

DOI: 10.15828/2075-8545-2019-11-6-686-695

UDC 547.311+544.7+544.23+541.128

Nanomodification of epoxy binders

Authors:

Lyaylya A. Abdrakhmanova,

Professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Republic of Tatarstan, Russia,
laa@kgasu.ru;

Vadim G. Khozin,

Head of Department, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Republic of Tatarstan, Russia,
khozin.vadim@yandex.ru;

Rashit K. Nizamov,

Rector, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Republic of Tatarstan, Russia,
nizamov@kgasu.ru

Abstract: In this work, we studied the effect on the properties of epoxy polymers of domestic nanoproduction – carbon nanotubes produced by NanoTechCenter LLC (RF, Tambov). It has been determined that the modification of functionalized CNTs is the most effective in the composition of epoxy resins, for example, in terms of increasing the adhesive properties of binders, and they can be recommended in the formulations of epoxy adhesives. Modification of CNTs leads to a change in the microstructure of the polymer, depending on the curing conditions.

Keywords: nanostructures, modification, epoxy polymers.

Acknowledgments: LLC NanoTechCenter (Tambov) for the provided samples of carbon nanomaterials; Interdisciplinary center «Analytical Microscopy» KFU (Kazan) for conducting research on the microstructure of samples.

For citation: Abdrakhmanova L.A., Khozin V.G., Nizamov R.K. Nanomodification of epoxy binders. Nanotekhnologii v stroitel'stve = Nanotechnologies in Construction. 2019, Vol. 11, no. 6, pp. 686–695. DOI: 10.15828/2075-8545-2019-11-6-686-695.

Machine-readable information on CC-licenses (HTML-code) in metadata of the paper

```
<a rel="license" href="http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/"></a><br /><span xmlns:dct="http://purl.org/dc/terms/" href="http://purl.org/dc/dcmitype/Text" property="dct:title" rel="dct:type">Nanomodification of epoxy binders. </span> by <a xmlns:cc="http://creativecommons.org/ns#" href="http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/">Creative Commons Attribution 4.0 International License</a>. <br />Based on a work at <a xmlns:dct="http://purl.org/dc/terms/" href="http://nanobuild.ru/en_EN/nanobuild-6-2019/" rel="dct:source">http://nanobuild.ru/en_EN/nanobuild-6-2019/</a>. <br />Permissions beyond the scope of this license may be available at <a xmlns:cc="http://creativecommons.org/ns#" href="http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/">Creative Commons Attribution 4.0 International License</a> at <a href="http://kgasu.ru" rel="cc:morePermissions">http://kgasu.ru</a>.
```

The paper has been received by editors: 05.11.2019.

The paper has been received by editors after peer-review: 29.11.2019.

The paper has been accepted for publication: 02.12.2019.

Наномодификация эпоксидных связующих

Авторы:

Абдрахманова Ляйля Абдулловна,

профессор, ФГБОУ ВО «Казанский государственный архитектурно-строительный университет»,
г. Казань, Республика Татарстан, Россия, laa@kgasu.ru;

Хозин Вадим Григорьевич,

заведующий кафедрой, ФГБОУ ВО «Казанский государственный архитектурно-строительный университет»,
г. Казань, Республика Татарстан, Россия, khozin.vadim@yandex.ru;

Низамов Рашид Курбангалиевич,

ректор ФГБОУ ВО «Казанский государственный архитектурно-строительный университет»,
г. Казань, Республика Татарстан, Россия, nizamov@kgasu.ru

Резюме: В настоящей работе изучено влияние на свойства эпоксидных полимеров отечественной нанопродукции – углеродных нанотрубок, производимых ООО «НаноТехЦентр» (РФ, г. Тамбов). Установлено, что в составе эпоксидных смол наиболее эффективна модификация функционализированными УНТ, например, с точки зрения увеличения адгезионных свойств связующих, и они могут быть рекомендованы в рецептурах эпоксидных клеев. Модификация УНТ ведет к изменению микроструктуры полимера, зависящему от условий отверждения.

Ключевые слова: наноструктуры, модификация, эпоксидные полимеры.

Благодарности: ООО «НаноТехЦентр» (г. Тамбов) за предоставленные образцы углеродных наноматериалов; междисциплинарный центр «Аналитическая микроскопия» КФУ (г. Казань) за проведение исследований микроструктуры образцов.

Для цитирования: Абдрахманова Л.А., Хозин В.Г., Низамов Р.К. Наномодификация эпоксидных связующих // Нанотехнологии в строительстве. – 2019. – Том 11, № 6. – С. 686–695. – DOI: 10.15828/2075-8545-2019-11-6-686-695.

