

ИССЛЕДОВАНИЕ МОРФОЛОГИИ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК, ПОЛУЧЕННЫХ СВЧ-СИНТЕЗОМ, ДЛЯ КОМПОЗИТНОГО ЭЛЕКТРОНАГРЕВАТЕЛЯ С ЭФФЕКТОМ САМОРЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ

А.В. Щегольков, Н.В. Орлова, А.В. Щегольков, М.А. Чумак

Александр Викторович Щегольков (ORCID 0000-0002-4317-0689)*, Наталия Вячеславовна Орлова (0009-0001-8079-436X)

Тамбовский государственный технический университет, ул. Советская, 106, Тамбов, Российская Федерация, 392000

E-mail: energynano@yandex.ru*, vnvpri@mail.ru

Алексей Викторович Щегольков (ORCID 0000-0002-1838-3842)

Московский политехнический университет, ул. Большая Семеновская, 38, Москва, Российская Федерация, 107023

E-mail: alexxx5000@mail.ru,

Максим Александрович Чумак (ORCID 0000-0003-0071-7952)

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Политехническая ул., 26, Санкт-Петербург, Российская Федерация, 194021

E-mail: equilibrium2027@yandex.ru

В статье представлены исследования углеродных нанотрубок (УНТ), синтезированных СВЧ методом, которые предназначены для создания функциональных композитов - обладающих эффектом саморегулирования температуры. СВЧ технология позволяет синтезировать УНТ, которые отличаются по морфологическим характеристикам, а также наличием металлизации поверхности УНТ. Для синтеза УНТ использованы различные соотношения состава на основе графита и ферроцена. Полученные образцы УНТ охарактеризованы методами КР спектроскопии, СЭМ и рентгеноструктурного анализа. Показано, что в результате сочетаний ферроцена и графита в соотношении 3:1; 4:1; 5:1 и 6:1 формируется различная морфологическая структура УНТ, которая обладает высоким уровнем разнообразия и позволяет проводить эффективную модификацию эластичных матриц с приданием композиту электропроводящих свойств. Диаметр УНТ находится в диапазоне от 30 до 60 нм, и при этом на поверхности УНТ, полученных при синтезе с соотношением ферроцена к графиту 6:1, присутствуют частицы когенига Fe₃C. Металлизация поверхностного слоя УНТ существенным образом улучшает теплофизические характеристики (теплопроводность и температуропроводность) как самих УНТ, так и получаемых на их основе композитов, что влияет на их тепловыделения и позволяет работать с более высокими значениями температуры саморегулирования при том же значении питающего напряжения. Для синтеза характерна мощность СВЧ установки 700 Вт. СВЧ синтез является быстрым методом получения УНТ (время синтеза 10 с) и может быть использован для направленного синтеза УНТ, которые предназначены для модификации полимеров и создания проводящих композитов, которые могут быть основой электронагревателей с эффектом саморегулирования температуры.

Ключевые слова: композит, УНТ, электронагрев, саморегулирование температуры, СЭМ, СВЧ, синтез, электропроводность, теплопроводность

Для цитирования:

Щегольков А.В., Орлова Н.В., Щегольков А.В., Чумак М.А. Исследование морфологии углеродных нанотрубок, полученных СВЧ-синтезом, для композитного электронагревателя с эффектом саморегулирования температуры. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2025. Т. 68. Вып. 2. С. 70–78. DOI: 10.6060/ivkkt.20256802.7157.

For citation:

Shchegolkov A.V., Orlova N.V., Shchegolkov A.V., Chumak M.A. Study of morphology of carbon nanotubes produced by microwave synthesis for composite electric heater with temperature self-regulation effect. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2025. V. 68. N 2. P. 70–78. DOI: 10.6060/ivkkt.20256802.7157.

**STUDY OF MORPHOLOGY OF CARBON NANOTUBES PRODUCED
BY MICROWAVE SYNTHESIS FOR COMPOSITE ELECTRIC HEATER
WITH TEMPERATURE SELF-REGULATION EFFECT**

A.V. Shchegolkov, N.V. Orlova, A.V. Shchegolkov, M.A. Chumak

Alexander V. Shchegolkov (ORCID 0000-0002-4317-0689)*, Natalia V. Orlova (ORCID 0009-0001-8079-436X)

Tambov State Technical University, Sovetskaya st., 106, Tambov, 392000, Russia

E-mail: energynano@yandex.ru*, vnvpri@mail.ru

Aleksey V. Shchegolkov (ORCID 0000-0002-1838-3842)

Moscow Polytechnic University, Bolshaya Semyonovskaya st., 38, Moscow, 107023, Russia

E-mail: alexxx5000@mail.ru,

Maksim A. Chumak (ORCID 0000-0003-0071-7952)

A.F. Ioffe Institute of Physics and Technology, Russian Academy of Sciences, Politekhnicheskaya st., 26, St. Petersburg, 194021, Russia

E-mail: equilibrium2027@yandex.ru

The paper presents studies of carbon nanotubes (CNTs) synthesised by microwave method, which are intended for the creation of functional composites - possessing the effect of self-regulation of temperature. Microwave technology allows the synthesis of CNTs, which differ in morphological characteristics, as well as the presence of metallisation of the CNT surface. Different composition ratios based on graphite and ferrocene were used for CNT synthesis. The obtained CNT samples were characterised by CR spectroscopy, SEM and X-ray diffraction analysis. It is shown that combinations of ferrocene and graphite in the ratio of 3:1; 4:1; 5:1 and 6:1 result in the formation of different morphological structure of CNTs, which has a high level of diversity and allows to carry out effective modification of elastic matrices with giving the composite electrically conductive properties. The diameter of CNTs is in the range from 30 to 60 nm and there are Fe₃C cogenite particles on the surface of CNTs obtained by synthesis with the ratio of ferrocene to graphite 6:1. Metallisation of the CNT surface layer significantly improves the thermophysical characteristics (thermal conductivity and diffusivity) of both the CNTs themselves and the composites obtained on their basis, which affects their heat release and allows them to operate with higher values of the self-regulation temperature at the same value of the supply voltage. The synthesis is characterised by a microwave power of 700 W. Microwave synthesis is a fast method for obtaining CNTs (synthesis time 10 s) and can be used for directed synthesis of CNTs, which are intended for modification of polymers and creation of conductive composites, which can be the basis of electric heaters with the effect of temperature self-regulation.

