

## ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ЭПОКСИДНЫХ НАНОКОМПОЗИТОВ, МОДИФИЦИРОВАННЫХ ФУНКЦИОНАЛИЗИРОВАННЫМИ МНОГОСЛОЙНЫМИ УГЛЕРОДНЫМИ НАНОТРУБКАМИ

© А. С. Мостовой<sup>1</sup>, А. В. Яковлев<sup>2</sup>, В. Н. Целуйкин<sup>1</sup>, А. А. Стрилец<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Энгельсский технологический институт (филиал)

Саратовского государственного технического университета им. Гагарина Ю. А.,  
413100, г. Энгельс, пл. Свободы, д. 17

<sup>2</sup> Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю. А.,  
410054, г. Саратов, ул. Политехническая, д. 77

E-mail: Mostovoy19@rambler.ru

Поступила в Редакцию 3 декабря 2021 г.

После доработки 16 января 2022 г.

Принята к публикации 26 января 2022 г.

*Многослойные углеродные нанотрубки были модифицированы путем взаимодействия с  $\gamma$ -аминопропилтриэтоксисилоном и диспергированы в эпоксидной композиции. Свойства многослойных углеродных нанотрубок, обработанных  $\gamma$ -аминопропилтриэтоксисилоном, охарактеризованы с помощью просвечивающей электронной микроскопии, спектроскопии комбинационного рассеяния и ИК-Фурье-спектроскопии. Многослойные углеродные нанотрубки, модифицированные  $\gamma$ -аминопропилтриэтоксисилоном, равномерно распределяются в массе эпоксидной композиции. Введение модифицированных углеродных нанотрубок в эпоксидную композицию инициирует процесс отверждения эпоксидного олигомера, кроме того, приводит к упрочнению эпоксидных композитов: прочность при изгибе увеличивается на 194%, модуль упругости при изгибе увеличивается на 137%, прочность при растяжении увеличивается на 108%, модуль упругости при растяжении увеличивается на 52%, ударная вязкость увеличивается на 300% по сравнению с пластифицированным эпоксидным композитом, не содержащим многослойных углеродных нанотрубок.*

**Ключевые слова:** эпоксидный олигомер; модификация; пластификатор; наполнитель; многослойные углеродные нанотрубки; функционализация;  $\gamma$ -аминопропилтриэтоксисилан; термостойкость; механические свойства

DOI: 10.31857/S0044461822010091

Углеродные нанотрубки широко используются в качестве модифицирующей добавки, повышающей электропроводность, теплопроводность и термостабильность полимерных композитов [1, 2]. Однако введение углеродных нанотрубок в эпоксидные композиции лишь незначительно увеличивает прочность композитов, а в некоторых случаях даже снижает ее. Это связано с агломерацией углеродных нанотрубок, следовательно, неравномерным их распределением в эпоксидной композиции, а также с плохой адгезией между углеродными нанотрубками и полимерной матрицей [3, 4].

Для достижения максимального упрочняющего эффекта от введения углеродных нанотрубок в по-

лимерные композиты поверхность углеродных нанотрубок модифицируют различными способами, включая фторирование [4], силанизацию [5], карбоксилирование и амидирование [6, 7]. Полимерные композиты, содержащие модифицированные углеродные нанотрубки, отличаются большей механической, термической и электрической прочностью, чем композиты, содержащие немодифицированные углеродные нанотрубки. Введение в композицию модифицированных углеродных нанотрубок изменяет протекание процесса отверждения композитов [8, 9]. Обнаружено, что процесс отверждения композиций, содержащих аминифункционализованные углеродные нанотрубки, протекает с большей скоростью

[8], а в работе [9] доказано повышение энтальпии реакции отверждения эпоксидных нанокompозитов, содержащих аминифункционализованные углеродные нанотрубки. Реакционноспособные аминогруппы на поверхности углеродных нанотрубок могут влиять на равномерность распределения углеродных нанотрубок в эпоксидной композиции и межфазное взаимодействие в эпоксидных композитах [10].

Цель работы — изучение влияния введения в эпоксидную композицию структурирующей добавки в виде карбоксилированных углеродных нанотрубок, функционализованных  $\gamma$ -аминопропилтриэтоксисиланом, на процессы структурообразования, физико-химические и механические характеристики эпоксидных композитов, пластифицированных трихлорэтилфосфатом.

### Экспериментальная часть

Разрабатывали составы на основе эпоксидной диановой смолы марки ЭД-20 (АО «ХИМЭКС Лимитед»), характеризующейся низкой вязкостью и стабильностью физико-химических свойств. В качестве отвердителя эпоксидного олигомера применяли отвердитель аминного типа — полиэтиленполиамин (АО «ХИМЭКС Лимитед»), способный формировать трехмерную сетчатую структуру без нагрева.

