

## Влияние гибридного наполнителя МУНТ/ВОГ на электропроводность и положительный температурный коэффициент сопротивления эластомерного нанокompозита

### Effect of modified carbon nanotubes/reduced graphene oxide hybrid filler on electrical conductivity and positive temperature coefficient of resistance of elastomeric nanocomposite

АЛЕКСАНДР В. ЩЕГОЛЬКОВ<sup>1</sup>, АЛЕКСЕЙ В. ЩЕГОЛЬКОВ<sup>2</sup>, А.А. ПИРОГОВА<sup>1</sup>, П.Н. НИКУЛИН<sup>1</sup>

ALEXANDER V. SHCHEGOLKOV<sup>1</sup>, ALEXEY V. SHCHEGOLKOV<sup>2</sup>,

A.A. PIROGOVA<sup>1</sup>, P.N. NIKULIN<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия

<sup>2</sup> Центр проектной деятельности, Московский политехнический университет, Москва, Россия

<sup>1</sup> Tambov State Technical University, Tambov, Russia

<sup>2</sup> Center of Project Activity, Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia

energynano@yandex.ru

Исследовано влияние гибридного наполнителя МУНТ/ВОГ, синтезированного методом лазерной абляции ферроцен-графитовой мишени и оксида графена, на свойства эластомерного композита на основе силикона «Силагерм 8030». Методами Рамановской спектроскопии ( $I_D/I_G = 1,18-1,19$ ) и электронной микроскопии установлено, что наполнитель представляет собой переплетающиеся нитевидные структуры диаметром 30–100 нм. Показано, что введение 1–4 масс.% гибрида МУНТ/ВОГ приводит к синергическому улучшению функциональных характеристик: время выхода на стационарный тепловой режим сократилось на 26% (со 142 до 105 с), а равновесная температура возросла на 8,3°C (от 32,2°C до 40,5°C). Установлено, что наблюдаемый эффект обусловлен формированием развитой проводящей сети в полимерной матрице, где одномерные МУНТ создают протяжённые пути, а двумерные чешуйки ВОГ выступают в роли токопроводящих «мостиков». Результаты работы открывают перспективы для создания энергоэффективных саморегулирующихся систем с улучшенными эксплуатационными характеристиками.

**Ключевые слова:** композит, углеродные нанотрубки, гибридный наполнитель, лазерная абляция, электропроводность, теплопроводность, саморегулирование температуры

The effect of a hybrid filler, modified carbon nanotubes/reduced graphene oxide (MCNT/rGO), synthesized by laser ablation of a ferrocene-graphite target and graphene oxide on the properties of an elastomeric composite based on Silagerm 8030 silicone has been studied. Using Raman spectroscopy ( $I_D/I_G = 1.18-1.19$ ) and electron microscopy, it was found that the filler consists of intertwined filamentous structures with a diameter of 30–100 nm. It is shown that the introduction of 1–4 wt.% of the MCNT/rOG hybrid leads to a synergistic improvement in functional characteristics: the time to reach a steady-state thermal regime decreased by 26% (from 142 to 105 s), and the equilibrium temperature increased by 8,3°C (from 32.2°C to 40.5°C). It has been established that the observed effect is due to the formation of a developed conductive network in a polymer matrix, where one-dimensional MCNT create long paths, and two-dimensional flakes of rOG act as conductive "bridges". The results of the work open up prospects for creating energy-efficient self-regulating systems with improved operational characteristics.

**Keywords:** composite, carbon nanotubes, hybrid filler, laser ablation, electrical conductivity, thermal conductivity, temperature self-regulation

DOI: 10.35164/0554-2901-2026-01-29-33

#### Введение

Современное материаловедение характеризуется активным использованием проводящих полимерных композитов [1, 2]. В качестве электропроводящих наполнителей применяют дисперсные металлы [3] или углеродные материалы, среди которых наиболее перспективными являются углеродные нанотрубки (УНТ) [4, 5] и графен [6]. Благодаря своим свойствам эти нанокompозиты находят широкое применение в электронике, промышленных системах [7] и других областях [8, 9]. Особенно следует отметить такие направления, как: экранирование электромагнитных излучений [10], создание материалов для суперконденсаторов [11], изготовление электрических нагревателей с положительным температурным коэффициентом сопротивления [12], разработку датчиков с адаптируемыми функциональными характеристиками для решения различных технологических задач [13–15].

