позволило сшивать эпоксидную композицию при комнатных температурах. Отвердитель вводили при стехиометрическом соотношении компонентов (масс.%) 10 (ЭД-20) к 1 (ПЭПА).

В качестве наполнителя использованы частицы фуллерена  $C_{60}$  с дисперсностью 5 нм. Эпоксидные НКМ, наполненные  $C_{60}$ , формировали с использованием ультразвукового диспергирования композиций в следующих режимах:

- предварительное дозирование ЭД-20, подогрев смолы до  $T=353 \pm 2$  К и ее выдержка при данной температуре в течение времени  $\tau=20 \pm 0,1$  мин;
- дозирование нанонаполнителя и дальнейшее введение его в эпоксидный олигомер;
- гидродинамическое совмещение олигомера ЭД-20 и нанонаполнителя в течение  $\tau=1 \pm 0,1$  мин;
- ультразвуковая обработка (УЗО) композиции в течение  $\tau=1,5 \pm 0,1$  мин;
- охлаждение композиции до комнатной температуры в течение  $\tau=60 \pm 5$  мин;
- введение ПЭПА и перемешивание композиции в течение  $\tau=5 \pm 0,1$  мин.

В дальнейшем НКМ отверждали в экспериментально установленном режиме:

- формирование образцов и их выдержка в течение  $\tau=12,0 \pm 0,1$  ч при  $T=293 \pm 2$  К;
- нагрев со скоростью  $v=3$  К/мин до  $T=393 \pm 2$  К;
- выдержка НКМ в течение  $\tau=2,0 \pm 0,05$  ч;
- медленное охлаждение до  $T=293 \pm 2$  К.

В целях стабилизации структурных процессов в НКМ образцы выдерживали в течение  $\tau=24$  ч на воздухе при  $T=293 \pm 2$  К.

В работе исследовались следующие теплофизические характеристики НКМ: теплостойкость (по Мартенсу), коэффициент теплового линейного расширения (КТЛР), усадка.

Теплостойкость НКМ по Мартенсу определяли согласно ГОСТ 21341-75, нагревая исследуемый образец со скоростью  $v=3$  К/мин под действием постоянно изгибающей нагрузки  $F=5 \pm 0,5$  МПа, пока он не деформируется на заданную величину ( $h=6$  мм).

КТЛР материалов рассчитывали по кривой зависимости относительной деформации от температуры, аппроксимируя эту зависимость экспоненциальной функцией. Относительную деформацию определяли по изменению длины образца при повышении температуры в стационарных условиях (ГОСТ 15173-70). Образцы для исследования размером  $65 \times 7 \times 7$  мм имели непараллельность шлифованных торцов не более 0,02 мм. Длину образца измеряли с точностью  $\pm 0,01$  мм. Скорость нагрева составляла  $v=2$  К/мин.

The modern industry needs to develop effective new materials with improved properties. The use of composite materials (CM) based on the epoxy matrix reduces the specific content of metal of structures and protect the surface from external influences (aggressive media, temperature variations etc.). Thereby the performance properties of structures largely depend on the heat resistance of the new materials. It is possible to improve the properties of the final composite material by the introduction in its composition of nanoparticles of various physical and chemical nature [1-4]. Therefore, modification of the thermo-physical properties as a result of the introduction of

nanoparticles is an actual problem of the modern polymer materials science.

An analysis of studies [1, 2, 4-9] suggests that one of the effective ways to improve the thermal properties of epoxy composites is to introduce fillers of various degree of dispersion as well as physical and chemical nature. The combination of these materials allows to abandon the use of traditional painting materials and use CM as protective coating. To assess the operating temperature range of the new CM, a study of their properties during heating is conducted [9-11].

The purpose of this project is to investigate the effect of the amount of  $C_{60}$  on the heat resistance and coefficient

of thermal linear expansion of nanocomposites.

## MATERIALS AND METHODS OF RESEARCH

As the main component of the binder in the creation of nanocomposite materials (NCM) selected was a diane epoxy oligomer of the ED-20 brand (GOST 10587-84). The use of the low-molecular polyethylenepolyamine hardener (PEPA)  $[-CH_2-CH_2-NH-]_n$  (ТУ 6-05-241-202-78) made it possible to crosslink the epoxy composition at room temperature. The hardener was administered at a stoichiometric ratio of the components (wt.%) 10 (ED-20) to 1 (PEPA).