Для пластификации эпоксидных композитов в работе использовали трихлорэтилфосфат (Xuancheng City Trooyawn Refined Chemical Industry Co., Ltd) со степенью чистоты 95–99%. Молекула трихлорэтилфосфата содержит в составе фосфор (10.8%) и хлор (36.9%), что позволяет использовать это соединение в качестве антипирена [11]. При термодеструкции композита, содержащего трихлорэтилфосфат, отмечено повышение выхода карбонизованных структур, препятствующих выделению летучих продуктов пиролиза в газовую фазу, что обеспечивает снижение горючести эпоксидного композита [12, 13].

В качестве полимерной матрицы использован ранее разработанный состав, состоящий из ЭД-20 (100 мас. ч.), трихлорэтилфосфата (40 мас. ч.) и полиэтиленполиамин (15 мас. ч.) [13].

Для упрочнения эпоксидных композитов применяли многослойные карбоксилированные углеродные нанотрубки (ООО «Нанотехцентр») (внутренний и внешний диаметры — 4–8 и 8–15 нм, длина  $>2$  мкм), со степенью чистоты 99%.

Поверхность многослойных карбоксилированных углеродных нанотрубок обрабатывали  $\gamma$ -аминопропилтриэтоксисиланом (АГМ-9, ООО «ПЕНТА-91»). Для этого 0.5 г многослойных карбоксилированных

углеродных нанотрубок диспергировали в 100 мл 5%-ного раствора  $\gamma$ -аминопропилтриэтоксисилана в дистиллированной воде с помощью гомогенизатора в течение 10 мин. Суспензию кипятили с обратным холодильником при 80°C в течение 12 ч при постоянном низкоскоростном перемешивании при 100 об·мин<sup>-1</sup>. Для повышения растворимости АГМ-9 в воде рН смеси доводили до 5 при постепенном введении ледяной уксусной кислоты (99.9%) (х.ч., ООО «Компонент-Реактив»). Кислая среда способствует увеличению образования силанола и уменьшению реакций самоконденсации между гидролизованными силанольными группами. Полученную суспензию центрифугировали и дважды промывали дистиллированной H<sub>2</sub>O для удаления оставшегося силанового соединения вокруг частиц многослойных углеродных нанотрубок. Затем продукт сушили при 80°C в течение 5 ч в лабораторной печи.

В пластифицированный трихлорэтилфосфатом эпоксидный состав многослойные углеродные нанотрубки вводились в качестве модифицирующей добавки (0.01–0.50 мас. ч.). Для повышения равномерности распределения и препятствия агрегации частиц применяли ультразвуковую обработку состава на ультразвуковом диспергаторе УЗДН-2Т (НПП «УкрРосПрибор»). Параметры ультразвукового воздействия: частота —  $22 \pm 2$  кГц, мощность — 400 Вт, продолжительность — 60 мин. Смесь перед отверждением дегазировали при  $25 \pm 5^\circ\text{C}$  в течение 30 мин в вакууме.

В работе исследования выполнены с применением следующих методов:

- определение изгибающего напряжения и модуля упругости при изгибе (ISO 178:2019 «Plastics — Determination of flexural properties»);

- определение прочности и модуля упругости при растяжении (ISO 527-2:2012 «Plastics — Determination of tensile properties. Part 2: Test conditions for moulding and extrusion plastics»);

- определение прочности при сжатии (ISO 604:2002 «Plastics — Determination of compressive properties»);

- определение ударной вязкости (ISO 179-1:2010 «Plastics — Determination of Charpy impact properties. Part 1: Non-instrumented impact test»);

- определение твердости по Бринеллю (ISO 2039-1:2001 «Plastics — Determination of hardness. Part 1: Ball indentation method»);

- определение теплостойкости по Вика (ISO 306:2004 «Plastics — Thermoplastic materials — Determination of Vicat softening temperature»).

Изменение массы, скорости изменения массы и величин тепловых эффектов при нагреве образцов

изучали с применением метода термогравиметрического анализа с использованием дериватографа фирмы MOM марки Q-1500D, условия эксперимента: навеска — 100 мг, среда — воздух, интервал нагрева — до 800°C, скорость нагрева — 10 град·мин<sup>-1</sup>, относительная ошибка не превышает 1%.

Исследование морфологии поверхности образцов проводили с помощью сканирующего электронного микроскопа Tescan VEGA 3 SBH.

Определение теплопроводности и термического сопротивления проводили на приборе ИТП-МГ4 «100» (ООО «ЭЛЕКТРОНПРИБОР») (ISO 22007-2:2015 «Plastics — Determination of thermal conductivity and thermal diffusivity. Part 2: Transient plane heat source (hot disc) method»).

ИК-Фурье-спектроскопию проводили на ИК-Фурье-спектрометре IRTracer-100 (Shimadzu). Исследование кинетики отверждения эпоксидной композиции проводили по методике [14]. Рамановские спектры регистрировали на микроскопе DXR Raman Microscope (Thermo Scientific) с лазерным возбуждением на длине волны 532 нм. Структуру многослойных углеродных нанотрубок изучали на просвечивающем электронном микроскопе JEOL JEM-1400.

Дисперсность многослойных углеродных нанотрубок была изучена методом динамического светорассеяния на приборе Nicomp 380 ZLS (Particle Sizing Systems, Inc.), для снижения вязкости эпоксидную композицию разбавляли изопропанолом (х.ч., ООО «Компонент-Реактив») в соотношении 1:1.

Удельную поверхность образцов определяли с помощью анализатора удельной поверхности и пористости Quantachrome Nova 2200 по начальному участку изотермы физической сорбции азота (99.999%). Исследуемые образцы помещали в ячейку, предварительно откалиброванную по внутреннему объему при температуре жидкого азота (около 78 К), который дегазировали в вакууме до постоянной массы при заданной температуре (150°C) в течение 3 ч.

После этого кювету устанавливали в устройство и регистрировали изотерму адсорбции азота в интервале давлений 0.03–0.3  $P/P_0$ . Удельную поверхность исследуемого образца рассчитывали методом Брунауэра–Эммета–Теллера с помощью программы Quantachrome Nova 2200.

### Обсуждение результатов

Проведенные исследования показали, что оптимальное содержание многослойных углеродных нанотрубок в качестве структурирующей добавки, обеспечивающей максимальный эффект упрочнения эпоксидного композита, составляет 0.1 мас. ч. (табл. 1), при этом разрушающее напряжение при изгибе увеличивается на 135%, модуль упругости при изгибе увеличивается на 90%, прочность при растяжении увеличивается на 88%, модуль упругости при растяжении увеличивается на 43%, ударная вязкость увеличивается на 225%.

Анализ спектров комбинационного рассеяния (рис. 1) показал, что значение  $R$  (отношение пика D и пика G) для немодифицированных многослойных углеродных нанотрубок значительно меньше, чем для обработанных  $\gamma$ -аминопропилтриэтоксисиланом, что предполагает более регулярную структуру атомов углерода немодифицированных многослойных углеродных нанотрубок. В связи с этим можно сделать вывод о том, что модификация  $\gamma$ -аминопропилтриэтоксисиланом приводит к увеличению дефектности структуры многослойных углеродных нанотрубок.

По данным просвечивающей электронной микроскопии отмечено снижение агрегирования и степени спутанности частиц многослойных углеродных нанотрубок вследствие обработки  $\gamma$ -аминопропилтриэтоксисиланом, что подтверждается увеличением расстояния между отдельными частицами (рис. 2), а также увеличением их удельной поверхности от 105 до 182 м<sup>2</sup>·г<sup>-1</sup>.

Таблица 1

Свойства эпоксидных композитов

Содержание многослойных углеродных нанотрубок в эпоксидной композиции, мас. ч.	Изгибающее напряжение, МПа	Модуль упругости при изгибе, МПа	Прочность при растяжении, МПа	Модуль упругости при растяжении, МПа	Ударная вязкость, кДж·м <sup>-2</sup>
0	53 ± 2.6	1750 ± 70	36 ± 2.1	1610 ± 65	8 ± 0.4
0.01	115 ± 3.4	2522 ± 100	59 ± 3.5	2131 ± 85	20 ± 1.0
0.05	120 ± 3.6	2881 ± 115	62 ± 3.7	2210 ± 88	23 ± 1.1
0.10	125 ± 3.8	3325 ± 130	68 ± 4.1	2302 ± 92	26 ± 1.3
0.50	98 ± 2.9	4676 ± 187	38 ± 2.3	2474 ± 98	21 ± 1.1



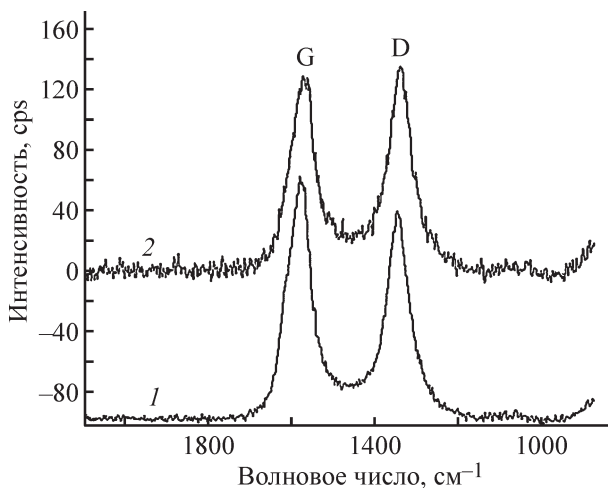


Рис. 1. Рамановские спектры необработанных (1) и обработанных  $\gamma$ -аминопропилтриэтоксисилоном (2) многослойных углеродных нанотрубок.

Суспензия с многослойными углеродными нанотрубками является полидисперсной (рис. 3, а), зарегистрированы две фракции — частицы со средним размером 400 нм и около 7000 нм. Диаграмма распределения по эффективным размерам частиц суспензии многослойных углеродных нанотрубок, обработанных  $\gamma$ -аминопропилтриэтоксисилоном, является монодисперсной, средний эффективный размер агломератов составляет 900 нм, причем агломераты большего размера не фиксируются. Таким образом, фракционный состав углеродных нанотрубок, обработанных  $\gamma$ -аминопропилтриэтоксисилоном, представлен агломератами одного размера, что обеспечи-

вает их равномерное диспергирование в эпоксидной композиции.

Образование прочных связей между многослойными углеродными нанотрубками и  $\gamma$ -аминопропилтриэтоксисилоном было доказано методом ИК-Фурье-спектроскопии (рис. 4). После модифицирования появляются пики, относящиеся к колебаниям связей, соответствующих  $\gamma$ -аминопропилтриэтоксисилану, снижается интенсивность пиков, относящихся к колебаниям гидроксогрупп ( $3400\text{--}3200\text{ см}^{-1}$ ), которые участвуют в процессе формирования слоя  $\gamma$ -аминопропилтриэтоксисилана. Широкий максимум около  $1000\text{ см}^{-1}$  свидетельствует о присутствии в образце связей Si—O, пики при  $1040$  и  $630\text{ см}^{-1}$  подтверждают образование связи Si—O—C.

Химическое взаимодействие функциональных групп АГМ-9 и эпоксидного олигомера было также доказано с помощью ИК-Фурье-спектроскопии (рис. 4).  $\gamma$ -Аминопропилтриэтоксисилан содержит аминогруппу, которая может взаимодействовать с эпоксидным кольцом смолы при добавлении в композит. После смешивания  $\gamma$ -аминопропилтриэтоксисилана и ЭД-20 в отсутствие отвердителя полиэтиленполиамина наблюдается значительное снижение интенсивности пика поглощения, соответствующего эпоксидному кольцу ( $910\text{ см}^{-1}$ ). Это подтверждает наличие взаимодействия аминогрупп  $\gamma$ -аминопропилтриэтоксисилана с эпоксидными группами ЭД-20.

Введение в эпоксидную композицию обработанных  $\gamma$ -аминопропилтриэтоксисилоном многослойных углеродных нанотрубок приводит к упрочнению

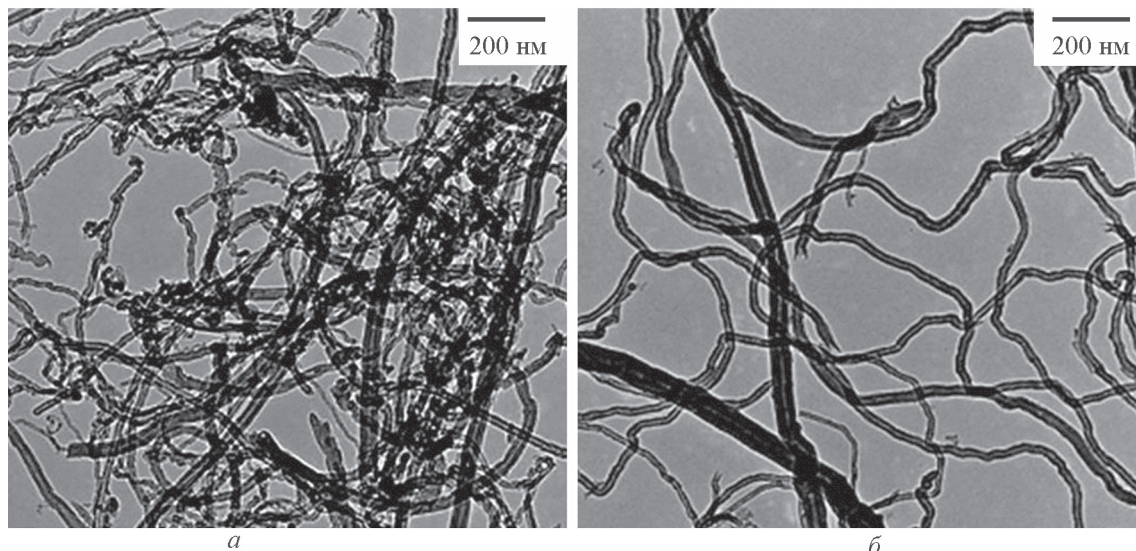


Рис. 2. Изображения, полученные методом просвечивающей электронной микроскопии, необработанных (а) и обработанных  $\gamma$ -аминопропилтриэтоксисилоном (б) многослойных углеродных нанотрубок.

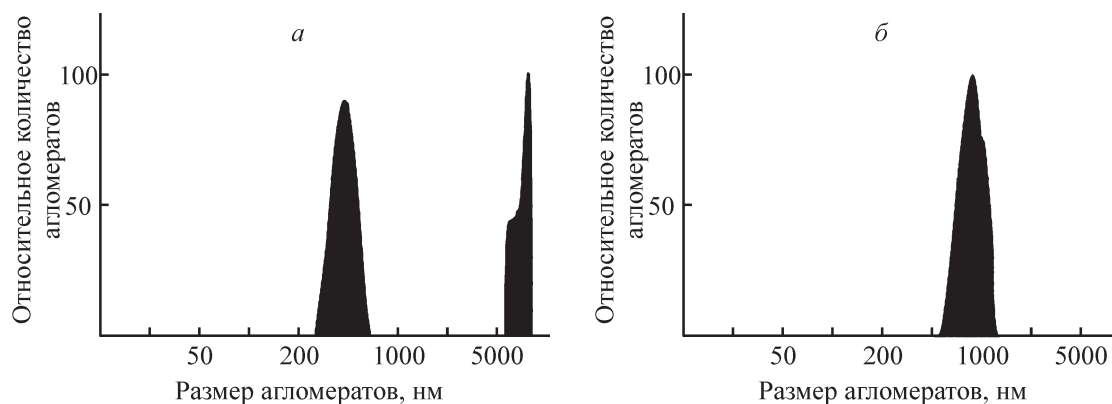


Рис. 3. Распределение по эффективным размерам частиц суспензии необработанных (*а*) и обработанных  $\gamma$ -аминопропилтриэтоксисиланом (*б*) многослойных углеродных нанотрубок в эпоксидной смоле, разбавленной изопропанолом. Концентрация многослойных углеродных нанотрубок 0.1 мас. ч.

эпоксидных композитов: изгибающее напряжение увеличивается на 194%, модуль упругости при изгибе увеличивается на 137%, предел прочности при растяжении увеличивается на 108%, модуль упругости при растяжении увеличивается на 52%, ударная вязкость увеличивается на 300% по сравнению с пластифицированным эпоксидным композитом, не содержащим многослойных углеродных нанотрубок (рис. 5).

При оценке влияния модифицирующей добавки на сетчатые полимеры необходимо учитывать, что процесс отверждения происходит в присутствии наночастиц с развитой поверхностью (многослойных углеродных нанотрубок), способных влиять на ки-

нетические характеристики реакции полимеризации при отверждении, а также на процессы формирования фазовой структуры композита.

Присутствие в композите многослойных углеродных нанотрубок оказывает влияние на процессы структурообразования при отверждении эпоксидного композита (рис. 6). Введение в эпоксидную композицию многослойных углеродных нанотрубок, обработанных  $\gamma$ -аминопропилтриэтоксисиланом, инициирует процесс отверждения. Это проявляется в сокращении продолжительностей процесса гелеобразования с 65 до 52 мин и процесса отверждения с 78 до 61 мин. При этом отмечено повышение

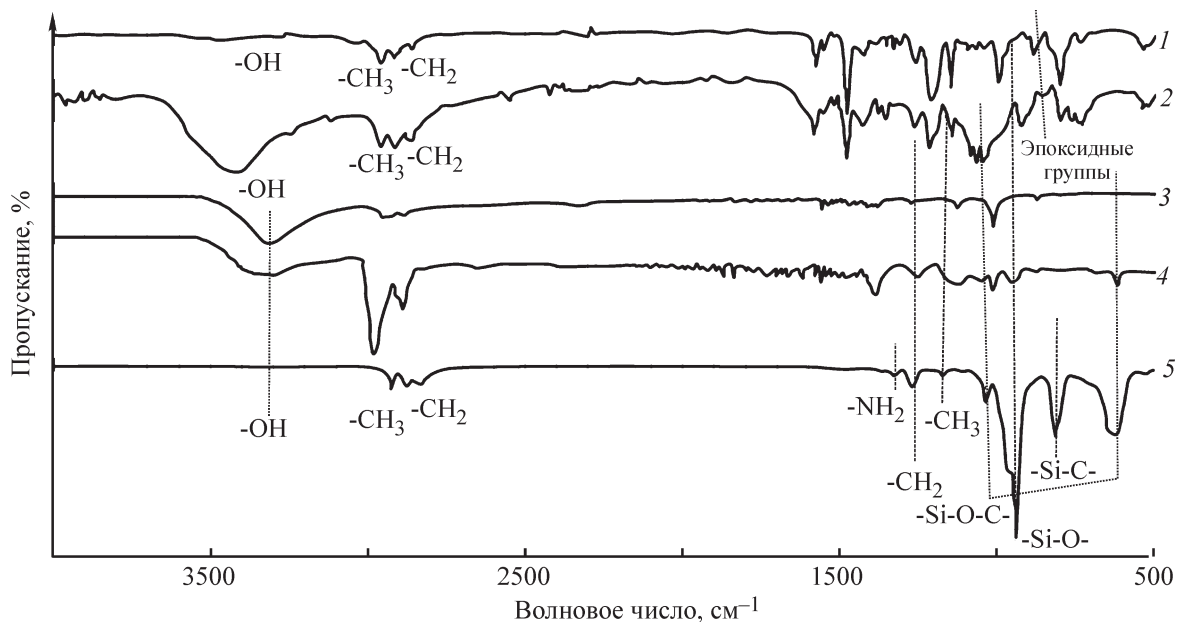


Рис. 4. ИК-Фурье-спектроскопия.

1 — ЭД-20; 2 — ЭД-20 +  $\gamma$ -аминопропилтриэтоксисилан; 3 — многослойные углеродные нанотрубки; 4 — многослойные углеродные нанотрубки, обработанные  $\gamma$ -аминопропилтриэтоксисиланом; 5 —  $\gamma$ -аминопропилтриэтоксисилан.

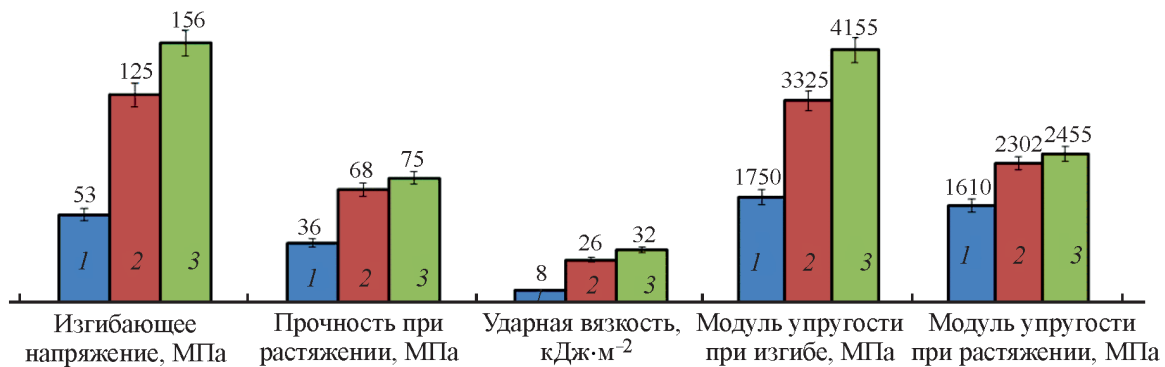


Рис. 5. Физико-механические характеристики эпоксидных композитов.

1 — ЭД-20 (100 мас. ч.) + трихлорэтилфосфат (40 мас. ч.) + полиэтиленполиамин (15 мас. ч.); 2 — ЭД-20 (100 мас. ч.) + трихлорэтилфосфат (40 мас. ч.) + многослойные углеродные нанотрубки (0.1 мас. ч.) + полиэтиленполиамин (15 мас. ч.); 3 — ЭД-20 (100 мас. ч.) + трихлорэтилфосфат (40 мас. ч.) + многослойные углеродные нанотрубки, обработанные  $\gamma$ -аминопропилтриэтоксисиланом (0.1 мас. ч.) + полиэтиленполиамин (15 мас. ч.).

максимальной температуры отверждения со 132 до 172°C (табл. 2) в сравнении с процессом отверждения композиции, в состав которой входят немодифицированные многослойные углеродные нанотрубки, что подтверждает участие функциональных групп  $\gamma$ -аминопропилтриэтоксисилана в процессе отверждения.

Введение в эпоксидный композит от 0.05 до 0.5 мас. ч. многослойных углеродных нанотрубок различной природы приводит к увеличению коэффициента температуропроводности на 20–42% и коэффициента теплопроводности на 73–87% (табл. 3). Эпоксидные композиты, содержащие многослойные углеродные нанотрубки, обработанные  $\gamma$ -аминопропилтриэтоксисиланом, характеризуются лучшей термической стабильностью в интервале температур 100–800°C по сравнению с композитами, наполненными немодифицированными нанотрубками (табл. 4). Введение многослойных углеродных нанотрубок в эпоксидный композит приводит к повышению теплостойкости по Вика со 100 до 142–160°C и огнестойкости, что проявляется в снижении потери

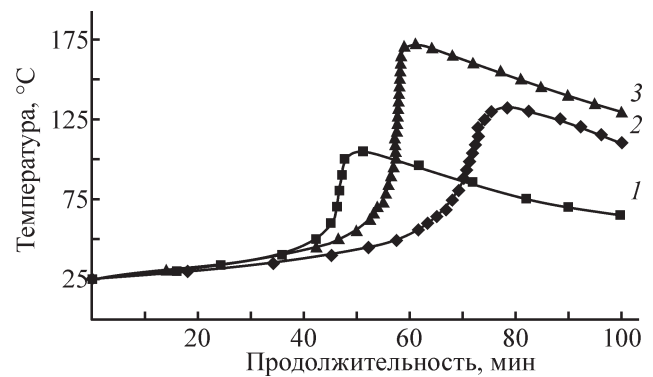


Рис. 6. Кинетические кривые процесса отверждения различных составов.

1 — ЭД-20 (100 мас. ч.) + трихлорэтилфосфат (40 мас. ч.) + полиэтиленполиамин (15 мас. ч.); 2 — ЭД-20 (100 мас. ч.) + трихлорэтилфосфат (40 мас. ч.) + многослойные углеродные нанотрубки (0.1 мас. ч.) + полиэтиленполиамин (15 мас. ч.); 3 — ЭД-20 (100 мас. ч.) + трихлорэтилфосфат (40 мас. ч.) + многослойные углеродные нанотрубки, обработанные  $\gamma$ -аминопропилтриэтоксисиланом (0.1 мас. ч.) + полиэтиленполиамин (15 мас. ч.).

Таблица 2

Показатели отверждения эпоксидных композиций

Состав композиции (мас. ч.), отвержденной полиэтиленполиамином (15 мас. ч.)	Продолжительность гелеобразования, мин	Продолжительность отверждения, мин	Максимальная температура саморазогрева образца при отверждении, °C
ЭД-20 (100) + трихлорэтилфосфат (40)	45	53	105
ЭД-20 (100) + трихлорэтилфосфат (40) + многослойные углеродные нанотрубки (0.1)	65	78	132
ЭД-20 (100) + трихлорэтилфосфат (40) + многослойные углеродные нанотрубки, обработанные АГМ-9 (0.1)	52	61	172

Таблица 3

Температуропроводность и теплопроводность эпоксидных композитов, наполненных многослойными углеродными нанотрубками

Состав композиции (мас. ч.), отвержденной полиэтиленполиамином (15 мас. ч.)	Коэффициент теплопроводности, Вт·м <sup>-1</sup> ·К <sup>-1</sup>	Коэффициент температуропроводности, 10 <sup>-8</sup> м <sup>2</sup> ·с <sup>-1</sup>
ЭД-20 (100) + трихлорэтилфосфат (40)	0.123 ± 0.004	7.61 ± 0.26
ЭД-20 (100) + трихлорэтилфосфат (40) + многослойные углеродные нанотрубки (0.05)	0.213 ± 0.006	9.14 ± 0.28
ЭД-20 (100) + трихлорэтилфосфат (40) + многослойные углеродные нанотрубки (0.1)	0.215 ± 0.007	9.45 ± 0.28
ЭД-20 (100) + трихлорэтилфосфат (40) + многослойные углеродные нанотрубки (0.5)	0.218 ± 0.007	10.15 ± 0.30
ЭД-20 (100) + трихлорэтилфосфат (40) + многослойные углеродные нанотрубки, обработанные АГМ-9 (0.05)	0.221 ± 0.007	9.22 ± 0.28
ЭД-20 (100) + трихлорэтилфосфат (40) + многослойные углеродные нанотрубки, обработанные АГМ-9 (0.1)	0.224 ± 0.007	9.95 ± 0.29
ЭД-20 (100) + трихлорэтилфосфат (40) + многослойные углеродные нанотрубки, обработанные АГМ-9 (0.5)	0.230 ± 0.008	10.81 ± 0.32

Таблица 4

Данные термогравиметрического анализа эпоксидных композитов

Состав композиции (мас. ч.), отвержденной полиэтиленполиамином (15 мас. ч.)	Потеря массы, %, при температуре термоллиза, °С									
	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
ЭД-20 (100) + трихлорэтилфосфат (40)	1.1	10.1	36.7	52.2	65.6	79.6	92.2	97.2	97.4	97.7
ЭД-20 (100) + трихлорэтилфосфат (40) + многослойные углеродные нанотрубки (0.1)	0	8.0	35.1	50.3	63.7	77.7	90.4	95.3	95.5	95.8
ЭД-20 (100) + трихлорэтилфосфат (40) + многослойные углеродные нанотрубки, обработанные АГМ-9 (0.1)	0	2.1	26.3	47.0	59.1	73.4	86.7	93.1	93.4	93.6

массы при поджигании на воздухе с 8.7 до 3.6–4.8% и повышению показателя воспламеняемости — кислородного индекса с 27 до 31–36 об%. Эпоксидные композиты, модифицированные многослойными углеродными нанотрубками, не поддерживают горение на воздухе и относятся к классу огнестойких материалов.

### Выводы

Доказана возможность направленного регулирования эксплуатационных свойств эпоксидных композитов с использованием малых добавок многослойных углеродных нанотрубок. Модификация углеродных

нанотрубок путем взаимодействия с  $\gamma$ -аминопропилтриэтоксисиланом приводит к изменению их структуры и фракционного состава, что обеспечивает их равномерное диспергирование в эпоксидной композиции. Введение в эпоксидную композицию модифицированных многослойных углеродных нанотрубок оказывает влияние на процессы структурообразования при отверждении эпоксидного композита, инициируя процесс отверждения, при этом сокращается продолжительность процесса гелеобразования и отверждения. Кроме того, приводит к упрочнению эпоксидного композита, а также к увеличению коэффициентов температуропроводности и теплопроводности, повышает теплостойкость по Вика и



огнестойкость эпоксидного композита в сравнении с композицией, содержащей немодифицированные многослойные углеродные нанотрубки, что подтверждает участие функциональных групп  $\gamma$ -аминопропилтриэтоксисилана в процессе отверждения и формирование прочных ковалентных связей на границе полимерная матрица/наполнитель.

### Финансирование работы

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 19-73-10133).

### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

### Информация о вкладе авторов

А. С. Мостовой разработал составы эпоксидных композитов, модифицированных многослойными углеродными нанотрубками, и определил их механические характеристики; А. В. Яковлев и В. Н. Целуйкин провели обработку многослойных углеродных нанотрубок  $\gamma$ -аминопропилтриэтоксисиланом и исследовали их свойства; А. А. Стрилец провела исследование теплостойкости, термостойкости и огнестойкости эпоксидных композитов.

### Информация об авторах

*Мостовой Антон Станиславович*, к.т.н., доцент кафедры «Естественные и математические науки», заведующий лабораторией «Современные методы исследования функциональных материалов и систем», Энгельсский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВО «Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю. А.», ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2828-9988>

*Яковлев Андрей Васильевич*, д.т.н., доцент, профессор кафедры «Химия и химическая технология материалов» ФГБОУ ВО «Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю. А.», ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3542-1927>

*Целуйкин Виталий Николаевич*, д.т.н., доцент, профессор кафедры «Технология и оборудование химических, нефтегазовых и пищевых производств», Энгельсский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВО «Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю. А.», ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6302-0728>

*Стрилец Анастасия Александровна*, к.т.н., старший преподаватель кафедры «Технология и оборудование химических, нефтегазовых и пищевых производств», Энгельсский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВО «Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю. А.», ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6431-6448>

### Список литературы

- [1] *Kosarli M., Polymerou A., Foteinidis G., Vazouras C., Paipetis A. S.* Healing efficiency of CNTs-modified-UF microcapsules that provide higher electrical conductivity and EMI shielding properties // *Polymers*. 2021. V. 13. ID 2753. <https://doi.org/10.3390/polym13162753>
- [2] *Bao X., Wu F., Wang J.* Thermal degradation behavior of epoxy resin containing modified carbon nanotubes // *Polymers*. 2021. V. 13. ID 3332. <https://doi.org/10.3390/polym13193332>
- [3] *Irshidat M. R., Al-Saleh M. H., Almashagbeh H.* Effect of carbon nanotubes on strengthening of RC beams retrofitted with carbon fiber/epoxy composites // *Mater. Des.* 2016. V. 89. P. 225–234. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.09.166>
- [4] *Zhu J., Kim J., Peng H., Margrave J. L., Khabashesku V. N., Barrera E. V.* Improving the dispersion and integration of single-walled carbon nanotubes in epoxy composites through functionalization // *Nano Lett.* 2003. N 3. P. 1107–1113. <https://doi.org/10.1021/nl0342489>
- [5] *Lavorgna M., Romeo V., Martone A., Zarrelli M., Giordano M., Buonocore G. G., Qu M. Z., Fei G. X., Xia H. S.* Silanization and silica enrichment of multiwalled carbon nanotubes: Synergistic effects on the thermal-mechanical properties of epoxy nanocomposites // *Eur. Polym. J.* 2013. V. 49. P. 428–438. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2012.10.003>
- [6] *Shen J. F., Huang W. S., Wu L. P., Hu Y. Z., Ye M. X.* The reinforcement role of different amino-functionalized multi-walled carbon nanotubes in epoxy nanocomposites // *Compos. Sci. Technol.* 2007. V. 67. P. 3041–3050. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2007.04.025>
- [7] *Shen J. F., Huang W. S., Wu L. P., Hu Y. Z., Ye M. X.* Study on amino-functionalized multiwalled carbon nanotubes // *Mater. Sci. Eng. A.* 2007. V. 464. P. 151–156. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2007.02.091>
- [8] *Choi W. J., Powell R. L., Kim D. S.* Curing behavior and properties of epoxy nanocomposites with amine functionalized multiwall carbon nanotubes // *Polym. Compos.* 2009. V. 30. P. 415–421. <https://doi.org/10.1002/pc.20571>
- [9] *Saeb M. R., Najafi F., Bakhshandeh E., Khonakdar H. A., Mostafaiyan M., Simon F., Scheffler C., Mäder E.* Highly curable epoxy/MWCNTs nanocomposites:



- An effective approach to functionalization of carbon nanotubes // *Chem. Eng. J.* 2015. V. 259. P. 117–125. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2014.07.116>
- [10] *Wu J., Guo J., Zhang Q., Gao L., Li H., Deng H., Jiang W., Sui G., Yang X.* Effect of different amino functionalized carbon nanotubes on curing behavior and mechanical properties of carbon fiber/epoxy composites // *Polym. Compos.* 2018. V. 39. P. E733–E744. <https://doi.org/10.1002/pc.24142>
- [11] *Ломакин С. М., Заиков Г. Е., Микитаев А. К., Кочнев А. М., Стоянов О. В., Шкодич В. Ф., Наумов С. В.* Замедлители горения для полимеров // *Вестн. Казан. технол. ун-та.* 2012. № 7. С. 71–86.
- [12] *Мостовой А. С., Нуртазина А. С., Кадыкова Ю. А., Бекешев А. З.* Высокоэффективные пластификаторы-антипирены для эпоксидных полимеров // *Перспектив. материалы.* 2019. № 2. С. 36–43. <https://doi.org/10.30791/1028-978X-2019-2-36-43>
- [13] *Mostovoi A. S., Plakunova E. V., Panova L. G.* New epoxy composites based on potassium polytitanates // *Int. Polym. Sci. Technol.* 2013. V. 40. N 7. P. 49–51. <https://doi.org/10.1177/0307174X1304000711>
- [14] *Bekeshev A., Mostovoy A., Tastanova L., Kadykova Y., Kalganova S., Lopukhova M.* Reinforcement of epoxy composites with application of finely-ground ochre and electrophysical method of the composition modification // *Polymers.* 2020. V. 12. ID 1437. <https://doi.org/10.3390/polym12071437>
-