Потребность в свойствах наполнителей, адаптированных к практическим задачам, стимулировала развитие различных методов синтеза УНТ и графена. Для синтеза одностенных УНТ (ОУНТ)

эффективны методы химического осаждения из паровой фазы с каталитически активной нитью (HFCVD), использующие пары спиртов в качестве источника углерода [16], а также лазерная абляция мишеней из графита с каталитическими добавками (Ni, Co) [17].

Важнейшей задачей является целенаправленная модификация свойств наноматериалов. Например, лазерная абляция в режиме глубокого удаления материала позволяет создавать дефекты и функционализировать поверхность УНТ [18], что наряду с химической функционализацией [19] значительно расширяет спектр их применения [20]. Высокой эффективностью в качестве модификаторов полимеров также обладает графен [21, 22].

Особый интерес представляют стратегии создания гибридных углеродных наполнителей, сочетающих функционализированные графеновые материалы (например, восстановленный оксид графена (ВОГ)) и модифицированные УНТ (МУНТ).

В качестве примера применения технологии гибридных наполнителей можно привести эпоксидный композит с трехмерной архитектурой, сформированной восстановленным оксидом графена

(вОГ) и УНТ, модифицированными медью (Cu-УНТ) [23]. Медное покрытие снизило контактное сопротивление между компонентами, что позволило достичь низкого порога перколяции и значительного улучшения комплекса свойств: электропроводности, механической прочности, ударной вязкости и теплопроводности.

Таким образом, использование гибридных наполнителей [24] позволяет значительно повысить электропроводность полимерных композитов по сравнению с системами, содержащими только один тип наполнителя. Резкое снижение электрического сопротивления при достижении порога перколяции связывают с синергическим эффектом и образованием взаимодополняющей проводящей сети из УНТ и графеновых плоскостей [25].

Целью работы является исследование влияния гибридного наполнителя МУНТ/вОГ на электро- и теплофизические свойства композитов на основе кремнийорганического эластомера и установление корреляции между структурой наполнителя и функциональными характеристиками материала.

Для достижения цели были поставлены и решены следующие задачи:

1. Синтез гибридного нанокompозита МУНТ/вОГ методом лазерной абляции.
2. Комплексный анализ синтезированного наполнителя, включающий исследование его морфологии и характеристик методом комбинационного рассеяния (КР-спектроскопии).
3. Получение композита на основе кремнийорганического эластомера «Силагерм 8030», модифицированного гибридным наполнителем МУНТ/ вОГ, и анализ его электро- и теплофизических свойств.

#### Материалы и методы

Синтез МУНТ/вОГ (восстановленный оксид графена) проводили методом лазерной абляции на установке, оснащённой импульсным Nd:YAG-лазером с использованием ферроцена, графита и оксида графена в соотношении 1:5:5. Лазер запитывали от регулируемого источника питания мощностью до 1 кВт. Длительность процесса синтеза контролировали таймером, который позволял задавать время экспозиции до пяти минут с дискретностью 0,1 с.

#### Методика получения образца эластомерного композита с МУНТ

Матрицей композита служил двухкомпонентный кремнийорганический компаунд Силагерм 8030 (ООО «ПО «Технология-Пласт», Россия), характеристики которого представлены в табл. 1. Выбор данного материала обусловлен его преимуществами перед аналогами (Силагерм 8020 и Силагерм 8040), ранее отмеченными в работе [26]. Кроме того, данная матрица представляет интерес для целенаправленного улучшения таких электрофизических свойств, как электропроводность, теплопроводность и характеристики положительного температурного коэффициента электрического сопротивления (ПТКС).

**Таблица 1. Характеристика кремнийорганического двухкомпонентного компаунда Силагерм 8030.**

| № | Показатель  | Значение параметра |
|---|---|--------------------|
| 1 | Твердость по Шору (шкала А), ед.                  | 27–33              |
| 2 | Время жизни компаунда при 20°C, мин, не менее     | 30                 |
| 3 | Относительное удлинение при разрыве, %, не менее  | 250                |
| 4 | Соотношение компонентов (компонент А/компонент Б) | 1:1                |
| 5 | Вязкость компонента А при 20°C, СПз               | 8000–15000         |
| 6 | Вязкость компонента Б при 20°C, СПз               | 7000–14000         |

Для получения композита компонент (А), содержащий сшивающий агент, и МУНТ/вОГ перемешивали при 300 об/мин в течение 5 мин на верхнеприводной мешалке 5drops-OSS-30 (Китай) при температуре 22°C. В полученную смесь добавляли второй компонент (Б), содержащий платиновый катализатор, инициирующий полимеризацию Силагерм 8030, в такой же концентрации, как и компонент А [26]. Затем формовали композитные образцы (размером 50×50 мм) с алюминиевыми электродами (фольга А5М, 50 мкм) на гидравлическом прессе П6330 (Оренбургский завод «Гидропресс») с усилием прессования 1000 кН. Перед прессованием образцы вакуумировали в течение часа для удаления воздуха.