The particles of the fullerene  $C_{60}$  with the dispersion of 5 nm are used as filler. Epoxy NCM filled



Таблица 1. Коэффициент теплового линейного расширения НКМ при различных температурных диапазонах испытаний  
Table 1. Thermal expansion coefficient of NCM under various temperature ranges

Содержание нанонаполнителя, q, масс. % Content of the nanofiller, q, wt. %	Коэффициент теплового линейного расширения, $\alpha \cdot 10^{-5}, \text{K}^{-1}$ Thermal expansion coefficient, $\alpha \cdot 10^{-5}, \text{K}^{-1}$			
	Температурные диапазоны испытаний, $\Delta T, \text{K}$ Temperature ranges, $\Delta T, \text{K}$			
	303–323	303–373	303–423	303–473
0,010	3,89	6,01	8,57	$1,10 \cdot 10^{-4}$
0,025	7,91	6,55	8,83	$1,13 \cdot 10^{-4}$
0,050	7,05	6,61	9,27	$1,14 \cdot 10^{-4}$
0,075	6,31	6,53	8,94	$1,09 \cdot 10^{-4}$
0,100	6,72	6,39	8,95	$1,05 \cdot 10^{-4}$

Отклонение значений при исследованиях показателей теплофизических свойств НКМ (теплостойкость по Мартенсу, КТЛР) составляло 4–6% от номинального.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для определения поведения композитов под влиянием теплового поля исследовался их КТЛР. Учитывая условия эксплуатации эпоксидных композитов, был выбран диапазон температур  $\Delta T = 303\text{--}473 \text{ K}$ .

Результаты расчета КТЛР нанокompозитов при различных температурных интервалах приведены в табл.1. Установлено, что с ростом темпе-

ратуры КТЛР увеличивается, что свидетельствует о повышении внутренней энергии исследуемых НКМ вследствие подвижности макроцепей и сегментов эпоксидного связующего.

В процессе экспериментальных исследований установлено, что в диапазонах  $\Delta T = 303\text{--}323 \text{ K}$ ,  $\Delta T = 303\text{--}373 \text{ K}$  и  $\Delta T = 303\text{--}423 \text{ K}$  наименьшим КТЛР характеризуется НКМ при содержании фуллерена  $C_{60}$   $q = 0,010$  масс. %, а в области  $\Delta T = 303\text{--}473 \text{ K}$  наименьшим значением КТЛР характеризуется композит при максимальном содержании фуллерена  $C_{60}$  ( $q = 0,100$  масс. %). Полученные результаты свидетельствуют об уменьшении флуктуаций связей и подвижности макроцепей и сегментов эпоксид-

with  $C_{60}$  were created with the use of ultrasonic dispersion compositions in the following modes:

- pre-dosing of ED-20, resin heating to  $T = 353 \pm 2 \text{ K}$  and its holding at this temperature for the time  $\tau = 20 \pm 0.1 \text{ min}$ ;
- dosing of nanofiller and the further introduction of it into the epoxy oligomer;
- hydrodynamic alignment of the oligomer ED-20 and nanofiller for  $\tau = 1 \pm 0.1 \text{ min}$ ;
- ultrasonic treatment (UST) of the composition for  $\tau = 1.5 \pm 0.1 \text{ min}$ ;
- cooling the composition to room temperature over a period of  $\tau = 60 \pm 5 \text{ min}$ ;

- introduction of PEPA and mixing the composition for  $\tau = 5 \pm 0.1 \text{ min}$ .
- at a later stage NCM was hardened in the experimentally established mode;
- creation of the samples and holding them for  $\tau = 12.0 \pm 0.1 \text{ h}$  at  $T = 293 \pm 2 \text{ K}$ ;
- heating at a rate of  $v = 3 \text{ K/min}$  up to  $T = 393 \pm 2 \text{ K}$ ;
- holding NCM for  $\tau = 2.0 \pm 0.05 \text{ h}$ ;
- slow cooling to  $T = 293 \pm 2 \text{ K}$ .

In order to stabilise the structural processes in NCM the samples were held for  $\tau = 24 \text{ h}$  in the air at  $T = 293 \pm 2 \text{ K}$ .

In the project the following thermal characteristics of NCM

are studied: thermal resistance (Martens), the thermal linear expansion factor and shrinkage.

The Martens heat resistance for NCM was determined according to GOST 21341-75 by heating the sample at a rate of  $v = 3 \text{ K/min}$  subject to the constant bending load  $F = 5 \pm 0.5 \text{ MPa}$  until it is deformed by a predetermined amount ( $h = 6 \text{ mm}$ ).