Keywords: composite, CNTs, electric heating, temperature self-regulation, SEM, microwave, synthesis, electrical conductivity, thermal conductivity

ВВЕДЕНИЕ

Достижения в области нанотехнологий позволили сформулировать концепцию создания новых функциональных композитов на основе полимеров [1]. Функциональные композиты имеют важное значение в развитии энергоэффективных технологий и устройств портативной электроники

[2]. Получение функциональных полимерных композитов основано на использовании полимерных матриц с добавлением проводящих дисперсных наполнителей [3]. В свою очередь, добавки могут быть как микроразмерными, так и наноразмерными [4]. Наноразмерные наполнители имеют определенные преимущества по сравнению с микроразмерными, это связано в первую очередь со

структурными особенностями наноматериала и с возможностью формирования функциональных свойств при сохранении прочностных характеристик композита.

В качестве наноразмерных дисперсных добавок для полимерных композитов [5] наиболее часто используют углеродные материалы, такие как графен, углеродные нанотрубки [6], фуллерены [7], графеновые нанопластинки [8] и т.д. Применение углеродных наноматериалов, связано с их физико-механическими и химическими свойствами, которые наилучшим образом сочетаются с разными полимерными матрицами, например многослойные углеродные нанотрубки (МУНТ) обладают оптимальной удельной насыпной плотностью и площадью поверхности, а также электро-теплофизическими свойствами, подходящими для большого класса полимеров [9].

Углеродные наноматериалы характеризуются многообразием наноструктур, отличающимися по числу и форме графеновых слоев, расстоянию между слоями и морфологией внешнего слоя. УНТ могут быть короткими и сверхдлинными [10], а также обладать металлическими [11] или полупроводниковыми, а в ряде случаев сочетать металлические и полупроводниковые свойства. Диапазон электро- и теплофизических характеристик нанокompозитов, формируемых на основе УНТ, широк [12]. УНТ служат в качестве армирующего агента в технологиях производства резины [13], а также широко используются в качестве добавок при производстве теплопроводных материалов [14]. Структура УНТ, связанная с цилиндрическими и геометрическими параметрами в сочетании с их превосходной диспергируемостью и оптимальной удельной площадью поверхности, позволяет эффективно создавать как анизотропную, так и изотропную тепло и электропроводность в нанокompозитах.

Использование различных методов синтеза УНТ, сочетание их с другими углеродными материалами, модифицирование наночастицами оксидов переходных металлов приводит к изменению свойств наполнителя [15].

Для синтеза УНТ используют такие методы, как: химическое парофазное осаждение [16], электродуговой [17], лазерная абляция [18], а также СВЧ [19,20]. CVD-метод позволяет использовать различных катализаторов и температурных режимов [21], а также имеет разнообразное аппаратное оформление процесса синтеза. Метод лазерной абляции основан на применении мощных

лазеров, при действии которых в проточном реакторе возможен пиролиз смеси паров пентакарбонила железа и ацетилена, способствующий синтезу УНТ [22]. СВЧ-метод характеризуется минимальным временем синтеза УНТ [23]. Температура является одним из основных параметров синтеза УНТ. В случае СВЧ-метода, нагрев в реакционной зоне осуществляется с помощью электромагнитного излучения, тем самым обладает наибольшей эффективностью по сравнению с другими методами [24].

Последние достижения в области синтеза УНТ позволяют разрабатывать функциональные полимерные композиты с управляемыми электрофизическими свойствами и возможностью электронагрева при протекании электрического тока [25]. Протекание токов в структуре полимерного композита, вызывающих контролируемое и равномерное тепловыделение, возможно осуществить в результате создания равномерно распределенной проводящей фазы в объеме полимера [26]. При этом немаловажным аспектом является необходимость улучшения теплопроводности, так как в процессе нагрева требуется отведение большого объема тепла, которое в ряде случаев может привести к деструкции как проводящей фазы, так и самого полимера. Так как возможна деструкция полимерного композита при высоких температурах электронагрева, то оптимальным вариантом является использование проводящих композитов, обладающих положительным температурным коэффициентом сопротивления (ПТКС) [27, 28] (пирорезистивными свойствами [29]). ПТКС и сопутствующие пирорезистивные свойства приводят к эффекту саморегулирования температуры, что обеспечивает режим электронагрева при заданной температуре без применения дополнительных средств автоматического регулирования. Структурные и морфологические свойства, а также размер дисперсных наполнителей композитов с ПТКС существенным образом влияют на их электрофизические свойства и соответственно на процесс саморегулирования температуры [30, 31].

Целью работы является исследование морфологии полученных с помощью СВЧ излучения УНТ и электро- теплофизических свойств нанокompозитов на их основе.

В ходе работы проведен:

1. Синтез УНТ с помощью СВЧ излучения с различным массовым сочетанием смеси ферроцена с графита;
2. Исследование электро- и теплопроводности

сти эластомера, содержащего УНТ, синтезированных при разных сочетаниях смеси ферроцена с графита.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Получение полимерного композита

МУНТ были синтезированы методом СВЧ с использованием ферроцена ($C_{10}H_{10}Fe$) и графита. Синтез осуществлялся в микроволновой печи Galanz MOS-2009MW с мощностью излучателя 700 Вт (время синтеза 10 с) [32]. Ферроцен и графит дозировался из емкостей 1 и 2 в соотношении 3:1; 4:1; 5:1 и 6:1, а также подвергался смешиванию и механоактивации в аппарате вихревого слоя (АВС) 3 в течение 20 с.

Двухкомпонентный кремнийорганический компаунд «Силагерм 8030» использовался в качестве полимерной матрицы. Компоненты эластомера смешивались в соотношении 1:1 и перемешивали вместе с УНТ (4 мас.%) при температуре 22 °С (в течение 4 мин). Образцы для испытаний представляли собой пластины, покрытые алюминиевой фольгой, с размерами 5×5 см и толщиной 2 мм. Для испытания в условиях электронагрева использовалось постоянное напряжение (12 В) от источника постоянного тока (Актаком АНТ-1351, Россия).

Сканирующая электронная микроскопия

Для исследования УНТ использовали сканирующий электронный микроскоп (СЭМ) «Tescan Iyra 3» (Tescan, Чехия) при 5 кВ.

Рамановская спектроскопия

Для исследования КР спектров использовали спектрометр на базе конфокального микроскопа («Spectra», NT-MDT SI). Объектив 100× с $NA = 0,7$, полупроводниковый лазер ($\lambda = 532$ нм, мощность возбуждения около 50 МВт).

Рентгенодифракционные измерения

Рентгенодифракционные измерения проводились на порошковом дифрактометре D2 Phaser (Bruker AXS, Germany), оснащенном медной рентгеновской трубкой ($Cu K\alpha_1 = 0,154$ нм), напряжением и ток трубки 30 кВ и 10 мА, с никелевым β -фильтром; полупроводниковым линейным позиционно-чувствительным рентгеновским детектором LYNXEYE (Bruker AXS, Германия); вертикальным θ - θ -гонометром с фокусировкой по Брэггу–Брентано. Дифрактограмма образца регистрировалась в диапазоне углов 13–96 град. по шкале 2θ , шаг регистрации составлял 0,02 град., время накопления сигнала в точке – 0,5 с. Расшифровка дифракционных кривых основывалась на данных базы ICDD (Release 2014, PDF2).

Электро- и теплофизические параметры наномодифицированных композитов

Для измерения теплопроводности (λ) и температуропроводности (a) эластичного проводящего композита – использовали прибор ИИС НК ТФСМ (г. Тамбов). Электрическое сопротивление (R) определялось тераомметром E6-13A (Эстония) и мультиметром UT71E (UNI-T, Китай).

Измерение удельной поверхности синтезированных наноструктур

Для синтезированных наноструктур удельную поверхность определяли методом БЭТ на анализаторе QuantochromeNova 1200e.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Морфология синтезированных СВЧ методом четырех образцов УНТ представлена на рисунке (а-г) (СЭМ-изображения).

Анализ микроструктуры, позволяет сделать вывод о том, что все синтезированные УНТ имеют различные характеристики. СЭМ-изображения УНТ показывают, что в случае рисунка (в и г) УНТ агломерированы, однако для рисунка г характерно покрытие УНТ железом. Для рисунка а и б имеет место формирование УНТ с плотно упакованной компоновкой при которой имеются сочетания с графитом. Согласно рисунку, УНТ имеют диаметр в диапазоне от 30 до 60 нм.

При СВЧ воздействии на смесь ферроцена и графита микроволны формируют в материале локальные электрические диполи, что связано со структурными дефектами в частицах графита, такими как края частиц. СВЧ излучение также формирует электрические токи с последующим тепловыделением из-за высокодиффузионного переноса электронов внутри небольших дефектных частиц графита, которые имеют пониженный электрический контакт.

Следует отметить, что для синтеза УНТ использована меньшая мощность (700 Вт), чем в работах [33-35], где мощность варьировалась от 800 до 1800 Вт, что связано с предварительной механоактивацией смеси ферроцена и графита, которая повышает химическую активность.

Проведенные рентгеновские исследования синтезированных СВЧ методом УНТ подтверждают, что поверхность УНТ покрыта пленкой из когенита Fe_3C , имеющего пространственную группу $R\bar{3}m$ (62) с параметрами $a = 5,091$ Å, $b = 6,743$ Å, $c = 4,526$ Å. СЭМ-изображения УНТ в и г агломерированы, однако для г характерно покрытие железом.