**Таблица 2. Параметры отверждения кремнийорганических двухкомпонентных компаундов Силагерм 8030.**

| Параметр   | Значение параметра |
|--|--------------------|
| Температура отверждения компаунда, °C                | 80                 |
| Время полного отверждения слоя, толщиной 2–3 мм, час | 0,6                |
| Время полного отверждения слоя, толщиной 5–7 мм, час | 1,0                |
| Давление прессования, кг/см <sup>2</sup>             | 40                 |

*Исследование структурных характеристик и морфологии МУНТ методами Рамановской спектроскопии и электронной микроскопии*

Рамановская спектроскопия: спектры комбинационного рассеяния (КР) регистрировали на конфокальном микроспектрометре Spectra (NT-MDT SI, Нидерланды) с возбуждением излучением лазера ( $\lambda = 532$  нм, мощность  $\sim 50$  мВт) через объективы  $100\times$  ( $NA = 0,7$ ).

Структурные характеристики и морфологию МУНТ и МУНТ/вОГ исследовали методом ПЭМ на микроскопе Hitachi H-800 (Hitachi, Япония). Величина ускоряющего напряжения при проведении ПЭМ-исследований составляла 150 кВ, регистрацию проводили в режиме вторичных электронов. МУНТ/вОГ для получения образцов диспергировали в изопропанол (ООО «Синтез-Ацетон 2000», ГОСТ 9805-84). Для деагломерации и получения устойчивой суспензии проводили её ультразвуковую обработку в течение 1–3 минут. Для повышения стабильности дисперсии вводили поверхностно-активное вещество – додецилсульфат натрия, последующее удаление которого осуществляли путем многократного центрифугирования и промывки. Полученную суспензию наносили капельным методом (объем капли 5–10 мкл) на подготовленную подложку (столлик для СЭМ) с последующей сушкой на воздухе при комнатной температуре. Удельную поверхность синтезированных наноструктур определяли методом БЭТ на анализаторе Quantachrome Nova 1200e (США, Quantachrome Nova). МУНТ и МУНТ/вОГ очищали путём нагрева в условиях вакуума. После очистки в ячейку с МУНТ и МУНТ/вОГ добавляли небольшое количество газа-адсорбата, молекулы которого конденсируются на поверхности образца, образуя монослой.

Методика измерения насыпной плотности МУНТ и МУНТ/вОГ заключается во взвешивании определённого объёма МУНТ и МУНТ/вОГ и расчёте насыпной плотности. Метод измерения насыпной плотности МУНТ и МУНТ/вОГ регламентирован ГОСТ 34684-2020.

#### Методика исследования электро- и теплопроводности и температурного режима саморегулирования

Электро- и теплофизические свойства композитов исследовали в диапазоне концентраций МУНТ/вОГ от 1 масс.% до 4 масс.%. Коэффициент теплопроводности ( $\lambda$ ) измеряли на анализаторе ИИС НК ТФМ (ТГТУ, Россия)

Основные методы, повышающие точность измерений, представлены в рекомендациях РМГ 64–2003 и ISO 22007-2:2015. Для измерения теплопроводности были подготовлены образцы композитов толщиной 5 мм, шириной 80 мм и длиной 80 мм. Геометрические параметры образцов композитов подобраны под параметры измерительного зонда ИИС НК ТФМ. Для измерения электрического сопротивления ( $R$ ) использовали мультиметр UT71E (UNI-T, Китай). Измерения проводили в соответствии с ГОСТ 20214–74 с термопарой хромель–копель для измерения температурного режима электронагрева с саморегулированием. Нагрев образцов осуществляли от стабилизированного источника питания АКТАКОМ APS-7306 (ООО «АКТАКОМ», Россия) с выходной мощностью до 150 Вт в диапазоне напряжений от 10 мВ до 30 В.

#### Результаты и их обсуждение

Для лучшего понимания формирования проводящих сетей в полимерных матрицах необходимо было изучить структурные и морфологические свойства МУНТ/вОГ.

СЭМ-изображения образцов МУНТ/вОГ, синтезированного методом лазерной абляции, МУНТ и восстановленного оксида графена (вОГ) показаны на рис. 1 (а–г).

Результаты анализа насыпной плотности и удельной поверхности МУНТ/ вОГ, вОГ и МУНТ представлены в табл. 3.

Таблица 3. Насыпная плотность и удельная поверхность МУНТ/вОГ, вОГ и МУНТ.

| Образец  | Насыпная плотность, $\rho$ , г/см <sup>3</sup> | Удельная поверхность, $S_{уд}$ , м <sup>2</sup> /г |
|----------|--|--|
| МУНТ/вОГ | 0,4  | 328  |
| вОГ      | 1,873  | 498  |
| МУНТ     | 0,1  | 242  |

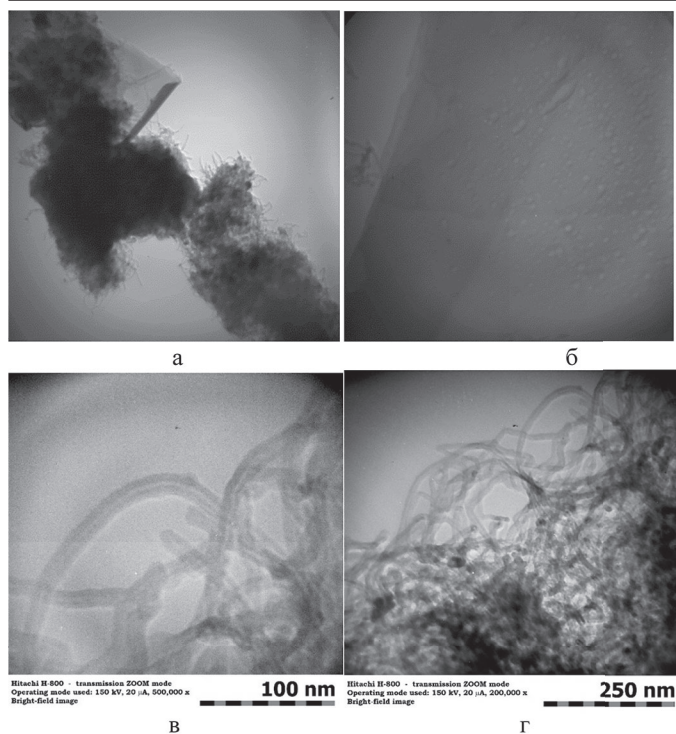


Рис. 1. СЭМ-изображения: а – МУНТ/вОГ; б – вОГ; в – МУНТ (масштаб 100 нм); г – МУНТ (масштаб 250 нм).

Насыпная плотность и удельная поверхность МУНТ/вОГ оказывают существенное влияние на взаимодействие и распределение МУНТ/вОГ в полимерной матрице, и оптимальным вариантом является МУНТ/вОГ, так для него характерна высокая удельная поверхность 328 м<sup>2</sup>/г при насыпной плотности 0,4 г/см<sup>3</sup>, обеспечивающей лучшее взаимодействие с полимерной матрицей.

Структурные параметры гибридного наполнителя МУНТ/вОГ, в частности, соотношение  $I_D/I_G$ , анализировали по спектрам комбинационного рассеяния (КР). Спектры содержали характеристические полосы D (около 1350 см<sup>-1</sup>) и G (около 1580 см<sup>-1</sup>), соответствующие колебаниям атомов углерода в sp<sup>3</sup>- и sp<sup>2</sup>-гибридизированных состояниях, соответственно. Анализ этих полос позволил оценить изменения в структуре графеновых слоёв, индуцированные лазерным излучением.

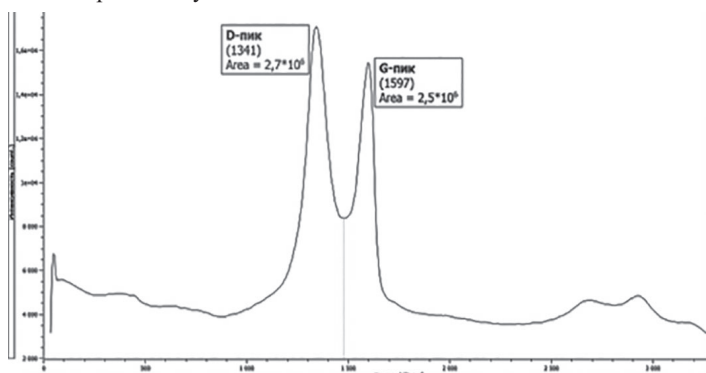


Рис. 2. Спектр комбинационного рассеяния образца исходного ОГ.

На рис. 3 показан КР спектр восстановленного оксида графена. Положение характеристических полос D и G в спектрах КР для исходного оксида графена (ГО) наблюдается при 1341 и 1597 см<sup>-1</sup>, соответственно, тогда как для восстановленного оксида графена (вОГ) наблюдался сдвиг до 1351 и 1598 см<sup>-1</sup> (рис. 2 и 3). Степень структурной неупорядоченности, определяемая как отношение интенсивностей D- и G-мод ( $I_D/I_G$ ), составила 1,19 для ОГ и 1,18 для

вОГ. G-полоса (в области 1597–1598 см<sup>-1</sup>) связана с колебаниями атомов углерода в sp<sup>2</sup>-гибридизированных доменах (E<sub>2g</sub>-фононная мода).

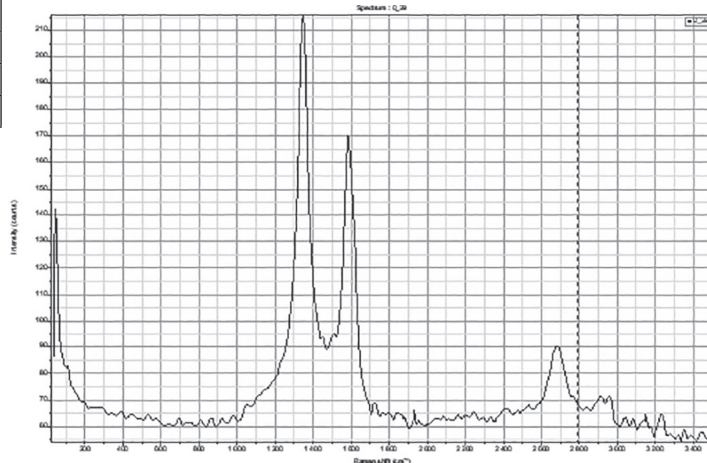


Рис. 3. Спектр комбинационного рассеяния образца вОГ.

Минимальный сдвиг полос (в пределах 1 см<sup>-1</sup>) между ОГ и вОГ указывает на сохранение основной графеновой структуры и незначительное изменение степени легирования или уровня напряжений в решетке. При этом D-полоса (область 1341–1351 см<sup>-1</sup>) активируется наличием дефектов и соответствует колебаниям ароматических колец (A<sub>1g</sub>-фононная мода). Сдвиг полос на 10 см<sup>-1</sup> для вОГ может свидетельствовать об увеличении степени упорядоченности дефектной структуры, а также об изменении типа или распределения дефектов при частичном восстановлении sp<sup>2</sup>-кластеров. Анализ соотношения  $I_D/I_G$  показывает, что высокие значения  $I_D/I_G > 1$  для обоих образцов подтверждают дефектность структуры и наличие многочисленных границ между нанокристаллическими доменами, а также преобладание аморфной фазы над кристаллической. Незначительное снижение  $I_D/I_G$  с 1,19 до 1,18 при восстановлении ОГ указывает на минимальное изменение средней степени неупорядоченности и возможную реорганизацию дефектов без существенного уменьшения их общего количества с сохранением нанокристаллической структуры с размерами доменов La порядка 4–5 нм (по модели Tuinstra-Koenig [27]).

На рис. 4 показана зависимость электропроводности композита на основе эластомера, наполненного МУНТ/вОГ, от температуры.

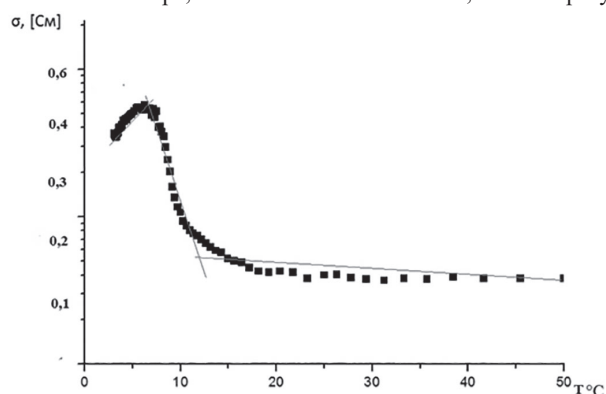


Рис. 4. Зависимость электропроводности композита на основе Силагерм 8030, наполненного МУНТ/вОГ (4 масс.%), от температуры.

В табл. 4 показано, как меняются электро- и теплофизические свойства композитов при изменении массовой концентрации МУНТ/вОГ в диапазоне от 1 масс.% до 4 масс.%.

Разработанный нанокомпозит демонстрирует рост электро- и теплопроводности при увеличении концентрации гибридного наполнителя МУНТ/вОГ от 1 масс.% до 4 масс.%, превосходя по данным показателям референсный аналог синергический с однотипным наполнителем и полимерной матрицей [28]. Улучшение свойств обусловлено эффектом, приводящим к формированию взаимодополняющей проводящей архитектуры наполнителя: одномерные МУНТ формируют протяжённые токопроводящие пути, а двумерные чешуйки вОГ выступают в роли «мостиков», соединяющих их в единую сеть.

**Таблица 4. Электро- и теплофизические свойства композитов при различной концентрации МУНТ/ВОГ.**

| Концентрация МУНТ/ВОГ в композите, масс. %              | 1                   | 2                   | 3                   | 4                    |
|---|---------------------|---------------------|---------------------|----------------------|
| Теплопроводность, $\lambda$ , [Вт/(м <sup>2</sup> ·°С)] | 0,15                | 0,28                | 0,31                | 0,36                 |
| Температуропроводность, $a$ , [м <sup>2</sup> /с]       | $1,2 \cdot 10^{-7}$ | $1,3 \cdot 10^{-7}$ | $1,5 \cdot 10^{-7}$ | $1,74 \cdot 10^{-7}$ |
| Электропроводность, $\sigma$ , [См]                     | 0,02                | 0,04                | 0,12                | 0,151                |

Подобная гибридная структура обеспечивает эффективный перенос заряда и тепла по параллельным каналам, а также характеризуется повышенной устойчивостью к механическим деформациям и термическим нагрузкам.

Полученные результаты демонстрируют потенциал для разработки энергоэффективных саморегулирующихся нагревательных систем с повышенной мощностью.

Как следует из данных табл. 4, повышение концентрации наполнителя МУНТ/ВОГ в композите с 1 масс.% до 4 масс.% приводит к сокращению времени выхода на стационарный тепловой режим со 142 до 105 с и повышению равновесной температуры с 32,2°С до 40,5°С. Этот эффект связан с формированием в полимерной матрице развитой проводящей сети.

Наблюдаемая динамика изменения показателей подтверждает выраженный эффект саморегулирования: при достижении температуры 40,5°С активируется механизм положительного температурного коэффициента сопротивления (ПТКС), что вызывает закономерное снижение силы тока с 0,91 до 0,32 А.

**Таблица 5. Влияние электрического напряжения на температуру нагрева и потребляемый ток саморегулирования (при начальной температуре 20°С) для полимерного композита с МУНТ/ВОГ.**

| Напряжение, В | Пусковой ток, А | Ток при температуре, 20°С | Температура саморегулирования, °С | Время саморегулирования температуры, с |
|---------------|-----------------|---------------------------|-----------------------------------|--|
| 6             | 0,25            | 0,098                     | 32,2                              | 142                                    |
| 8             | 0,35            | 0,15                      | 35,2                              | 130                                    |
| 10            | 0,75            | 0,27                      | 36,5                              | 125                                    |
| 12            | 0,81            | 0,29                      | 37,9                              | 117                                    |
| 14            | 0,88            | 0,31                      | 38,5                              | 111                                    |
| 16            | 0,91            | 0,32                      | 39,9                              | 110                                    |
| 18            | 0,98            | 0,34                      | 40,5                              | 105                                    |

Как видно из данных табл. 5, введение МУНТ/ВОГ в эластомерную матрицу приводит к интенсификации управляемого тепловыделения, что, в свою очередь, обуславливает эффект саморегулирования температуры в композите.

#### Выводы

Гибридные структуры МУНТ/ВОГ, синтезированные методом лазерной абляции, представляют собой переплетающиеся нитевидные образования. Нанесение пиролитического углерода (ВОГ) увеличивает диаметр исходных частиц МУНТ с 20–40 нм до 30–100 нм. В работе раскрыты механизмы синергического улучшения свойств полимерных композитов с данным наполнителем: при росте его концентрации от 1 масс.% до 4 масс.% время выхода на стационарный тепловой режим сокращается со 142 до 105 с, а равновесная температура возрастает с 32,2°С до 40,5°С. Наблюдаемый эффект связан с формированием развитой проводящей сети в полимерной матрице.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-29-00855, <https://rscf.ru/project/24-29-00855/>.

#### Литература

- Shahab M., Rahim M., Mutahir S. et al. Carbon based nanocomposites powering the future of wearable and bioelectronics: A review // Journal of Alloys and Compounds. 2025. N1043. P. 184296. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2025.184296>
- Yim Y.-J., Yoon Y.-H., Kim S.-H. et al. Carbon Nanotube/Polymer composites for functional applications // Polymers. 2025. N17. P. 119. <https://doi.org/10.3390/polym17010119>

- Pargi M.N.F., Teh P. L., Hussienyash S., Yeoh C.K. and Ghani S.A., Recycled-copperfilled epoxy composites: the effect of mixed particle size // International Journal of Mechanical and Materials Engineering. 2015. V. 10, N3. P. 1–10. <https://doi.org/10.1186/s40712-015-0030-2>.
- Is'haq A. Mohammed, Mercy T. Bankole, Ambali S. Abdulkareem et al. Full factorial design approach to carbon nanotubes synthesis by CVD method in argon environment // South African Journal of Chemical Engineering. 2017. V. 24. P. 17–42. <https://doi.org/10.1016/sajce.2017.06.001>.
- Sari A.H., Khazali A., Parhizgar S.S. Synthesis and characterization of long-CNTs by electrical arc discharge in deionized water and NaCl solution. // Int Nano. 2018. Lett 8. P. 19–23. <https://doi.org/10.1007/s40089-018-0227-5>.
- Chae S.H. and Lee Y.H. Carbon nanotubes and graphene towards soft electronics // Nano Convergence. 2014. V. 1. P. 15. <https://doi.org/10.1186/s40580-014-0015-5>.
- Saleh M., Gul A., Nasir A., Moses T.O., Nural Y. and Yabalak E. Comprehensive review of Carbon-based nanostructures: Properties, synthesis, characterization, and cross-disciplinary applications // Journal of Industrial and Engineering Chemistry. 2024. V. 146, P. 176–212. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2024.11.052>.
- Soe H.M., Manaf A.A., Matsuda A., and Jaafar M. Performance of a silver nanoparticles-based polydimethylsiloxane composite strain sensor produced using different fabrication methods // Sensors and Actuators a Physical. 2021. V. 329. P. 112793. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2021.112793>
- Golovakhin V., Litvinova V.I., Manakhov A., Latypova A.R., Novgorodtseva O.N., Ukhina A.V., Ishchenko A.V., Al-Qasim A.S., Maksimovskiy E.A. and Bannov A.G. Conductive polymer-multi-walled carbon nanotube composites for gas sensors and supercapacitors // Materials Today Communications. 2024. V. 39. P. 109163. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2024.109163>.
- Luo, J., Wang, S., Kang, X., Peng, C., Yuan, Q., Liu, Z., Zhou, M. and Chen, J., Multilayer heterogeneous composite material based on multi-walled carbon nanotube with wide bandwidth microwave absorption // Materials Today Nano. 2025. V. 31. P. 100669. <https://doi.org/10.1016/j.mtnano.2025.100669>.
- Breen S., Jadhav V., Glynn C. and O'Dwyer C.. Porous carbon nanotube electrodes in 3D printed symmetric supercapacitors with stable electrochemical response // Electrochemistry Communications. 2025. V. 177. P. 107988. <https://doi.org/10.1016/j.elecom.2025.107988>.
- Lu, L., Guo, H., Wang, Y., Liu, K. X., Martin-Fabiani, I., Peijs, T., Bilotti, E., Zhang, H., and Liu, Y., Dual enhancement of Joule heating and positive temperature coefficient behaviour in biodegradable nanocomposites via hybrid carbon nanofiller networks // Composites Part a Applied Science and Manufacturing. 2025. V. 199. P. 109167. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2025.109167>.
- Camlibel N.O. and Kandola B.K. Highly sensitive textile pressure sensors with novel hierarchical architecture based on conductive polymers, silver nanoparticles and carbon nanotubes // Sensors and Actuators a Physical. 2024. V. 382. P. 116166. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2024.116166>.
- Zhang X., Xiang D., Wu Y., Harkin-Jones E., Shen J., Ye Y., Tan, W., Wang, J., Wang P., Zhao C. and Li Y. High-performance flexible strain sensors based on biaxially stretched conductive polymer composites with carbon nanotubes immobilized on reduced graphene oxide // Composites Part a Applied Science and Manufacturing. 2021. V. 151. P. 106665. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2021.106665>.
- Wang L., Zhang Z., Guo D. and Hu Z., Intrinsically flexible thickness sensor system made of coil-shaped carbon nanotube-filled polymer composite // Sensors and Actuators a Physical. 2025. V. 390, P. 116627. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2025.116627>.
- Okazaki T., Shinohara H.. Synthesis and characterization of single-wall carbon nanotubes by hot-filament assisted chemical vapor deposition // Chemical Physics Letters. 2003. V. 376. P. 606–611. [https://doi.org/10.1016/S0009-2614\(03\)01042-X](https://doi.org/10.1016/S0009-2614(03)01042-X).
- Yudasaka M. et al. Formation of Single-Wall carbon nanotubes: Comparison of CO2 laser ablation and ND: YAG laser ablation // The Journal of Physical Chemistry B. 1999. V. 103. P. 3576–3581. <https://doi.org/10.1021/jp983262k>.
- Das R., Shahnavaz Z., Ali M. E. et al. Can We Optimize Arc Discharge and Laser Ablation for Well-Controlled Carbon Nanotube Synthesis? // Nanoscale Res Lett. 2016. V. 510. P. 1–23. <https://doi.org/10.1186/s11671-016-1730-0>.