The thermal linear expansion factor of materials was calculated by the curve of the relative deformation and temperature by approximating the dependence of the exponential function. The relative deformation was

Таблица 2. Теплофизические свойства НКМ

Table 2. Thermophysical properties of NCM

Характеристики Features	Содержание нанонаполнителя C <sub>60</sub> , q, масс. % Content of the nanofiller C <sub>60</sub> , q, wt. %					
	Матрица Matrix	0,010	0,025	0,050	0,075	0,100
Теплостойкость, T, К Thermal resistance, T, K	339	342	342	342	342	341
Усадка, ΔL, % Shrinkage, ΔL, %	0,31	0,15	0,39	0,31	0,15	0,15

ного связующего вследствие увеличения плотности пространственной сетки. Целесообразно отметить, что значение КТЛР в диапазоне повышенных температур несущественно отличается для композитов с различным содержанием наполнителя ( $\Delta\alpha = \pm 0,09 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ ), что свидетельствует о равномерном протекании физико-химических процессов при сшивании НКМ и целесообразности использования незначительного содержания наполнителя.

Особенно важен анализ релаксационных переходов в эпоксикомпозитах, в частности, температуры стеклования ( $T_c$ ), которая характеризует подвижность независимых кинетических элементов (макромолекул и сегментов) эпоксидного связующего. Установлено, что температура стеклования эпоксикомпозитов с частицами фуллерена C<sub>60</sub> (q = 0,010–0,100 масс. %) находится в диапазоне  $T_c = 330\text{--}337 \text{ K}$ . Незначительная раз-

ница значений  $\Delta T_c = 7 \text{ K}$  свидетельствует о равномерном протекании релаксационных процессов во всех исследуемых материалах.

Результаты исследования теплостойкости (по Мартенсу) НКМ представлены в табл.2. Предварительные испытания показали [6–9], что теплостойкость модифицированной УЗО эпоксидной матрицы составляет  $T = 339 \text{ K}$ . Введение C<sub>60</sub> (q = 0,010–0,100 масс. %) обеспечивает повышение теплостойкости НКМ до  $T = 341\text{--}342 \text{ K}$ .

Не менее важным является анализ значений усадки нанокompозитов. Усадка менее 1% (табл.2) свидетельствует об изотропности материалов и их долговечности при нанесении на поверхности сложного профиля.

Согласованность динамики КТЛР и теплостойкости (по Мартенсу) НКМ в зависимости от содержания наполнителя C<sub>60</sub> свидетельствует о достоверности полученных экспериментальных

determined by the change in the sample length with increasing the temperature under steady state conditions (GOST 15173-70). Samples for the research with the size of 65 × 7 × 7 mm had non-parallelism of the polished ends of not more than 0.02 mm. The length of the sample was measured with an accuracy of ± 0.01 mm. The heating rate was  $v = 2 \text{ K/min}$ .

The deviation of values in the studies of the thermal performance properties of NCM (Martens heat resistance, thermal linear expansion factor) is 4–6% of the nominal value.

## RESULTS AND DISCUSSION

To determine the behaviour of composites under the influence of the thermal field, their thermal linear expansion factor was studied. Taking into account the operating conditions of epoxy composites, the temperature range of  $\Delta T = 303\text{--}473 \text{ K}$  was chosen.

The results of calculation of the thermal linear expansion factor of nanocomposites at various temperature ranges are shown in Table 1. It was found that with increasing temperature, the thermal linear expansion factor increases, which indicates an increase in the internal energy of the NCM under research

due to the mobility of macrochains and epoxy binder segments.

During the experimental research it was found that in the ranges  $T = 303\text{--}323 \text{ K}$ ,  $\Delta T = 303\text{--}373 \text{ K}$  and  $\Delta T = 303\text{--}423 \text{ K}$  the lowest thermal linear expansion factor is characterised by NCM with the content of the fullerene of C<sub>60</sub> q = 0.010 wt.%, and in the area of  $\Delta T = 303\text{--}473 \text{ K}$  a composite with a maximum content of C<sub>60</sub> (q = 0,100 wt.%) is characterised by the lowest value of the thermal linear expansion factor. The obtained results indicate a decrease in the fluctuation of relations and mobility of macrochains and segments



данных. Анализ приведенных результатов исследования позволяет констатировать целесообразность использования разработанных нанокompозитов и покрытий на их основе для защиты оборудования, эксплуатируемого при температурах  $T = 303\text{--}342\text{ K}$ . В то же время необходимы дополнительные исследования возможности использования разработанных НКМ при температурах выше  $T = 342\text{ K}$ .