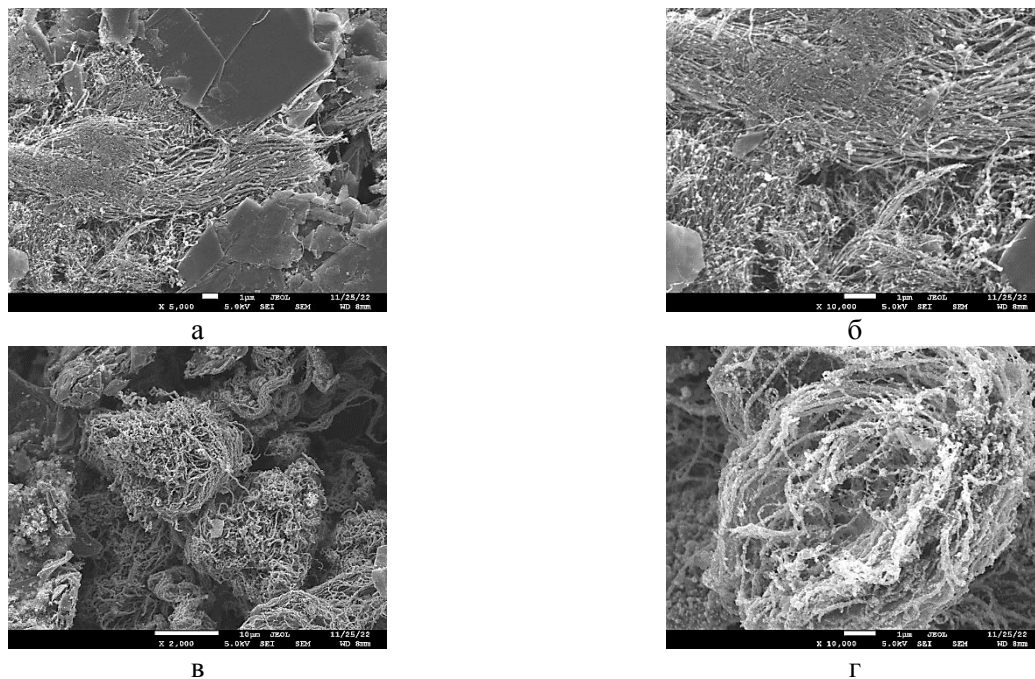


Рис. СЭМ-изображения УНТ (а) 3:1 (×10000); (б) 4:1 (×5000); (в) 5:1 (×10000); (г) 6:1 (×2000)
 Fig. SEM images of CNTs (a) 3:1 (×10000); (б) 4:1 (×5000); (в) 5:1 (×10000); (г) 6:1 (×2000)

В объеме УНТ, синтезированных СВЧ методом, содержится большее количество тонких нанотрубок. В табл. 1 приведена оценка степени дефектности УНТ согласно КР спектрам и значения удельных поверхностей УНТ.

Таблица 1
Оценка степени дефектности УНТ по спектрам КР и значение удельной поверхности
Table 1. Estimation of CNT defectivity degree by Raman spectra and value of specific surface area

Образец	Соотношение ферроцена и графита	Значение соотношения I_D/I_G для УНТ	$S_{уд}$, $M^2/Г$
1	3:1	1,2	122
2	4:1	1,54	154
3	5:1	0,64	262
4	6:1	0,72	275

Для оценки структуры графеновых слоев УНТ использован анализ спектров КР по пикам D (при $1250-1450\text{ см}^{-1}$) и G (при $1500-1600\text{ см}^{-1}$), что характеризуют атомы углерода в состояниях sp^3 и sp^2 -гибридизации. В результате увеличения концентрации ферроцена по отношению к графиту при СВЧ синтезе УНТ, формируется покрытие из железа на поверхности УНТ что связано с его каталитическим действием.

Необходимо также отметить, что удельная поверхность образцов УНТ увеличивается при уве-

личении концентрации ферроцена при СВЧ синтезе (табл. 1).

Удельную объемную электропроводность композита определяли согласно [37]:

$$\sigma = \sigma_c + (\sigma_m - \sigma_c) \left(\frac{\phi - \phi_c}{F - \phi_c} \right)^t, \quad (2)$$

где σ – удельная объемная электропроводность композита, $См/см$; σ_m – удельная объемная электропроводность композита при максимальном массовом содержании УНТ, $См/см$; σ_c – удельная объемная электропроводность композита на пороге перколяции, $См/см$; ϕ – объемная доля УНТ; ϕ_c – объемная доля УНТ на пороге перколяции; F – коэффициент упаковки УНТ; t – критический показатель электропроводности.

Коэффициент упаковки УНТ в эластомере [31], который связан возможностью полимерной матрицы насыщаться дисперсными структурами и характеризует наполняемость определенного типа полимера.

$$F = \frac{m}{V\rho}, \quad (3)$$

где m – масса УНТ, $кг$; V – объем УНТ, $м^3$; ρ – плотность УНТ, $кг/м^3$.

Электро- и теплофизические свойства композитов с УНТ приведены в табл. 2.

Следует отметить, что композит на основе УНТ (1:6) обладал лучшими характеристиками по сравнению с УНТ (1:3) и (1:5) соответственно, что

следует из характерных для него параметров теплопроводности, температуропроводности и электропроводности (табл. 3).

Следует отметить, что УНТ в полимерной матрице вызывают формирование межфазных областей, которые также оказывают влияние на физико-механические свойства нанокомпозита [38]. Таким образом, УНТ с различной морфологией способствует формированию своего типа межфазной области в нанокомпозите.

В табл. 3 представлены значения температур, которые связаны со свойствами композита при электронагреве.

Таблица 2

Электро- и теплофизические свойства композитов с УНТ

Table 2. Electrical and thermophysical properties of composites with CNTs

№	Свойства	Тип УНТ в композите			
		УНТ (1:3)	УНТ (1:4)	УНТ (1:5)	УНТ (1:6)
1	Теплопроводность, λ [Вт/(м°C)]	0,3	0,342	0,352	0,451
2	Температуропроводность, a [м ² /с]	1,3 e ⁻⁷	1,52 e ⁻⁷	1,72 e ⁻⁷	1,82 e ⁻⁷
3	Электропроводность, σ [См]	0,1	0,121	0,151	0,251

Таблица 3

Влияние типа УНТ в композите на температуру саморегулирования

Table 3. Influence of elastomer type on the self-adjustment temperature of the composite

№	Тип УНТ	Температура саморегулирования, °С
1	(1:3)	44,2
2	(1:4)	45,2
3	(1:5)	67,5
4	(1:6)	69,3

Из данных табл. 3 следует, что изменение типа УНТ приводит к изменению температуры до которой нагревается композит при одном и том же

питающем напряжении, которое, в свою очередь, определяет эффект саморегулирования температуры. Эффект саморегулирования позволяет поддерживать на одном и том же значении температуру композита без дополнительного контроля и регулирования (при изменении температуры окружающей среды).

ВЫВОДЫ

СВЧ методом синтезированы УНТ, отличающиеся по геометрическим и морфологическим параметрам, характеру включению железа на поверхность графенового слоя УНТ. Синтез УНТ осуществлялся с использованием различного соотношения графита и ферроцена (3:1; 4:1; 5:1 и 6:1). Установлено, что в результате СВЧ синтеза при разных составах смеси графита и ферроцена формируется разная морфология УНТ. Также наблюдается увеличение площади удельной поверхности исследованных УНТ. Композит на основе УНТ (1:6) обладал лучшими характеристиками по сравнению с УНТ (1:3) и (1:5) соответственно, что следует из характерных для него параметров теплопроводности, температуропроводности и электропроводности.

Установлено, что СВЧ синтез является эффективным методом получения УНТ в качестве добавки для эластичных матриц, которые являются основой функциональных композитов, используемых в качестве нагревателей с эффектом саморегулирования температуры.

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

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

The study was supported by the Russian Science Foundation grant No. 24-29-00855, <https://rscf.ru/project/24-29-00855/>.

The authors declare the absence a conflict of interest warranting disclosure in this article.

ЛИТЕРАТУРА

1. Avdeychik S., Goldade V., Struk V. The phenomenon of nanostate in material science of functional composites based on industrial polymers. *Theor. Appl. Sci.* 2020. N 7. P. 101-107. DOI: 10.15863/TAS.2020.07.87.25.
2. Hanemann T., Dorothée V.S. Polymer-Nanoparticle Composites: From Synthesis to Modern Applications. *Materials*. 2010. N 6. P. 3468-3517. DOI: 10.3390/ma3063468.
3. Mamunya E.P., Davidenko V.V., Lebedev E.V. Percolation conductivity of polymer composites filled with dispersed conductive filler. *Polym. Compos.* 1995. 16(4). P. 319-324. DOI: 10.1002/pc.750160409.

REFERENCES

1. Avdeychik S., Goldade V., Struk V. The phenomenon of nanostate in material science of functional composites based on industrial polymers. *Theor. Appl. Sci.* 2020. N 7. P. 101-107. DOI: 10.15863/TAS.2020.07.87.25.
2. Hanemann T., Dorothée V.S. Polymer-Nanoparticle Composites: From Synthesis to Modern Applications. *Materials*. 2010. N 6. P. 3468-3517. DOI: 10.3390/ma3063468.
3. Mamunya E.P., Davidenko V.V., Lebedev E.V. Percolation conductivity of polymer composites filled with dispersed conductive filler. *Polym. Compos.* 1995. 16(4). P. 319-324. DOI: 10.1002/pc.750160409.

4. **Shchegolkov A.V., Shchegolkov A.V., Zemtsova N.V., Vetcher A.A., Stanishevskiy Y.M.** Properties of Organosilicon Elastomers Modified with Multilayer Carbon Nanotubes and Metallic (Cu or Ni) Microparticles. *Polymers*. 2024. N 6. P. 774. DOI: 10.3390/polym16060774.
5. **Gacem A., Modi S., Yadav V. K., Islam S., Patel A. D., Vinars J., Mohammed I., Gajendra K., Piplode S., Solanki V. S., Basnet A.** Recent Advances in Methods for Synthesis of Carbon Nanotubes and Carbon Nanocomposite and their Emerging Applications. *J. Nanomater.* 2022. P. 7238602. DOI: 10.1155/2022/7238602.
6. **Alhakeem M.R.H.** Carbon Nanotube (CNT) Composites and its Application; A Review. *Brilliance. Res. Artif. Intell.* 2022. 2(3). P. 134-144. DOI: 10.47709/brilliance.v2i3.1692.
7. **Li J., Takeuchi A., Ozawa M., Li X., Saigo K., Kitazawa K.** C60 fullerol formation catalysed by quaternary ammonium hydroxides. *J. Chem. Soc. Chem. Commun.* 1993. 23. P. 1784. DOI: 10.1039/c39930001784.
8. **Jiménez-Suárez A., Prolongo S.G.** Graphene Nanoplatelets. *Appl. Sci.* 2020. 10. P. 1753. DOI: 10.3390/app10051753.
9. **Taha Z.T., Ádámné A.M.** A Review on MWCNTS: the effect of its addition on the polymer matrix. *Gradus*. 2023. V. 10. N 1. DOI: 10.47833/2023.1.ENG.012.
10. **Wang K., Wang F., Jiang Q., Zhu P., Leu K., Zhang R.** Controlled synthesis, properties, and applications of ultralong carbon nanotubes. *Nanoscale Adv.* 2024. V. 6. P. 4504-4521. DOI: 10.1039/d4na00437j.
11. **Tambraparni M., Wang S.** Separation of Metallic and Semiconducting Carbon Nanotubes. *Recent Pat. Nanotechnol.* 2010. 4(1). P. 1-9. DOI: 10.2174/18722101079071208.
12. **Piyush K.S., Narvdeshwar, Pawan K.G.** Chapter 5 - Characteristics of carbon nanotubes and their nanocomposites. Ed. by Sabu Thomas, Nandakumar Kalarikkal, Ann Rose Abraham. In: *Micro and Nano Technologies, Fundam. and Properties of Multifunctional Nanomaterials*. 2021. P. 99-118. DOI: 10.1016/B978-0-12-822352-9.00011-0.
13. **Nah C., Lim J.Y., Cho B.H., Hong C.K., Gent A.N.** Reinforcing rubber with carbon nanotubes. *J. Appl. Polymer Sci.* 2010. V. 118. N 3. P. 1574-1581. DOI: 10.1002/app.32524.
14. **Kostagiannakopoulou C., Fimegkou E., Sotiriadis G., Kostopoulos V.** Thermal Conductivity of Carbon Nanoreinforced Epoxy Composites. *J. Nanomater.* 2016. P. 1847325. DOI: 10.1155/2016/1847325.
15. **Salah L.S., Ouslimani N., Bousba D., Huynen I., Danlée Y., Aksas H.** Carbon Nanotubes (CNTs) from Synthesis to Functionalized (CNTs) Using Conventional and New Chemical Approaches. *J. Nanomater.* 2021. P. 4972770. DOI: 10.1155/2021/4972770.
16. **Manawi Y.M., Ihsanullah A.S., Al-Ansari T., Muataz A.A.** A Review of Carbon Nanomaterials' Synthesis via the Chemical Vapor Deposition (CVD) Method. *Materials*. 2018. N 5. P. 822. DOI: 10.3390/ma11050822.
17. **Truus K., Volobujeva O., Kaupmees R., Tamm A., Rähn M., Raid R., Koppel K., Tuvikene R.** Recent advances of carbon nanotubes synthesis by the electric arc technique using atomized platinum-group metal catalysts. *Mater. Sci. Eng.: B*. 2024.V. 300. P. 117121, DOI: 10.1016/j.mseb.2023.117121.
18. **Braidy N., Khakani M.A. El., Botton G.A.** Single-wall carbon nanotubes synthesis by means of UV laser vaporization. *Chem. Phys. Lett.* 2002. V. 354. P. 88-92. DOI: 10.1016/S0009-2614(02)00110-0.
4. **Shchegolkov A.V., Shchegolkov A.V., Zemtsova N.V., Vetcher A.A., Stanishevskiy Y.M.** Properties of Organosilicon Elastomers Modified with Multilayer Carbon Nanotubes and Metallic (Cu or Ni) Microparticles. *Polymers*. 2024. N 6. P. 774. DOI: 10.3390/polym16060774.
5. **Gacem A., Modi S., Yadav V. K., Islam S., Patel A. D., Vinars J., Mohammed I., Gajendra K., Piplode S., Solanki V. S., Basnet A.** Recent Advances in Methods for Synthesis of Carbon Nanotubes and Carbon Nanocomposite and their Emerging Applications. *J. Nanomater.* 2022. P. 7238602. DOI: 10.1155/2022/7238602.
6. **Alhakeem M.R.H.** Carbon Nanotube (CNT) Composites and its Application; A Review. *Brilliance. Res. Artif. Intell.* 2022. 2(3). P. 134-144. DOI: 10.47709/brilliance.v2i3.1692.
7. **Li J., Takeuchi A., Ozawa M., Li X., Saigo K., Kitazawa K.** C60 fullerol formation catalysed by quaternary ammonium hydroxides. *J. Chem. Soc. Chem. Commun.* 1993. 23. P. 1784. DOI: 10.1039/c39930001784.
8. **Jiménez-Suárez A., Prolongo S.G.** Graphene Nanoplatelets. *Appl. Sci.* 2020. 10. P. 1753. DOI: 10.3390/app10051753.
9. **Taha Z.T., Ádámné A.M.** A Review on MWCNTS: the effect of its addition on the polymer matrix. *Gradus*. 2023. V. 10. N 1. DOI: 10.47833/2023.1.ENG.012.
10. **Wang K., Wang F., Jiang Q., Zhu P., Leu K., Zhang R.** Controlled synthesis, properties, and applications of ultralong carbon nanotubes. *Nanoscale Adv.* 2024. V. 6. P. 4504-4521. DOI: 10.1039/d4na00437j.
11. **Tambraparni M., Wang S.** Separation of Metallic and Semiconducting Carbon Nanotubes. *Pat. Nanotechnol.* 2010. 4(1). P. 1-9. DOI: 10.2174/18722101079071208.
12. **Piyush K.S., Narvdeshwar, Pawan K.G.** Chapter 5 - Characteristics of carbon nanotubes and their nanocomposites. Ed. by Sabu Thomas, Nandakumar Kalarikkal, Ann Rose Abraham. In: *Micro and Nano Technologies, Fundam. and Properties of Multifunctional Nanomaterials*. 2021. P. 99-118. DOI: 10.1016/B978-0-12-822352-9.00011-0.
13. **Nah C., Lim J.Y., Cho B.H., Hong C.K., Gent A.N.** Reinforcing rubber with carbon nanotubes. *J. Appl. Polymer Sci.* 2010. V. 118. N 3. P. 1574-1581. DOI: 10.1002/app.32524.
14. **Kostagiannakopoulou C., Fimegkou E., Sotiriadis G., Kostopoulos V.** Thermal Conductivity of Carbon Nanoreinforced Epoxy Composites. *J. Nanomater.* 2016. P. 1847325. DOI: 10.1155/2016/1847325.
15. **Salah L.S., Ouslimani N., Bousba D., Huynen I., Danlée Y., Aksas H.** Carbon Nanotubes (CNTs) from Synthesis to Functionalized (CNTs) Using Conventional and New Chemical Approaches. *J. Nanomater.* 2021. P. 4972770. DOI: 10.1155/2021/4972770.
16. **Manawi Y.M., Ihsanullah A.S., Al-Ansari T., Muataz A.A.** A Review of Carbon Nanomaterials' Synthesis via the Chemical Vapor Deposition (CVD) Method. *Materials*. 2018. N 5. P. 822. DOI: 10.3390/ma11050822.
17. **Truus K., Volobujeva O., Kaupmees R., Tamm A., Rähn M., Raid R., Koppel K., Tuvikene R.** Recent advances of carbon nanotubes synthesis by the electric arc technique using atomized platinum-group metal catalysts. *Mater. Sci. Eng.: B*. 2024.V. 300. P. 117121, DOI: 10.1016/j.mseb.2023.117121.

19. **Varadan V.K., Xie J.** Synthesis of carbon nanocoils by microwave CVD. *Smart Mater. Struct.* 2002. V. 11. N 5. P. 728-734. DOI: 10.1088/0964-1726/11/5/316.
20. **Заритовский А.Н., Котенко Е.Н., Гришук С.В.** Получение углеродных наноструктур из полимерных материалов. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2024. Т. 67. Вып. 5. С. 99-106. DOI: 10.6060/ivkkt.20246705.6957.
21. **Öncel Ç., Yürüm Y.** Carbon Nanotube Synthesis via the Catalytic CVD Method: A Review on the Effect of Reaction Parameters. *Fuller. Nanotub. Carbon Nanostructures.* 2006. 14(1). P. 17–37. DOI: 10.1080/15363830500538441.
22. **Alexandrescu R., Crunteanu A., Morjan R.-E, Morjan I., Rohmund F., Falk L.K.L, Ledoux G., Huisken F.** Synthesis of carbon nanotubes by CO₂-laser-assisted chemical vapour deposition. *Infrared Phys. Technol.* 2003. V. 44. P. 43-50. DOI: 10.1016/S1350-4495(02)00158-5.
23. **Nie H., Cui M., Russell T.P.** A route to rapid carbon nanotube growth. *Chem. Commun.* 2013. 49(45). P. 5159. DOI: 10.1039/c3cc41746h.
24. **Algadri N. A., Ibrahim K., Hassan Z., Bououdina M.** Cost-effective single-step carbon nanotube synthesis using microwave oven. *Mat. Res. Express.* 2017. 4(8). P. 085602. DOI: 10.1088/2053-1591/aa817b.
25. **Fang S., Wang R., Ni H., Liu H., Liu L.** A review of flexible electric heating elements and electrically heated clothing. *J. of Industrial Textiles.* 2022. P. 101-136. DOI: 10.1177/1528083720968278.
26. **Щегольков А.В.** Сравнительный анализ тепловых эффектов в эластомерах, модифицированных MWCNTs, при постоянном электрическом напряжении. *Вектор науки Тольят. Гос. ун-та.* 2021. № 1. С. 63-73. DOI: 10.18323/2073-5073-2021-1-63-73.
27. **Zhou C., Zhang Y., Cen F., Yu X., Zhou W., Jiang S., Yu Y.** Polymer positive temperature coefficient composites with room-temperature Curie point and superior flexibility for self-regulating heating devices. *Polymer.* 2022. V. 265. P. 125587. DOI: 10.1016/j.polymer.2022.125587.
28. **Liu Y., Asare E., Porwal H., Barbieri E., Goutianos S., Evans J., Newton M., Busfield J.J.C., Peijs T., Zhang H., Bilotti E.** The effect of conductive network on positive temperature coefficient behaviour in conductive polymer composites. *Compos. Part a Appl. Sci. Manufact.* 2020. V. 139. P. 106074. DOI: 10.1016/j.compositesa.2020.106074.
29. **Das B., Yu X., Wang Y., Porwal H., Evans J., Newton M., Papageorgiou, D., Zhang H., Bilotti E.** High temperature co-polyester thermoplastic elastomer nanocomposites for flexible self-regulating heating devices. *Mater. Des.* 2024. V. 242. P. 113000. DOI: 10.1016/j.matdes.2024.113000.
30. **Asare E., Evans J., Newton M., Peijs T., Bilotti E.** Effect of particle size and shape on positive temperature coefficient (PTC) of conductive polymer composites (CPC) — a model study. *Mater. Des.* 2016. 97. P. 459–463. DOI: 10.1016/j.matdes.2016.02.077.
31. **Wang Y., Das B., Thorn T.D.S., Huo S., Evans J., Newton M., Liu Y., Advani S.G., Papageorgiou D.G., Bilotti E., Zhang H.** Towards highly homogeneous self-regulating heating of smart nanocomposites. *Appl. Mater. Today.* 2024. 39. P. 102292. DOI: 10.1016/j.apmt.2024.102292.
32. **Щегольков А.В., Щегольков А.В., Чумак М.А.** Синтез углеродных нанотрубок с использованием микроволнового излучения для модификации эластомеров с улучшенной электро- и теплопроводностью. *Перспектив.*
18. **Braidy N., Khakani M.A. El., Botton G.A.** Single-wall carbon nanotubes synthesis by means of UV laser vaporization. *Chem. Phys. Lett.* 2002. V. 354. P. 88-92. DOI: 10.1016/S0009-2614(02)00110-0.
19. **Varadan V.K., Xie J.** Synthesis of carbon nanocoils by microwave CVD. *Smart Mater. Struct.* 2002. V. 11. N 5. P. 728-734. DOI: 10.1088/0964-1726/11/5/316.
20. **Zaritovskii A.N., Kotenko E.N., Grishchuk S.V.** Production of carbon nanostructures from polymeric materials. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.].* 2024. V. 67. N 5. P. 99-106 (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20246705.6957.
21. **Öncel Ç., Yürüm Y.** Carbon Nanotube Synthesis via the Catalytic CVD Method: A Review on the Effect of Reaction Parameters. *Fuller. Nanotub. Carbon Nanostructures.* 2006. 14(1). P. 17–37. DOI: 10.1080/15363830500538441.
22. **Alexandrescu R., Crunteanu A., Morjan R.-E, Morjan I., Rohmund F., Falk L.K.L, Ledoux G., Huisken F.** Synthesis of carbon nanotubes by CO₂-laser-assisted chemical vapour deposition. *Infrared Phys. Technol.* 2003. V. 44. P. 43-50. DOI: 10.1016/S1350-4495(02)00158-5.
23. **Nie H., Cui M., Russell T.P.** A route to rapid carbon nanotube growth. *Chem. Commun.* 2013. 49(45). P. 5159. DOI: 10.1039/c3cc41746h.
24. **Algadri N. A., Ibrahim K., Hassan Z., Bououdina M.** Cost-effective single-step carbon nanotube synthesis using microwave oven. *Mat. Res. Express.* 2017. 4(8). P. 085602. DOI: 10.1088/2053-1591/aa817b.
25. **Fang S., Wang R., Ni H., Liu H., Liu L.** A review of flexible electric heating elements and electrically heated clothing. *J. of Industrial Textiles.* 2022. P. 101-136. DOI: 10.1177/1528083720968278.
26. **Shchegolkov A.V.** Comparative analysis of thermal effects in elastomers modified with MWCNTs at constant electric voltage. *Vector Nauki Tolyat. Gos. Univ.* 2021. N 1. P. 63-73 (in Russian). DOI: 10.18323/2073-5073-2021-1-63-73.
27. **Zhou C., Zhang Y., Cen F., Yu X., Zhou W., Jiang S., Yu Y.** Polymer positive temperature coefficient composites with room-temperature Curie point and superior flexibility for self-regulating heating devices. *Polymer.* 2022. V. 265. P. 125587. DOI: 10.1016/j.polymer.2022.125587.
28. **Liu Y., Asare E., Porwal H., Barbieri E., Goutianos S., Evans J., Newton M., Busfield J.J.C., Peijs T., Zhang H., Bilotti E.** The effect of conductive network on positive temperature coefficient behaviour in conductive polymer composites. *Compos. Part a Appl. Sci. Manufact.* 2020. V. 139. P. 106074. DOI: 10.1016/j.compositesa.2020.106074.
29. **Das B., Yu X., Wang Y., Porwal H., Evans J., Newton M., Papageorgiou, D., Zhang H., Bilotti E.** High temperature co-polyester thermoplastic elastomer nanocomposites for flexible self-regulating heating devices. *Mater. Des.* 2024. V. 242. P. 113000. DOI: 10.1016/j.matdes.2024.113000.
30. **Asare E., Evans J., Newton M., Peijs T., Bilotti E.** Effect of particle size and shape on positive temperature coefficient (PTC) of conductive polymer composites (CPC) — a model study. *Mater. Des.* 2016. 97. P. 459–463. DOI: 10.1016/j.matdes.2016.02.077.
31. **Wang Y., Das B., Thorn T.D.S., Huo S., Evans J., Newton M., Liu Y., Advani S.G., Papageorgiou D.G., Bilotti E., Zhang H.** Towards highly homogeneous self-regulating heating of smart nanocomposites. *Appl. Mater. Today.* 2024. 39. P. 102292. DOI: 10.1016/j.apmt.2024.102292.

- материалы. 2024. № 4. С. 54-65. DOI: 10.30791/1028-978X-2024-4-54-65.27.
33. **Nie H., Cui M., Russell T.P.** A route to rapid carbon nanotube growth. *Chem. Commun.* 2013. 49(45). P. 5159. DOI: 10.1039/c3cc41746h.
 34. **Liu Z., Wang J., Kushvaha V., Poyraz S., Tippur H., Park S., Zhang X.** Poptube approach for ultrafast carbon nanotube growth. *Chem. Commun.* 2011. 47(35). P. 9912. DOI: 10.1039/c1cc13359d.
 35. **Reeti B., Hanoch D.W.** Fast growth of carbon nanotubes using a microwave oven. *Carbon.* 2015. V. 82. P. 327-336. DOI: 10.1016/j.carbon.2014.10.077.
 36. **Mamunya Y.P., Davydenko V.V., Pissis P., Lebedev E.V.** Electrical and thermal conductivity of polymers filled with metal powders. *Eur. Polym. J.* 2002. V. 38. N 9. P. 1887-1897. DOI: 10.1016/s0014-3057(02)00064-2.
 37. **Козлов Г.В., Долбин И.В.** Влияние пространства формирования на структуру и свойства нанокомпозитов полимер/углеродные нанотрубки. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2024. V. 65. N 1. P. 99-106. DOI: 10.6060/ivkkt.20246705.6957.
 32. **Shchegolkov A.V., Shchegolkov A.V., Chumak M.A.** Synthesis of carbon nanotubes using microwave radiation for elastomer modification with improved electrical and thermal conductivity. *Perspectiv. Materialy.* 2024. N 4. P. 54-65 (in Russian). DOI: 10.30791/1028-978X-2024-4-54-65.
 33. **Nie H., Cui M., Russell T.P.** A route to rapid carbon nanotube growth. *Chem. Commun.* 2013. 49(45). P. 5159. DOI: 10.1039/c3cc41746h.
 34. **Liu Z., Wang J., Kushvaha V., Poyraz S., Tippur H., Park S., Zhang X.** Poptube approach for ultrafast carbon nanotube growth. *Chem. Commun.* 2011. 47(35). P. 9912. DOI: 10.1039/c1cc13359d.
 35. **Reeti B., Hanoch D.W.** Fast growth of carbon nanotubes using a microwave oven. *Carbon.* 2015. V. 82. P. 327-336. DOI: 10.1016/j.carbon.2014.10.077.
 36. **Mamunya Y.P., Davydenko V.V., Pissis P., Lebedev E.V.** Electrical and thermal conductivity of polymers filled with metal powders. *Eur. Polym. J.* 2002. V. 38. N 9. P. 1887-1897. DOI: 10.1016/s0014-3057(02)00064-2.
 37. **Kozlov G.V., Dolbin I.V.** Influence of the formation space on the structure and properties of polymer/carbon nanotube nanocomposites. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.].* 2024. V. 65. N 1. P. 99-106 (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20246705.6957.

Поступила в редакцию 02.11.2024

Принята к опубликованию 18.11.2024

Received 02.11.2024

Accepted 18.11.2024