19. Wang B., Hu C., and Dai L., Functionalized carbon nanotubes and graphene-based materials for energy storage// *Chemical Communications*, 2016. V. 52. P. 14350–14360. <https://doi.org/10.1039/c6cc05581h>.
  20. Zhu, Z., An overview of carbon nanotubes and graphene for bio-sensing applications: *Nano-Micro Letters*. 2017. V. 9. P. 25. DOI: 10.1007/s40820-017-0128-6.
  21. Гудков М.В. и др. Полимерные композиты с графеном и его производными как функциональные материалы будущего // *Высокомолекулярные соединения. Сер. С*. 2022. №1. С. 45.
  22. Лавров И.В. и др. Концентрация напряженности температурного поля на поверхности включений графена в композите с полимерной матрицей // *Известия высших учебных заведений. Электроника*. 2025. Т. 30. №3. С. 259.
  23. Cho, B.-G., Joshi, S. R., Han, J. H., Kim, G.-H., and Park, Y.-B., Interphase strengthening of carbon fiber/polyamide 6 composites through mixture of sizing agent and reduced graphene oxide coating// *Composites Part a Applied Science and Manufacturing*. 2021. V. 149. P. 106521. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2021.106521>.
  24. Щегольков А.В., Щегольков А.В., Чумак М.А., Каминский В.В. Влияние гибридных структур УНТ/графит, полученных при СВЧ синтезе, на электро- и теплофизические свойства эластомерных композитов // *Каучук и резина*. 2024. Т. 83, №6. С.328–333. <https://doi.org/10.47664/0022-9466-2024-83-6-328-333>.
  25. Ge Z., Fu B., Zhao J., Li X., Ma B. and Chen Y., A review of the electrocatalysts on hydrogen evolution reaction with an emphasis on Fe, Co and Ni-based phosphides // *Journal of Materials Science*. 2020. V. 55. P. 14081–14104. DOI: 10.1007/s10853-020-05010-w.
  26. Щегольков А.В., Щегольков А.В., Чумак М.А., Каминский В.В. Полимерные нанокомпозиты с металлизированными углеродными нанотрубками: синтез, структура и свойства // *Пластические массы*. 2025. №1. С. 38–41. <https://doi.org/10.35164/0554-2901-2025-01-38-41>.
  27. Tuinstra F., Koenig J. L. Raman spectrum of graphite // *J. Chem. Phys.* 1970. Vol. 53, P. 1126-1130. DOI:10.1063/1.1674108.
  28. Щегольков А.В., Щегольков А.В., Синтез углеродных нанотрубок с помощью СВЧ: технология, свойства и структура// *Российский химический журнал*. 2021. V.65, №4. С. 56–60. <https://doi.org/10.6060/rcj.2021654.9>.
- 
-