### ВЫВОДЫ

На основе проведенных исследований можно констатировать, что для формирования нанокompозитного материала или защитного покрытия с повышенными теплофизическими свойствами целесообразно вводить в эпоксидное связующее нанодисперсный наполнитель  $C_{60}$  в количестве  $q = 0,01\text{--}0,05$  масс. % на 100 масс. % олигомера ЭД-20 и 10 масс. % отвердителя ПЭПА. Теплостойкость (по Мартенсу) такого нанокompозитного материала составляет  $T = 342\text{ K}$ .

Исследование поведения разработанных нанокompозитов под влиянием теплового поля показало, что при диапазоне температур  $\Delta T = 303\text{--}473\text{ K}$  целесообразно использовать НКМ с содержанием частиц  $C_{60}$   $q = 0,01\text{--}0,05$  масс. %, поскольку разница значений КТЛР для всего спектра исследуемых композитов колеблется в пределах погрешности эксперимента и составляет  $\Delta\alpha = (1,10\text{--}1,14) \cdot 10^{-4}\text{ K}^{-1}$ .

### ЛИТЕРАТУРА

1. Букетов А.В. Властивості модифікованих ультразвуком епоксипластів / А.В. Букетов, П.Д. Стухляк, І.В. Чихіра. – Тернопіль: Крок, 2011. 201 с.
2. Крыжановский В.К. Технические свойства полимерных материалов: учеб.-справ. пособие / В.К. Крыжановский, В.В. Бурлов, А.Д. Паниматченко, Ю.В. Крыжановская; 2-е изд., испр. и доп. – СПб: Профессия, 2005. 248 с.
3. Методы исследования структуры и свойств полимеров: учеб. пособие / И.Ю. Аверко-

## НОВЫЕ КНИГИ ИЗДАТЕЛЬСТВА "ТЕХНОСФЕРА"



Цена 550 руб.

### НЕИЗВЕСТНЫЙ АЛМАЗ. "АРТЕФАКТЫ" ТЕХНОЛОГИИ Карасев В.Ю.

В книге описываются результаты экспериментов по изучению оригинального квантово-волнового метода механического воздействия на кристаллы алмаза. Проведенные эксперименты открывают новые свойства и особенности этих кристаллов, находящихся в сильно неравновесных условиях обработки. Показана принципиальная возможность возникновения необратимых сильно неравновесных явлений в кристаллах алмаза при формировании в их объеме волновых потоков с винтовым возмущением волнового фронта. Взаимодействие этих волновых потоков в объеме алмаза приводит как к изменению дефектно-примесной структуры алмаза, снятию внутренних напряжений, так и к формированию морфологического рельефа поверхности кристалла без непосредственного касания всей его поверхности инструментом. Открытие этого метода воздействия на кристаллы алмаза – еще один шаг в создании технологий направленной модификации свойств алмаза, который является модельным объектом всей физики твердого тела. Описывается динамическая волновая среда, влияющая на получаемые результаты.

Книга предназначена для специалистов в области обработки алмазов, физики твердого тела, материаловедения, квантовой механики, а также для любознательных студентов и аспирантов.

М.: ТЕХНОСФЕРА,  
2015. – 96 с.  
ISBN 978-5-94836-405-6

#### КАК ЗАКАЗАТЬ НАШИ КНИГИ?

✉ 125319, Москва, а/я 91; ☎ (495) 234-0110; 📠 (495) 956-3346; ✉ [knigi@technosphaera.ru](mailto:knigi@technosphaera.ru), [sales@technosphaera.ru](mailto:sales@technosphaera.ru)