Машиночитаемая информация о СС-лицензиях (HTML-код) в метаданных статьи

Nanomodification of epoxy binders. by <a xmlns:cc="http://creativecommons.org/ns#" href="http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/">Creative Commons Attribution 4.0 International License. is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License.
Based on a work at <a xmlns:dct="http://purl.org/dc/terms/" href="http://nanobuild.ru/en_EN/nanobuild-6-2019/" rel="dct:source">http://nanobuild.ru/en_EN/nanobuild-6-2019/.
Permissions beyond the scope of this license may be available at <a xmlns:cc="http://creativecommons.org/ns#" href="http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/">http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/">Creative Commons Attribution 4.0 International License rel="cc:morePermissions">laa@kgasu.ru.

Статья поступила в редакцию: 05.11.2019.

Статья поступила в редакцию после рецензирования: 29.11.2019.

Статья принята к публикации: 02.12.2019.

INTRODUCTION

The main direction in modern materials science is the creation of composite materials, among which polymer plays a leading role [1], due to the highest values of specific indicators of strength, stiffness and other properties. Development of polymers is associated with the development of new binders, which, in addition to high mechanical properties, must have heat resistance and thermal stability, chemical resistance, etc., and, of course, adaptability, since there is a symbiotic relationship between the properties of the binder and composite material [2]. Epoxy polymers are the main polymer materials in structural adhesives, protective and decorative coatings, bulk floors and high-strength glass and basalt fiber composites for construction purposes. The use of epoxy polymers in technology is associated, first of all, with the high manufacturability of epoxy resins, and, secondly, with unique performance characteristics that satisfy many requirements.

In order to reduce the cost and achieve high operational characteristics, first of all, hardness, elastic modulus, heat resistance, wear resistance of the material, i.e. increase the degree of resistance to external force, basic epoxy polymers are modified. Recent studies have highlighted the effectiveness of nanomodification, in particular, carbon nanotubes (CNTs), to obtain materials with fundamentally new properties [3].

Nanomodifications of epoxy polymers with carbon nanotubes, both non-functionalized and functionalized, many works have been devoted to [3–11]. In [3], an analysis of the problems of nanomodification of epoxy polymers by carbon nanotubes is given. In [4], the results of work in the field of modifying CNTs and the creation of composites with their participation for the production of new generation materials were analyzed. The inconsistency of many experimental data on the modification of epoxy resins is noted, both in terms of their effect on the cure rate and in terms of the mechanical properties of the cured matrices. The authors' research works published earlier [12, 13] determined the extreme concentration dependence of the main technological and technical properties of nanomodified composites with maxima at hundredths and thousandths of a percent of nanosupplements of various chemical nature.

In this work, we study the effect on the properties of epoxy polymers of domestic production of carbon nanostructures (ONS) produced by NanoTechCenter LLC (Tambov).

MAIN PART

Experimental part

In the present work, samples of epoxy compositions with the addition of various concentrations of CNTs

to the base composition were prepared. The base resin was taken epoxy-diane resin ED-20, and as a hardener polyethylene polyamine in the amount of 15 m.h. per 100 m.h. pitches. Nanomodifiers were introduced from 0.01 to 10%. The following types of ONS are used:

- aqueous colloidal dispersion of carbon nanotubes (CNTs) of the Taunit-M, stabilized in a weakly alkaline medium by phenol-formaldehyde resin (PFS): (PFS – 1%; CNT «Taunit M» – 2%).
- Taunit-M_{fun} – free-flowing black powder of carbon nanotubes of the Taunit-M, functionalized by alkyl groups by the gas-phase method. The content of alkyl groups is 11.5%.

The basic multilayer CNTs of Taunit-M are nano-sized, quasi-one-dimensional filamentary formations of polycrystalline graphite with a cylindrical orientation of layers with internal channels (inner diameter 4–8 nm, outer diameter 8–15 nm, tube length $\geq 2 \mu\text{m}$).

It was shown that the efficiency of nanomodification depends on the sequence of combining the components in the binder [14]. In this work, for the preparation of samples, the following sequence of combining the components of the binder was selected: Epoxy resin ED-20 + CNT + PEPA hardener. The curing mode of the composition: 1. Exposure for 24 hours at room temperature; 2. Heat treatment at a temperature of 80°C for 6 hours.

To assess the effectiveness of nanomodification, the following test and research methods were used:

1. Vickers microhardness was determined according to GOST R ISO 6507-1-2007.

2. The strength of the adhesive seam on the gap was determined according to GOST 14760-69.

3. The glass transition temperature and high elasticity modulus were determined by thermomechanical compression curves (TMC) obtained using the installation with Master Scada software. The measurements were carried out on samples in the form of cylinders with a thickness of 3 mm and a diameter of 8 mm with a constant compressive specific load $\sigma = 1.25 \text{ MPa}$ and a temperature increase rate of 30°C/min. The glass transition temperature T_{st} was estimated by the transition point on the curve from the glassy to highly elastic state. The modulus of high elasticity was calculated based on the data of the relative deformation of the samples in the high elastic region (from TMC).

4. The microstructure of the surface of the brittle cleavage of cured samples was recorded using a Carl Zeiss Mertil field-emission high-resolution scanning electron microscope with an accelerating voltage of primary electrons of 5 kV and a probe current of 300 pA to minimize the impact on the object under study. The preparation procedure is as follows: epoxy samples were placed in liquid nitrogen, after which cleavage was performed. Chipped samples were fixed on the holder and placed in the chamber of the Quorum Q150TES vacuum installation. The conductive layer was deposited by cathodic

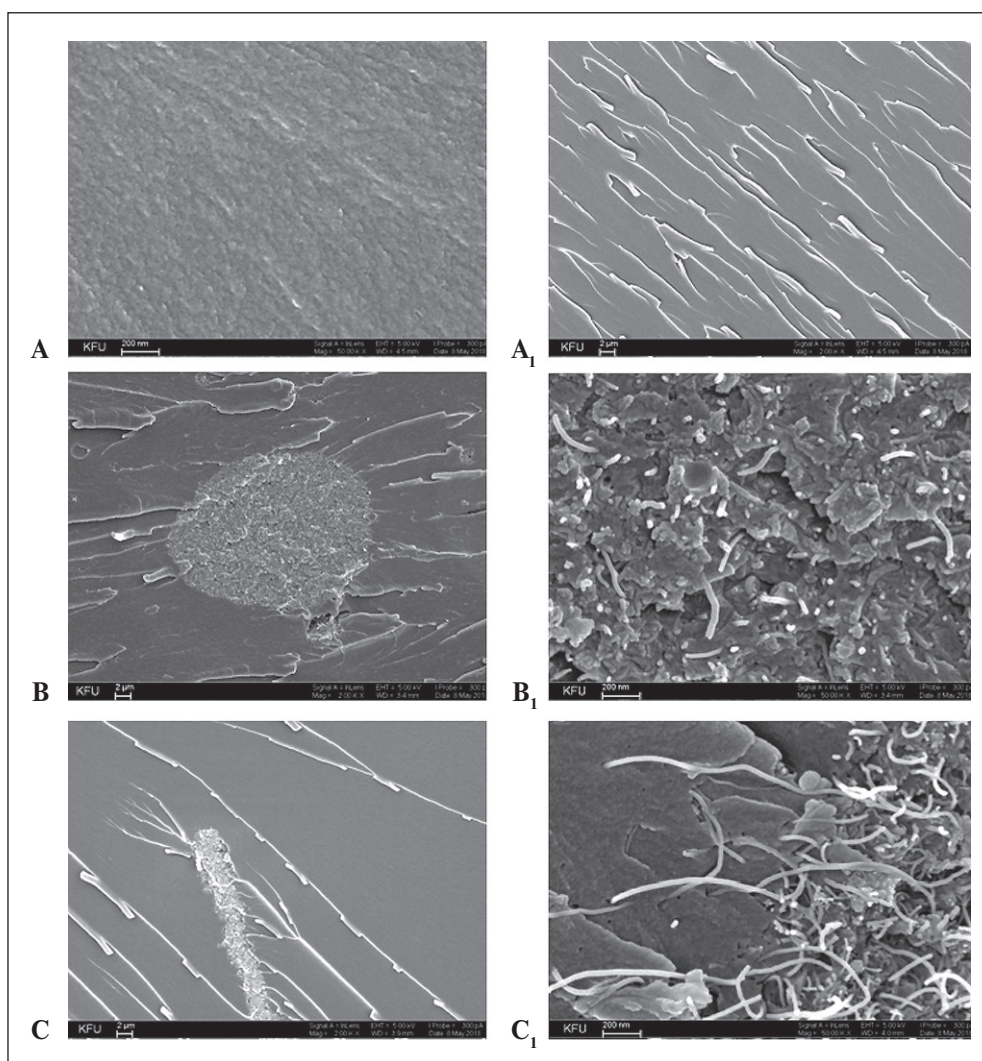


Fig. Electronic micrographs of epoxy polymers:

A, A₁ – Control sample; B, B₁ – 0.05% CNT in the form of a stabilized dispersion;
 C, C₁ – 0.5% CNT Taunit-M in the form of a functionalized powder:
 A, B, C (scale 2 μm); A₁, B₁, C₁ (200 nm scale)

sputtering of Au/Pd alloys in a ratio of 80/20. The thickness of the deposited layer was 15 nm.

Research results and discussion

Patterns of changes in macroproperties during nanomodification are specific depending on the type of ONS. First, the optimum properties are observed at concentrations of 0.05% in the case of the use of CNT dispersions and 0.5% for functionalized aggregated CNT powders. Secondly, the absolute values of microhardness are higher in the case of using functionalized CNTs.

Electron micrographs of brittle cleavage of samples at optimal CNT concentrations in comparison with control

unmodified samples of epoxy polymers in different scale ranges are shown in Fig.

The nature of structural changes allows us to some extent explain the greater efficiency of functionalized CNTs. A comparison of microphotographs shows that the introduction of CNTs in the form of dispersions leads to the separation of microphases 18–20 μm in size, while functionalized CNTs lead to the formation of extended microphases with a diameter of about 2 μm. Microphotographs of the structure of these inclusions (Figs. B₁ and C₁) show that CNTs are distributed precisely in the volume of these microinclusions.

In the table gives the properties of the optimal formulations of modified epoxy polymers.

Table

Indicators of optimal compositions of nanomodified samples

Name and concentration of CNT (%)	Peel strength, kPa	Microhardness, kg/mm ²	Glass transition temperature, °C	High-elasticity modulus, MPa
Control	118	15.8	124	4.9
0,05% CNT (dispersion)	45	23.5	126	5.4
0,5% Taunit-M _{fun}	139	30.8	105	3.8

The indicators of optimal formulations of epoxy composites presented in Table are interpreted as follows:

1. Peel strength of the adhesive joint increases in the presence of functionalized CNTs. In the case of using functionalized CNTs, the detachment mechanism is adhesive, in contrast to the control sample and in the presence of aqueous dispersions.

2. In the case of functionalized tubes, with a decrease in the glass transition temperature, an increase in mechanical properties is observed, which is rarely observed in the case of native CNTs. All these data suggest that there are phase inclusions in the epoxy matrix with significantly different structures and properties from the matrix. It is believed that the boundary layer of the polymer is more elastic than the original epoxy structure. It is significant

that the introduction of ONS leads to an increase in the microhardness of the samples.

CONCLUSION

Thus, comparing the results of changes in operational indicators, it can be concluded that the modification of functionalized CNTs is the most effective in the composition of epoxy resins, due to a more uniform distribution of the nanoparticle in the polymer matrix. Under the action of functionalized CNTs, a more rare-mesh structure is formed. Obviously, the hardener molecules are oriented on the surface of the nanostructures, that contributes to the development of network formation with elongation of interstitial fragments.

ВВЕДЕНИЕ

Главным направлением в современном материаловедении является создание композиционных материалов, среди которых полимерным принадлежит ведущая роль [1] благодаря наивысшим значениям удельных показателей прочности, жесткости и других свойств. Их развитие связано с разработкой новых связующих, которые, кроме высоких механических показателей, должны обладать тепло- и термостойкостью, химическим сопротивлением и т.д., и, безусловно, технологичностью, поскольку существует симбатность между свойствами связующего и композиционного материала [2]. Эпоксидные полимеры являются основными полимерными материалами в конструкционных клеях, защитно-декоративных покрытиях, наливных полах и высокопрочных стекло- и базальтволоконистых композитах строительного назначения. Применение эпоксидных полимеров в технике связано, в первую очередь, с высокой технологичностью эпоксидных смол, а, во-вторых,

с уникальными эксплуатационными характеристиками, удовлетворяющими многие требования.

Для снижения стоимости и достижения высоких эксплуатационных характеристик, в первую очередь, прочности, твердости, модуля упругости, теплостойкости, износостойкости материала, т.е. повышения степени сопротивления внешним силовым воздействиям, базовые эпоксидные полимеры подвергают модификации. Исследования последних лет позволяют выделить эффективность наномодификации, в частности, углеродными нанотрубками (УНТ), для получения материалов с принципиально новыми свойствами [3].

Наномодификации эпоксидных полимеров углеродными нанотрубками, как нефункционализированными, так и функционализированными, посвящено много работ [3–11]. В [3] дается анализ проблем наномодификации эпоксидных полимеров углеродными нанотрубками. В работе [4] проанализированы результаты работ в области модифицирования УНТ и создания композитов с их участием для получения

материалов нового поколения. Отмечается противоречивость многих экспериментальных данных при модификации эпоксидных смол, как по влиянию на скорость отверждения, так и по показателям механических свойств отвержденных матриц. В представленных ранее публикациях авторов [12, 13] была установлена экстремальная концентрационная зависимость основных технологических и технических свойств наномодифицированных композитов с максимумами при сотых и тысячных долях процента нанодобавок различной химической природы.

В настоящей работе изучается влияние на свойства эпоксидных полимеров отечественной продукции углеродных наноструктур (УНС), производимых ООО «НаноТехЦентр» (г. Тамбов).

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Экспериментальная часть

В представленной работе были подготовлены образцы эпоксидных композиций с добавлением в базовый состав УНТ различной концентрации. В качестве базовой смолы взята эпоксидно-диановая смола ЭД-20, а в качестве отвердителя полиэтиленполиамин в количестве 15 м.ч. на 100 м.ч. смолы. Наномодификаторы вводились от 0,01 до 10%. Используются следующие виды УНС:

- водная коллоидная дисперсия углеродных нанотрубок (УНТ) марки «Таунит-М», стабилизированная в слабощелочной среде фенолформальдегидной смолой (ФФС): (ФФС – 1%; УНТ «Таунит-М» – 2%).
- Таунит-М_{функ} – сыпучий порошок черного цвета углеродных нанотрубок марки Таунит-М, функционализированных алкильными группами газофазным методом. Содержание алкильных групп 11,5%.

Базовые многослойные УНТ Таунит-М – наноразмерные, квазиодномерные нитевидные образования поликристаллического графита с цилиндрической ориентацией слоев с внутренними каналами (внутренний диаметр 4–8 нм, внешний диаметр 8–15 нм, длина трубок ≥ 2 мкм).

Было показано, что эффективность наномодификации зависит от последовательности совмещения компонентов в связующем [14]. В данной работе для приготовления образцов выбрана следующая последовательность совмещения компонентов связующего: эпоксидная смола ЭД-20 + УНТ + отвердитель ПЭПА.

Режим отверждения композиции: 1. выдержка в течение 24 часов при комнатной температуре; 2. термообработка при температуре 80°C в течение 6 часов.

Для оценки эффективности наномодификации использованы следующие методы испытаний и исследований:

1. Микротвердость по Виккерсу определялась согласно ГОСТ Р ИСО 6507-1-2007.

2. Прочность клеевого шва на отрыв определялась по ГОСТ 14760-69.

3. Температура стеклования и модуль высокоэластичности определялись по термомеханическим кривым (ТМК) сжатия, полученным на установке с программным обеспечением Master Scada. Измерения проводились на образцах в виде цилиндров толщиной 3 мм и диаметром 8 мм при постоянной сжимающей удельной нагрузке $\sigma = 1,25$ МПа и скорости повышения температуры 30°C/мин. Температура стеклования $T_{ст}$ оценивалась по точке перехода на кривой из стеклообразного в высокоэластическое состояние. Модуль высокоэластичности рассчитывался исходя из данных относительной деформации образцов в высокоэластической области (из ТМК).

4. Съемку микроструктуры поверхности хрупкого скола отвержденных образцов производили на автоэмиссионном высокоразрешающем сканирующем электронном микроскопе Metril компании Carl Zeiss при ускоряющем напряжении первичных электронов 5 кВ и зондовом токе 300 пА для минимального воздействия на объект исследования. Методика препарирования следующая: эпоксидные образцы помещались в жидкий азот, после чего производился скол. Сколы образцов фиксировались на держателе и помещались в камеру вакуумной установки Quorum Q150TES. Нанесение проводящего слоя проводилось методом катодного распыления сплавов Au/Pd в соотношении 80/20. Толщина нанесенного слоя составляла 15 нм.

Результаты исследования и их обсуждение

Закономерности изменения макросвойств при наномодифицировании имеют специфику в зависимости от вида УНС. Во-первых, оптимум свойств наблюдается при концентрациях 0,05% в случае использования дисперсий УНТ и 0,5% для функционализированных агрегированных порошков УНТ. Во-вторых, абсолютные величины микротвердости выше в случае использования функционализированных УНТ.

Электронные микрофотографии хрупкого скола образцов при оптимальных концентрациях УНТ в сравнении с контрольными немодифицированными образцами эпоксидных полимеров в разных масштабных линейках представлены на рис.

Характер структурных изменений позволяет в определенной степени объяснить большую эффективность функционализированных УНТ. Сравнение

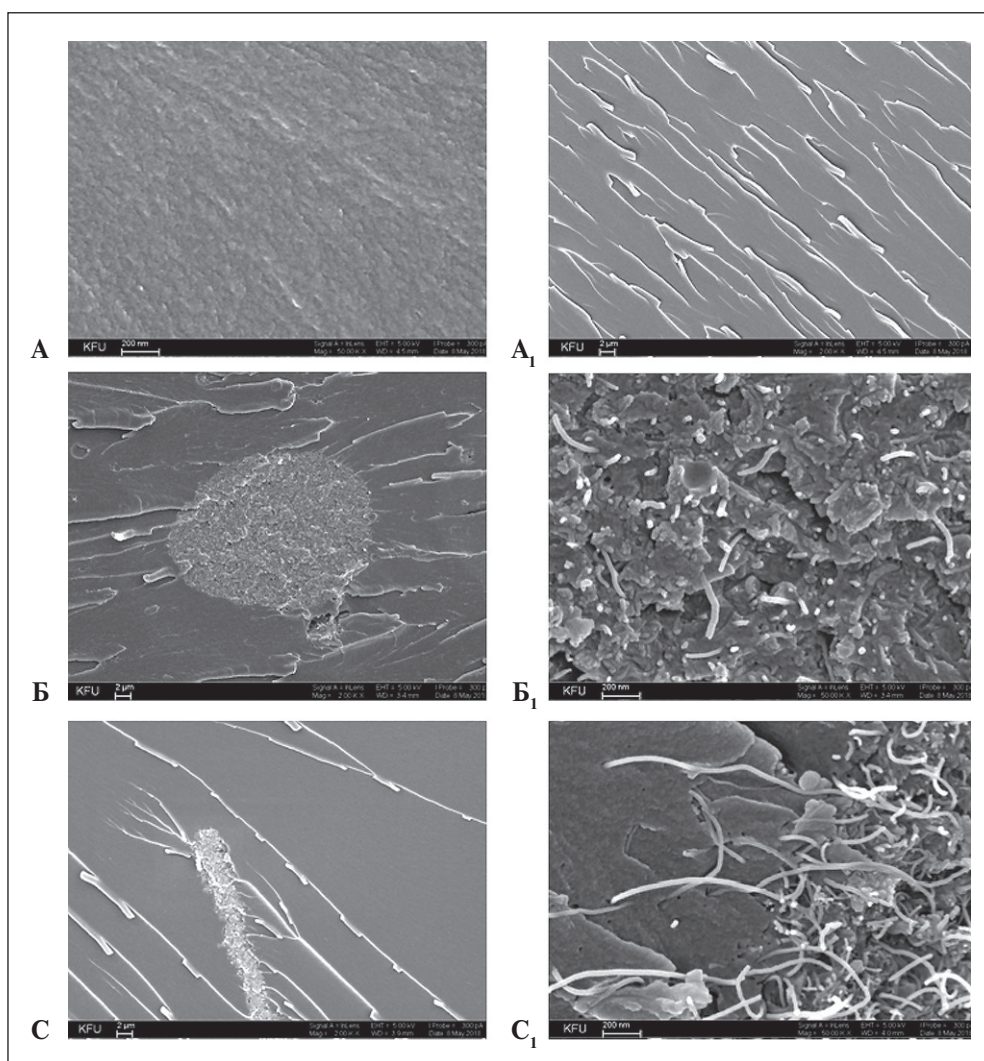


Рис. Электронные микрофотографии эпоксидных полимеров:

A, A₁ – контрольный образец; B, B₁ – 0,05% УНТ в виде стабилизированной дисперсии; C, C₁ – 0,5% УНТ Таунит-М в виде функционализированного порошка; A, B, C (масштаб 2 мкм); A₁, B₁, C₁ (масштаб 200 нм)

микрофотографий показывает, что введение УНТ в форме дисперсий приводит к выделению микрофаз размером 18–20 мкм, а функционализированные УНТ приводят к образованию протяженных микрофаз диаметром около 2 мкм. Микрофотографии строения этих включений (рис. B₁ и C₁) показывают, что УНТ распределены именно в объеме этих микровключений.

В табл. даны свойства оптимальных рецептов модифицированных эпоксидных полимеров.

Представленные в табл. показатели оптимальных рецептов эпоксидных композитов интерпретируются следующим образом:

1. Прочность клеевого соединения на отрыв увеличивается в присутствии функционализированных

УНТ. В случае применения функционализированного УНТ механизм отрыва адгезионный в отличие от контрольного образца и в присутствии водных дисперсий.

2. В случае функционализированных трубок при снижении температуры стеклования наблюдается увеличение механических свойств, что редко наблюдалось в случае нативных УНТ. Все эти данные предполагают, что в эпоксидной матрице существуют фазовые включения с существенно отличающимися от матрицы структурой и свойствами. Считается, что приграничный слой полимера более эластичен по сравнению с исходной эпоксидной структурой. Показательно, что введение УНТ приводит к росту микротвердости образцов.

Таблица

Показатели оптимальных составов наномодифицированных образцов

Наименование и концентрация УНТ (%)	Прочность на отрыв, кПа	Микротвердость, кг/мм ²	Температура стеклования, °С	Модуль высокоэластичности, МПа
Контрольный	118	15,8	124	4,9
0,05% УНТ (дисперсия)	45	23,5	126	5,4
0,5% Таунит _{функц}	139	30,8	105	3,8

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, сравнивая результаты изменения эксплуатационных показателей, можно заключить, что в составе эпоксидных смол наиболее эффективна модификация функционализированными УНТ, обусловленная более равномерным

распределением нанодобавки в матрице полимера. Под действием функционализированных УНТ формируется более редкосетчатая структура. Очевидно, что происходит ориентация молекул отвердителя на поверхности наноструктур, что способствует развитию сеткообразования с удлинением межузловых фрагментов.

REFERENCES

- Berlin A.A., Wolfson S.A., Oshmyan V.G., Enikolopov N.S. Principy sozda-nija kompozicionnyh polimernyh materialov [The principles of creation of composite polymer materials]. Moscow. Himija [Chemistry]. 1990. 238 p. (In Russian).
- Kerber M. L. Polimernye kompozicionnye materialy. Struktura. Svoystva. Tehnologii. [Polymer composite materials. Structure. Properties Technologies]. St. Petersburg. Professija [Profession]. 2008. 560 p. (In Russian).
- Irzhak V.I. Jepoksidnye kompozicionnye materialy s uglerodnymi nano-trubkami [Epoxy composite materials with carbon nanotubes]. Uspekhi khimii [Advances in Chemistry]. 2011. No. 80 (8). P. 821–840. (In Russian).
- Badamshina E.R., Gafurova M.P., Estrin Y.I. Modificirovanie uglerodnyh nanotrubok i sintez polimernyh kompozitov s ih uchastiem [Modification of carbon nanotubes and the synthesis of polymer composites with their participation]. Uspekhi khimii [Advances in Chemistry]. 2010. 79 (11). P. 1027–1063. (In Russian).
- Badamshina E.R., Estrin Y.I. Nanomodificirovanie jepoksidnyh oligomerov – literaturnye dannye i sobstvennye rezul'taty [Nanomodification of epoxy oligomers – literature data and own results]. Sbornik tezisov dokladov V mezhduna-rodnoj konferencii-shkoly po khimii i fiziko-khimii oligomerov [Collection of Abstracts of the V International Conference-School on the Chemistry and Physical Chemistry of Oligomers]. Volgograd. 2015. P. 8. (In Russian).
- Wang C., Guo Z.-X., Fu S., Wu W., Zhu D. Polymers containing fullerene or carbon nanotube structures. Prog. Polym. Sci. 2004. V. 29. P. 1079–1141.
- Wagner H.D. Stress-induced fragmentation of multiwall carbon nanotubes in a polymer matrix. Applied Physics Letters. 1998. Vol. 72. P. 188.
- Zimin D.E., Tatarintseva O.S., Kychkin A.K. Nanomodifikacija jepoksidnogo svjazujushhego dlja sozdaniya bazal'toplastika s uluchshennymi jekspluatacionnymi svoystvami [Nanomodification of epoxy binder to create basalt plastic with improved performance propertie]. Polzunovskij vestnik [Polzunovsky Bulletin]. 2013. No. 3. P. 282–285. (In Russian).
- Titov S.A., Tkachev A.G., Slepov S.K., Anikhovskaya L.I., Melezhik A.V., Dotsenko A.M., Vermel V.D., Kladova L.S. Sposob dispergirirovanija nanochastich v jepoksidnoj smole [The method of dispersing nanoparticles in epoxy resin]. Patent 2500706 RF IPC C09J4/00. 2013. Bull. No. 34. (In Russian).
- Khozin V.G., Starovoitova I.A., Maysuradze N.V., Zykova E.S., Halikova R.A., Korzhenko A.A., Trineeva V.V., Yakovlev G.I. Nanomodificirovanie polimernyh svjazuju-shhih dlja konstrukcionnyh kompozitov [Nanomodification of polymer binders for structural composites]. Stroitel'nye materialy [Building Materials]. 2013. No. 2. P. 4–11. (In Russian).
- Starovoitova I.A., Khozin V.G., Korzhenko A.A., Halikova R.A., Zykova E.S. Strukturoobrazovanie v organo-neorganicheskikh svjazujushhih, modifitsirovannykh koncentratami mnogoslojnyh uglerodnyh nanotrubok [Structure formation in organo-inorganic

binders modified with concentrates of multilayer carbon nanotubes]. *Stroitel'nye materialy* [Building Materials]. 2014. No. 1–2. P. 12–20. (In Russian).

12. Khozin V.G., Nizamov R.K., Abdrakhmanova L.A. Modifikacija stroitel'nyh po-limerov (polivinilhlorida i jepoksidnyh) odnoslojnymi uglernymi trubkami [Modification of building polymers (polyvinyl chloride and epoxy) with single-layer carbon pipes]. *Stroitel'nye materialy* [Building materials]. 2017. No. 1–2. P. 55–61. (In Russian).

13. Khozin V.G., Abdrakhmanova L.A., Nizamov R.K. The general concentration pattern of the effects of nanomodification of building materials. *Stroitel'nye materialy* [Building materials]. 2015. No. 2. P. 25–33. (In Russian).

14. Khozin V.G., Abdrakhmanova L.A., Nizamov R.K., Khantimirov A.G., Mustavina A.R. Vozmozhnosti primeneniya produkcii OOO «NanoTehCentr» dlja poluchenija polimer-nyh nanokompozitov stroitel'nogo naznachenija [The possibilities of application of products of Nanotechcenter LLC for obtaining polymer nanocomposites of construction purposes]. *Trudy III Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii «Grafen i rodstvennye struktury: sintez, proizvodstvo i primeneniye»* [Materials of the III International Scientific-Practical Conference «Graphene and Related Structures: Synthesis, Production, and Application»]. Tambov. 2019. P. 241–242. (In Russian).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Берлин А.А., Вольфсон С.А., Ошмян В.Г., Ениколопов Н.С. Принципы создания композиционных полимерных материалов – М.: Химия, 1990. – 238 с.

2. Кербер М.Л., Полимерные композиционные материалы. Структура. Свойства. Технологии. – СПб.: Профессия, 2008. – 560 с.

3. Иржак В.И. Эпоксидные композиционные материалы с углеродными нанотрубками // *Успехи химии*. – 2011. – № 80(8). – С. 821–840.

4. Бадамшина Э.Р., Гафурова М.П., Эстрин Я.И. Модифицирование углеродных нанотрубок и синтез полимерных композитов с их участием // *Успехи химии*. – 2010. – 79 (11). – С. 1027–1063.

5. Бадамшина Э.Р., Эстрин Я.И. Наномодифицирование эпоксидных олигомеров – литературные данные и собственные результаты // *Сборник тезисов докладов V международной конференции-школы по химии и физико-химии олигомеров*. – Волгоград. – 2015. – С. 8.

6. Wang C., Guo Z.-X., Fu S., Wu W., Zhu D. Polymers containing fullerene or carbon nanotube structures // *Prog. Polym. Sci.* – 2004. – V. 29. – P. 1079–1141.

7. Wagner H.D. Stress-induced fragmentation of multiwall carbon nanotubes in a polymer matrix // *Applied Physics Letters*. – 1998. – Vol. 72. – P. 188.

8. Зимин, Д.Е., Татаринцева О.С., Кычкин А.К. Наномодификация эпоксидного связующего для создания базальтопластика с улучшенными эксплуатационными свойствами // *Ползуновский вестник*. – 2013. – № 3. – С. 282–285.

9. Титов С.А., Ткачев А.Г., Слепов С.К., Аниховская Л.И., Мележик А.В., Доценко А.М., Вермель В.Д., Кладова Л.С. Способ диспергирования наночастиц в эпоксидной смоле // Патент 2500706 РФ МПК С09J4/00. 2013. Бюл. №34.

10. Хозин В.Г., Старовойтова И.А., Майсурадзе Н.В., Зыкова Е.С., Халикова Р.А., Корженко А.А., Тринеева В.В., Яковлев Г.И. Наномодифицирование полимерных связующих для конструкционных композитов // *Строительные материалы*. – 2013. – № 2. – С. 4–11.

11. Старовойтова И.А., Хозин В.Г., Корженко А.А., Халикова Р.А., Зыкова Е.С. Структурообразование в органо-неорганических связующих, модифицированных концентратами многослойных углеродных нанотрубок // *Строительные материалы*. – 2014. – № 1–2. – С. 12–20.

12. Хозин В.Г., Низамов Р.К., Абдрахманова Л.А. Модификация строительных полимеров (поливинилхлорида и эпоксидных) однослойными углеродными трубками // *Строительные материалы*. – 2017. – № 1–2. – С. 55–61.

13. Хозин В.Г., Абдрахманова Л.А., Низамов Р.К. Общая концентрационная закономерность эффектов наномодифицирования строительных материалов // *Строительные материалы*. – 2015. – № 2. – С. 25–33.

14. Хозин В.Г., Абдрахманова Л.А., Низамов Р.К., Хантимиров А.Г., Мустафина А.Р. Возможности применения продукции ООО «НаноТехЦентр» для получения полимерных наноконкомпозитов строительного назначения / *Труды III Международной научно-практической конференции «Графен и родственные структуры: синтез, производство и применение»*. – Тамбов. 2019. – С. 241–242.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Abdrakhmanova Lyaylya Abdullovna, Doctor of Engineering, Professor, Department of Technology of Building Materials, Products and Structures, Kazan State University of Architecture and Engineering, Zelenaya str., 1, Kazan, Republic of Tatarstan, Russia, 420043, laa@kgasu.ru

Khozin Vadim Grigorievich, Doctor of Engineering, Professor, Head of the Department «Technology of Building Materials, Products and Structures», Kazan State University of Architecture and Engineering, Zelenaya str., 1, Kazan, Republic of Tatarstan, Russia, 420043, khozin.vadim@yandex.ru

Nizamov Rashit Kurbangalievich, Doctor of Engineering, Professor, Rector, Kazan State University of Architecture and Engineering, Zelenaya str., 1, Kazan, Republic of Tatarstan, Russia, 420043, nizamov@kgasu.ru

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Абдрахманова Ляйля Абдулловна, доктор технических наук, профессор кафедры «Технология строительных материалов, изделий и конструкций», Казанский государственный архитектурно-строительный университет, ул. Зеленая, д. 1, г. Казань, Республика Татарстан, Россия, 420043, laa@kgasu.ru

Хозин Вадим Григорьевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технология строительных материалов, изделий и конструкций», Казанский государственный архитектурно-строительный университет, ул. Зеленая, д. 1, г. Казань, Республика Татарстан, Россия, 420043, khozin.vadim@yandex.ru

Низамов Рашит Курбангалиевич, доктор технических наук, профессор, ректор, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, ул. Зеленая, д. 1, г. Казань, Республика Татарстан, Россия, 420043, nizamov@kgasu.ru

CONTACTS / КОНТАКТЫ

e-mail: laa@kgasu.ru