- Антонович, Р.Т. Бикмуллин. – Казань: КГТУ, 2002. 604 с.
4. **Букетов А.В.** Фізико-хімічні процеси при формуванні епоксикомпозитних матеріалів / А.В. Букетов., П.Д. Стухляк, Є.М. Кальба. – Тернопіль: Збруч, 2005. 184 с.
  5. **Стухляк П.Д.** Епоксидно-діанові композити: технологія формування, фізико-механічні і теплофізичні властивості [Текст]: монографія / П.Д. Стухляк, А.В. Букетов, О.І. Редько. – Тернопіль: Збруч, 2011. 165 с.
  6. **Buketov A.V., Sapronov O.O., Brailo M.V., Aleksenko V.L.** Influence of the ultrasonic treatment on the mechanical and thermal properties of epoxy nanocomposites // *Materials Science*. Vol. 49. № 5. 2014. P. 696–702.
  7. **Buketov A.V., Sapronov O.O., Brailo M.V.** Investigation of the Physico-Mechanical and Thermophysical Properties of Epoxy Composites with a Two-Component Bidisperse Filler // *Strength of Materials*. Vol. 46. № 5. 2014. P. 717–722.
  8. **Букетов А.В.** Исследование влияния 1,4-бис (N,N-диметилдитиокарба-мато) бензена на механические свойства эпоксидной матрицы / А.В. Букетов, А.А. Сапронов, В.М. Яцюк, Б.Д. Гришук, В.С. Барановский // *Пластические массы*. 2014. № 3–4. С. 26–34.
  9. **Букетов А.В.** Исследование влияния модификатора 4,4'-метиленбис (4,1-фенилен) бис (N,N-диэтилдитиокарбамата) на структуру и свойства эпоксидной матрицы / А.В. Букетов, А.А. Сапронов, В.Н. Яцюк, В.О. Скирденко // *Пластические массы*. 2014. № 7–8. С. 9–16.
  10. **Липатов Ю.С.** Физико-химические основы наполнения полимеров / Ю.С. Липатов. – М.: Химия, 1991. 260 с.
  11. **Тагер. А.А.** Физико-химия полимеров / А.А. Тагер; под ред. А.А. Аскадского; 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Научный мир, 2007. 573 с.

of the epoxy binder as a result of the increased density of the spatial grid. It is worth noting that the value of the thermal linear expansion factor in the range of higher temperatures does not differ much for composites with different filler content ( $\Delta\alpha = \pm 0.09 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ ) indicating that the uniform flow of physical and chemical processes in cross-linking the NCM and the practicability of using a smaller filler content.

Especially important is the analysis of the relaxation transitions in epoxycomposites, particularly the glass transition temperature ( $T_g$ ) which characterises the mobility of independent kinetic elements (segments and macromolecules) of the epoxy binder. It was found that the glass transition temperature of epoxycomposites with fullerene particles  $C_{60}$  ( $q = 0.010\text{--}0.100 \text{ wt.}\%$ ) is in the range  $T = 330\text{--}337 \text{ K}$ . A slight difference in  $\Delta T_c = 7 \text{ K}$  values indicates a uniform flow of relaxation processes in all the studied materials.

The results of the NCM heat resistance (Martens) study are presented in Table 2. Preliminary tests have shown [6–9] that the heat resistance of the epoxy matrix modified by UST is  $T = 339 \text{ K}$ . The introduction of  $C_{60}$  ( $q = 0.010\text{--}0.100 \text{ wt.}\%$ ) enhances heat resistance of NCM to  $T = 341\text{--}342 \text{ K}$ .

No less important is to analyse the shrinkage values of nanocomposites. Shrinkage of less than 1% (Table 2) is indicative of isotropic materials and durability when applied to the surface of a complex profile.

Consistency of the dynamics of the thermal linear expansion factor and heat resistance (Martens) of NCM depending on the content of the filler  $C_{60}$  indicates the reliability of the experimental data. An analysis of the study results allows to ascertain the usefulness of the developed nanocomposites and coatings based on them for the protection of equipment operated at temperatures  $T = 303\text{--}342 \text{ K}$ . At the same time, it is needed to do more research

into the possibility of using NCM developed at temperatures above  $T = 342 \text{ K}$ .

## CONCLUSION

Based on the studies it can be stated that for the creation of nanocomposite materials or protective coating with higher thermal-physical properties it is expedient to add to the epoxy binder the nanosized filler  $C_{60}$  in the amount of  $q = 0.01\text{--}0.05 \text{ wt.}\%$  per 100 wt.% of oligomer ED-20 and 10 wt.% of the hardener PEPA. Heat resistance (Martens) of the nanocomposite material is  $T = 342 \text{ K}$ .

The research into the behaviour of the developed nanocomposites under the influence of the thermal field has shown that in the temperature range  $\Delta T = 303\text{--}473 \text{ K}$  it is advisable to use NCM with the content of particles  $C_{60}$   $q = 0.01\text{--}0.05 \text{ wt.}\%$  since the difference in thermal linear expansion factor values for the entire spectrum of the studied composites is in the range of experimental error and is  $\Delta\alpha = (1.10\text{--}1.14) \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ . ■