

ВЛИЯНИЕ МЕХАНОАКТИВАЦИИ МНОГОСЛОЙНЫХ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК НА ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ЭЛАСТОМЕРОВ

А.В. Щегольков, А.В. Щегольков

Тамбовский государственный технический университет (ФГБОУ ВО ТГТУ), ул. Советская, д. 106, Тамбов, Российская Федерация, 392000

E-mail: energynano@yandex.ru, alexxx5000@mail.ru

В статье описано использование механоактивированных многослойных углеродных нанотрубок (МУНТ), синтезированных по CVD-технологии на Ni_{0.5}Mg катализаторе для создания высокоэффективных электронагревателей с эффектом саморегулирования. Механоактивированные с помощью шаровой мельницы МУНТ, используются в качестве электропроводящего наполнителя для эластомеров, таких как каучук с полярными группами C-Cl и кремнийорганический компаунд с полярными Si-O связями. Проведено сравнение влияния механоактивированных и исходных МУНТ на электрофизические свойства эластомеров - обладающими полярными группами C-Cl и полярными Si-O связями. За счет механоактивации МУНТ удельная объемная электропроводность (σ_m) кремнийорганического эластомера возрастает от значения 2,2 до 8,1 См·см⁻¹ при максимальном массовом содержании МУНТ. В случае хлоропренового каучука от 5,2 до 11,2 См·см⁻¹. Для удельной объемной электропроводности композита σ_c на пороге перколяции увеличивается для кремнийорганического компаунда с $0,5 \cdot 10^{-3}$ до $0,9 \cdot 10^{-2}$ См·см⁻¹. Установлено влияние механоактивации МУНТ на тепловыделения эластомеров, которая способствует выравниваю температурного поля при толщине образцов равной 3 мм. Поляризация эластомеров может быть косвенно оценена по величине пускового тока. Представлено теоретическое описание электрофизических свойств эластомеров, модифицированных МУНТ с применением уравнения Ланжевена – Дебая и дифференциального уравнения в частных производных Пуассона.

Ключевые слова: многослойные углеродные нанотрубки (МУНТ), механоактивация, кремнийорганический компаунд, нагревательный элемент

THE EFFECT OF MULTILAYER CARBON NANOTUBES BY MECHANICAL ACTIVATION AT THE ELECTRICAL PROPERTIES OF ELASTOMER/MWCNT COMPOSITE

A.V. Shchegolkov, A.V. Shchegolkov

Tambov State Technical University (TSTU), Sovetskaya St, 106, Tambov, Russian Federation, 392000

E-mail: energynano@yandex.ru, alexxx5000@mail.ru

The paper describes the use of mechanically activated multi-layer carbon nanotubes (MWNTs) synthesized by CVD-technology on Ni_{0.5}Mg catalyst to create highly efficient electric heaters with self-regulating effects. MWNTs mechanoactivated by a ball mill are used as an electrically conductive filler for elastomers such as C-Cl group polar rubber and Si-O polar silicone compound. The effect of mechanically activated and initial MWNTs on the electrophysical properties of elastomers having polar C-Cl groups and polar Si-O bonds has been compared. Due to MWNT mechanical activation the specific volumetric conductivity (σ_m) of silicone-organic elastomer increases from the value of 2.2 to 8.1 Sm·cm⁻¹ at the maximum mass content of MWNT. In case of chloroprene rubber it increases from 5.2 to 11.2 Sm·cm⁻¹. For the specific volumetric conductivity of the composite σ_c at the percolation threshold increases for the organosilicon compound from $0.5 \cdot 10^{-3}$ to $0.9 \cdot 10^{-2}$ Sm·cm⁻¹.

The effect of mechanical activation of MWNT on the elastomer heat release was established. It contributes to the alignment of the temperature field at a sample thickness of 3 mm. The polarization of elastomers can be indirectly estimated from the value of inrush current. A theoretical description of the electrophysical properties of elastomers modified by MWCNTs using the Langevin – Debye equation and the Poisson partial differential equation is presented.

Key words: multilayer carbon nanotubes (MWCNT), mechanical activation, organosilicon compound, heating element

Для цитирования:

Щегольков А.В., Щегольков А.В. Влияние механоактивации многослойных углеродных нанотрубок на электрофизические свойства наноструктурированных эластомеров. *Рос. хим. ж. (Ж. Рос. хим. об-ва)*. 2021. Т. LXV. № 4. С. 88–94

For citation:

Shchegolkov A.V., Shchegolkov A.V. The effect of multilayer carbon nanotubes by mechanical activation at the electrical properties of nanostructured elastomers. *Ros. Khim. Zh.* 2021. V. 65. N 4. P. 88–94

ВВЕДЕНИЕ

Технологии электронагрева находят все более широкое применение в различных секторах промышленности. Вопросы разработки и использования электронагревателей (ЭН) с эффектом саморегулирования температуры открывают широкие перспективы к созданию энергосберегающих и энергоэффективных технологий в различных сферах жизнедеятельности человека. В этой связи, для создания ЭН могут быть использованы углеродные нанотрубки и комбинированные полимерные матрицы [1]. Использование полиуретана, позволяет получать гибкие ЭН [2]. Создание электрических сетей в наномодифицированном полиуретане может быть достигнуто при концентрации МУНТ равной 2 масс. % [3]. Также, электропроводящая фаза в полимерной матрице может быть образована смесевым композитом УНТ/графен [4] или на основе гомогенной электропроводящей добавки графена [5] или УНТ [6].

В работе [7] представлены исследования кремнийорганической матрицы с МУНТ, синтезированных на разных катализаторах по технологии CVD (Chemical Vapor Deposition). В исследованиях, проведенных в работах [8,9] для улучшения свойств МУНТ использован подход механического воздействия МУНТ [8]. Следует разделять процессы перемешивания и механоактивации МУНТ, т. к. перемешивание не обеспечивает существенных изменений в структуре, морфологии и характеристиках МУНТ, при этом процесс перемешивания осуществляется различными устройствами, в которых имеется большой объем внутреннего пространства, в частности ротационные лопастные

смесители с регулируемой и нерегулируемой частотой вращения [8]. Механоактивация наноразмерных углеродных материалов в таких устройствах, как шаровые мельницы и аппараты вихревого слоя – приводит к их структурным изменениям и образованию свободных радикалов. Следует учитывать, что на образование свободных радикалов при механоактивации оказывают влияние такие факторы, как время обработки, тип устройства для механоактивирования и атмосфера в которой происходит механоактивация. В работе [9] установили, что 10-минутный механический помол не приводит к морфологическим и структурным изменениям УНТ, тогда как доля неупорядоченного углерода вместе с образованием аморфного углерода увеличивается через 20 мин обработки.

Другим вариантом механообработки МУНТ может быть многостадийная обработка МУНТ совместно с графитом при большой скорости перемешивания [10, 11] с последующей обработкой в аппарате вихревого слоя [12].

Целью работы является исследование влияния механоактивации МУНТ на электрофизические свойства наноструктурированных эластомеров и особенности тепловыделения по действием электрического напряжения, а также теоретическое описание электрофизических свойств эластомеров, модифицированных МУНТ.

Таким образом, основной задачей исследования являлась оценка влияния механоактивации углеродных нанотрубок на электрофизические свойства наноструктурированных эластомеров, при этом задачами исследований являлись:

1. Механоактивация МУНТ и получение наноструктурированных эластомеров.

2. Исследование электрофизических свойств с установлением порога перколяции электропроводности и распределения температурного поля на поверхности образцов эластомеров.

3. Теоретическое описание электрофизических свойств эластомеров, модифицированных МУНТ.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для получения композитного материала на основе полимера, модифицированного МУНТ были использован эластомер «Силаргерм 8030» (ООО "ЭЛЕМЕНТ 14", Москва, Россия), который представляет собой кремнийорганический компаунд с полярными Si-O связями. Для отвержения жидкой фазы кремнийорганического компаунда – один из компонентов содержит платину (Pt) (ТУ 38.303-04-05-90 (№68 – платиновый катализатор)). Для сравнения влияния матрицы на электропроводящие свойства композита, был подобран другой эластомер – хлоропреновый каучук «Ваурген 611» (ООО "ВитаХим", Казань, Россия) с полярными группами С-Сi. Дополнительно использовали – бутилфенолформальдегидную смолу 101К (ООО "КурскХимПром", Курск, Россия), оксид цинка и оксид магния (ООО «Биохим-ТЛ», Москва, Россия). Растворитель - смесь этилацетата (ООО "Нижегородхим", Дзержинск, Россия) и ацетона (ООО «Вершина», Всеволожск, Россия). В качестве электропроводящего наполнителя использованы МУНТ, полученные по CVD-технологии на Ni/0,5Mg катализаторе (с мольным соотношением Ni :Mg, равным 1:0,5).

Для механоактивирования МУНТ использовалась планетарная мельница Пульверизетте 5, с режимом механической обработки в течении 5 минут и диаметром шаров равным 5 мм. Образцы нагревателей были получены по методике, представленной в работах [7, 10–12]. Толщина образцов составила 3 мм. Тип расположения питающих электродов- компланарный.

Исследования процессов тепловыделения на поверхности нагревательного элемента производили тепловизором Testo 875-1 (Германия, Testo). Морфологию поверхности МУНТ исследовали с помощью сканирующего электронного микроскопа «TESCAN LYRA 3» (Чехия). Удельное объемное электрическое сопротивление измеряли с помощью мультиметра «UNIT UT71E» (Китай) с пределом измерения электрического сопротивле-

ния до 60 МОм. Для измерения высокого удельного сопротивления использован вольтметр-электронметр В7-30 с пределом измерения до 10¹⁸ Ом. Погрешность прибора: (± (a+0,15 Rx) Ом (10¹¹-10¹⁸ Ом), ±(a+0,05 Rx) Ом (10⁹-10¹⁰ Ом), где a - погрешность дискретности, равная 2 ед. младшего разряда).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Изображение СЭМ – МУНТ, синтезированных на катализаторе Ni/0,5Mg, представлено на рис. 1. На котором наблюдается нитевидные образования, обладающие волнистостью, длиной около 2 мкм и более, которые объединены в пучки. Особенность МУНТ объединяться в пучки – обеспечивает формирование агломератов и агрегатов.

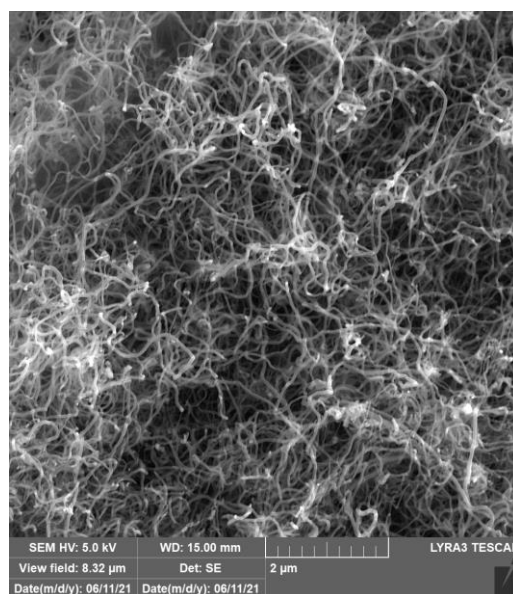


Рис. 1. СЭМ- изображения МУНТ (Ni/0,5Mg – катализатор)

Теоретически механизм перколяции электрической проводимости в первом приближении можно представить в виде степенного закона, отражающего зависимость проводимости материала от концентрации проводящего компонента, т.е. электрофизическим переходом композита из изолирующего (диэлектрик) в проводящего состоянии [11]:

$$\sigma = \sigma_0 (\varphi - \varphi_c)^t \quad (1)$$

где σ – удельная объемная электропроводность, См/см; σ_0 – удельная объемная электропроводность МУНТ (См/см); σ_c - удельная объемная электропроводность композита на пороге перколяции (См/см); φ – объемная доля МУНТ; φ_c – объемная доля МУНТ на пороге перколяции; t – критический показатель степени электропроводности.

Проведенные исследования позволили установить параметры уравнения перколяции (1)

для наномодифицированных эластомеров с механоактивированными МУНТ. Параметры уравнения (1) сведены в табл. 1. При этом образцы Э-1 М и Э-2 М обозначают механоактивированные МУНТ.

Таблица 1
Параметры уравнения перколяции наномодифицированных эластомеров

Композит	σ_c	σ_m	φ_c	t
Э-1	$0,5 \cdot 10^{-3}$	2,2	0,55	1,5
Э-1 М	$0,9 \cdot 10^{-3}$	4,1	0,4	2
Э-2	$1,5 \cdot 10^{-2}$	7,2	0,65	2
Э-2 М	$3,5 \cdot 10^{-2}$	9,2	0,5	2,8

За счет механоактивации МУНТ удельная объемная электропроводность (σ_m) кремнийорганического эластомера возрастает от значения 2,2 до 8,1 См/см при максимальном массовом содержании МУНТ. В случае хлоропренового каучука от 5,2 до 11,2 См/см. Удельная объемная электропроводность кремнийорганического компаунда σ_o на пороге перколяции увеличивается с $0,5 \cdot 10^{-3}$ до $0,9 \cdot 10^{-2}$ См/см. При этом для хлоропренового каучука изменение σ_c происходит от $1,5 \cdot 10^{-3}$ и до

$3,5 \cdot 10^{-2}$ См/см. Объемная доля МУНТ φ_c на пороге перколяции для кремнийорганического компаунда изменяется от величины 0,55 до 0,4. Для хлоропренового каучука от 0,65 до 0,5. Критический показатель степени t также меняется, как для кремнийорганического компаунда от 1,5 до 2, так и для хлоропренового каучука от значений 2 до 2,8.

Механоактивация МУНТ в планетарной мельнице - вызывает снижение контактного сопротивления за счет рассредоточения МУНТ с образованием параллельных проводящих структур. В результате формирования параллельных проводящих структур может наблюдаться снижение доли микролокаций в образованных МУНТ объединенных в крупные агломераты, а также снижения эффекта «блуждающих токов» - приводящего к увеличению электрического сопротивления.

Температура на поверхности образцов (рис. 2), изготовленных из кремнийорганического компаунда с содержанием 10 масс. % МУНТ варьировалась от 37 °С до 48,9 °С (рис. 2 а, б, с). С механоактивацией МУНТ максимальная температура составила 72,9 °С. При этом минимальное значение 51,8 °С, а среднее значение 67,3 °С.

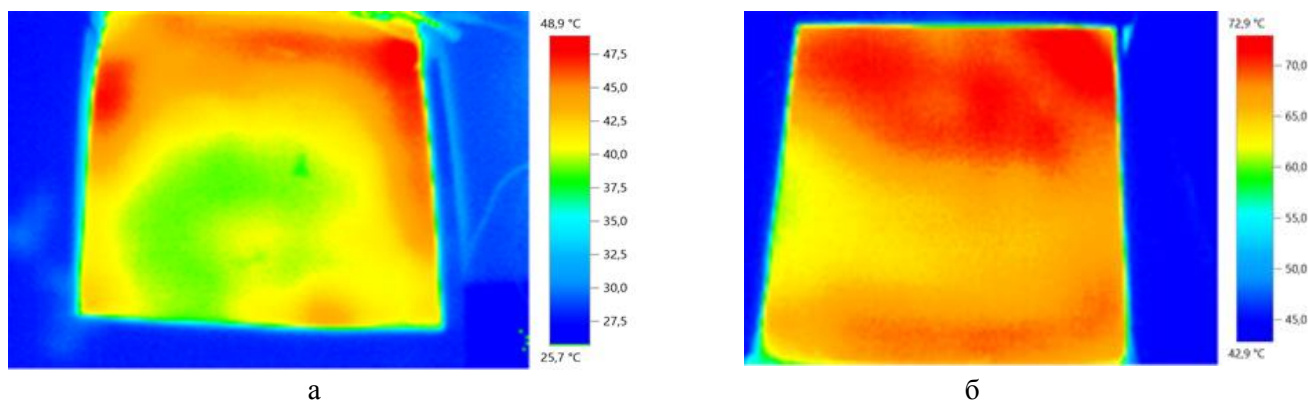


Рис. 2. Тепловизионные снимки нагревательных элементов, выполненные с помощью тепловизора Testo 875
а – кремнийорганический каучук с МУНТ, б – кремнийорганический компаунд с МУНТ

Максимальная температура нагрева образцов (рис. 3а,б), изготовленных из хлоропренового каучука с содержанием 10 масс. % механоактивированных МУНТ - 67,6 °С. Для нагревателя с обычными МУНТ максимальная температура составляет 61,1 °С. При этом для эластомера с механоактивированными МУНТ температурное поле - равномерное, а для МУНТ без механоактивации наблюдаются локации с превышением температуры относительно средней температуры в центральной части образца нагревателя.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ КОМПОЗИТОВ

Процессы тепловыделений в наноструктурированных эластомерах связаны с их электрофизическими свойствами. В эластомере с МУНТ имеется диэлектрическая (каучук с полярными группами С-Cl и кремнийорганический компаунд с полярными Si-O связями) и проводящая фаза - МУНТ. Зависимость диэлектрической проницаемости ϵ полярного диэлектрика от дипольного

электрического момента p составляющих его молекул с учетом зависимость ϵ от температуры по выражению Ланжевена – Дебая [13, 14] имеет вид:

$$\frac{\epsilon - 1}{\epsilon + 2} = \frac{4p}{3} N \left(\alpha_0 + \frac{p^2}{3kT} \right) \quad (2)$$

где, N – число молекул в единице объема, α_0 – поляризуемость упругого смещения, T – температура, °С.

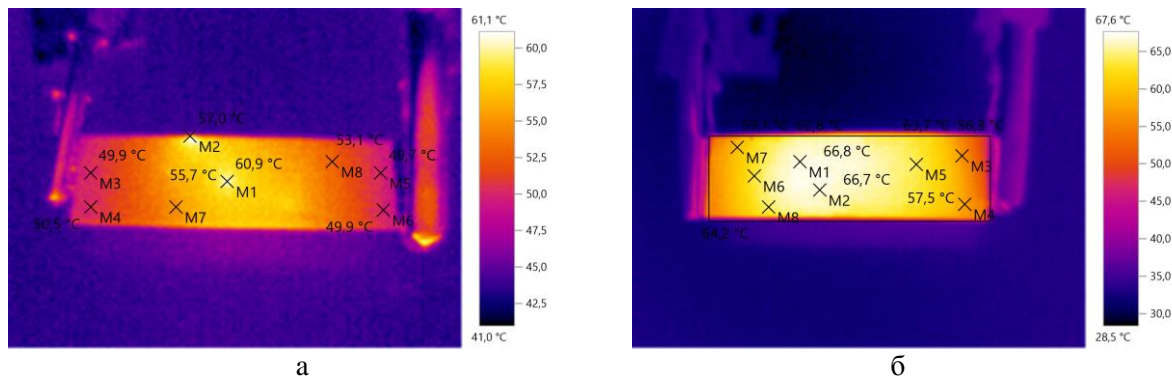


Рис. 3. Тепловизионные снимки нагревательных элементов, выполненные с помощью тепловизора Testo 875 а – хлоропреновый каучук в МУНТ, б – хлоропреновый каучук с механоактивированными МУНТ

В отсутствие электрического поля дипольные молекулы полярного диэлектрика ориентированы хаотически. В электрическом поле возникает ориентация молекул вдоль поля, чему препятствует тепловое движение молекул.

Наномодифицированный эластомер снабженный питающими электродами обладает емкостным током I_c , зарядом Q_c и емкостью C_x .

Суммарный ток $\bar{I}_c = \bar{I}_p + \bar{I}_a$ опережает напряжение \bar{U} на угол φ . Угол, дополнительный к этому углу, обозначают δ ($\delta = 90^\circ - \varphi$) и называют углом диэлектрических потерь. Данное утверждение характерно для момента включения, что вызывает появление эффекта пускового тока.

Эффект поляризации можно косвенно оценить по наличию пускового тока в наноструктурированном эластомере при питающем напряжении равном 100 В.

На рис. 4 представлена динамика пускового тока при температуре окружающей среды 20 °С.

Механоактивация МУНТ повышает мощность нагревателей, что приводит к росту пускового тока. Для кремнийорганического компаунда с МУНТ пусковой ток составляет 3,4 мА, с механоактивацией МУНТ пусковой ток возрастает до 4,5 мА. Для хлоропренового каучука пусковой ток составляет 3,7 мА, с механоактивацией МУНТ пусковой ток возрастает до 4,8 мА для образца 1 см².

Наноструктурированный эластомер, состоящий из диэлектрической и проводящей фазы, можно представить в виде эквивалентной схемы, состоящей из конденсатора C и присоединенного

параллельно к нему резистора R :

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{1}{\omega RC} = \frac{1}{\epsilon_0 \epsilon_r \rho_v \omega} \quad (3)$$

Диэлектрические потери могут быть дипольно-сегментальными, что вызвано ориентационным поворотом полярных звеньев (полярные Si-O связи) макромолекулы в условиях, когда возможно сегментальное движение, т.е. в том случае, когда для полимера характерно высокоэластическое состояние. Второй тип - дипольно-групповые потери - обусловлены ориентацией самих полярных групп C-Cl.

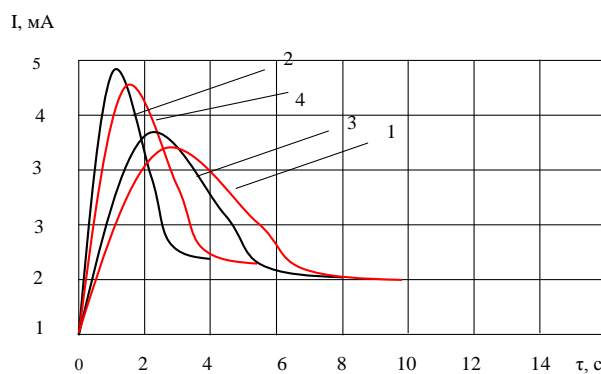


Рис. 4. Динамика пускового тока при температуре окружающей среды 20 °С

1 – Кремнийорганический компаунд с МУНТ; 2 – Кремнийорганический компаунд с механоактивированными МУНТ; 3 – Хлоропреновый каучук с МУНТ; 4 – Хлоропреновый каучук с механоактивированными МУНТ

Следует учесть, что для наномодифицированного эластомера распределение температуры

находится в функциональной связи с электрическим потенциалом:

$$T(x, y, z) = f(\varphi(x, y, z)) \quad (4)$$

Для нахождения распределения электрического потенциального поля в объеме эластомера, содержащего МУНТ, может быть использовано дифференциальное уравнение в частных производных в декартовых координатах (уравнение Пуассона):

$$\nabla^2 \varphi = \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} \quad (5)$$

Уравнение (5) определяет качественные особенности тепловыделения в электрическом нагревателе, которые связаны с расположением электродов, а также природой полимерной матрицы. Полимерная матрица может существенным образом повлиять на процессы тепловыделения под действием электрического напряжения, что следует из данных представленных на рис. 2 и 3. При подборе полимерной матрицы следует учитывать возможные поляризационные эффекты, которые можно оценить на основе уравнения Ланжевена – Дебая (2).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Эффективность МУНТ, как модификатора эластомеров была улучшена с помощью механоактивации. Для механоактивации МУНТ использовалась планетарная мельница Пульверизетте 5, с режимом механической обработки в течении 5 мин и диаметром шаров 5 мм.

ЛИТЕРАТУРА

1. Shchegolkov A., Dyachkova T., Burakova E., Kokuytseva T., Zobov A. MATEC Web of Conferences. 2018. V. 243. P. 00028. DOI: 10.1051/mateconf/201824300028.
2. Russo P., Langella A., Papa I., Simeoli G., Lopresto V. Composite Structures. 2017. V. 166. P. 146-152. DOI: 10.1016/j.compstruct.2017.01.054.
3. Zhao Z., Chen H., Liu X., Wang Z., Zhu Y., Zhou Y. Surface and Coatings Technology. 2020. V. 404. P. 126489. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2020.126489.
4. Vertuccio L., Foglia F., Pantani R., Romero-Sánchez M.D., Calderón B., Guadagno L. Composites Part B: Engineering. 2021. V. 207. P. 108583. DOI: 10.1016/j.compositesb.2020.108583.
5. Vertuccio L., De Santis F., Pantani R., Lafdi K., Guadagno L. Composites Part B: Engineering. 2019. V. 162. P. 600–610. DOI: 10.1016/j.compositesb.2019.01.045.
6. Yao X., Hawkins S.C., Falzon B.G. Carbon. 2018. V. 136. P. 130–138. DOI: 10.1016/j.carbon.2018.04.039.
7. Ali I., AlGarni T.S., Shchegolkov A., Shchegolkov A., Jang S.-H., Galunin E., Komarov F., Borovskikh P., Imanova G.T. Polymer Bulletin. 2021. Article in press. DOI: 10.1007/s00289-020-03483-y.

Механоактивация МУНТ приводит к увеличению удельной объемной электропроводности (σ_m) кремнийорганического эластомера с 2,2 до 8,1 См/см при максимальном массовом содержании МУНТ. В случае хлоропренового каучука увеличение происходит до 11,2 См/см. Для удельной объемной электропроводности кремнийорганического компаунда σ_c на пороге перколяции увеличивается с $0,5 \cdot 10^{-3}$ до $0,9 \cdot 10^{-2}$ См/см. При этом для хлоропренового каучука изменение σ_c происходит от $1,5 \cdot 10^{-3}$ и до $3,5 \cdot 10^{-2}$ См/см.

Механоактивация МУНТ в планетарной мельнице - вызывает уменьшение контактного сопротивления за счет рассредоточения МУНТ с образованием параллельных проводящих структур, что может быть результатом диспергирования МУНТ объединенных в крупные агломераты, а также снижения эффекта «блуждающих токов» - приводящего к увеличению электрического сопротивления.

Проведенные исследования позволили установить, что равномерное распределение температуры на поверхности нагревателей, обусловлена электропроводящими связями между компонентами перколяционной системы механоактивированных МУНТ в объеме композиционного материала. Данные нагреватели можно использовать в качестве элементов, позволяющих локально обогревать узлы автотранспортной техники. Теоретическое описание электрофизических свойств эластомеров, модифицированных МУНТ осуществляется на основе уравнения Ланжевена – Дебая и дифференциального уравнения в частных производных (уравнение Пуассона).

REFERENCES

1. Shchegolkov A., Dyachkova T., Burakova E., Kokuytseva T., Zobov A. MATEC Web of Conferences. 2018. V. 243. P. 00028. DOI: 10.1051/mateconf/201824300028.
2. Russo P., Langella A., Papa I., Simeoli G., Lopresto V. Composite Structures. 2017. V. 166. P. 146-152. DOI: 10.1016/j.compstruct.2017.01.054.
3. Zhao Z., Chen H., Liu X., Wang Z., Zhu Y., Zhou Y. Surface and Coatings Technology. 2020. V. 404. P. 126489. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2020.126489.
4. Vertuccio L., Foglia F., Pantani R., Romero-Sánchez M.D., Calderón B., Guadagno L. Composites Part B: Engineering. 2021. V. 207. P. 108583. DOI: 10.1016/j.compositesb.2020.108583.
5. Vertuccio L., De Santis F., Pantani R., Lafdi K., Guadagno L. Composites Part B: Engineering. 2019. V. 162. P. 600–610. DOI: 10.1016/j.compositesb.2019.01.045.
6. Yao X., Hawkins S.C., Falzon B.G. Carbon. 2018. V. 136. P. 130–138. DOI: 10.1016/j.carbon.2018.04.039.
7. Ali I., AlGarni T.S., Shchegolkov A., Shchegolkov A., Jang S.-H., Galunin E., Komarov F., Borovskikh P., Imanova G.T. Polymer Bulletin. 2021. Article in press. DOI: 10.1007/s00289-020-03483-y.

8. *Cacucciolo V., Shintake J., Kuwajima Y., Maeda S., Floreano D., Shea H.* Nature. 2019. V. 572. P. 516–519. DOI: 10.1038/s41586-019-1479-6.
9. *Bento J.L., Brown E., Woltornist S.J., Adamson D.H.* Adv. Funct. Mater. 2017. V. 27(1). P. 1604277. DOI: 10.1002/adfm.201604277.
10. *Щегольков А.В., Комаров Ф.Ф., Парфимович И.Д., Мильчанин О.В., Щегольков А.В., Хробак А.В., Семенкова А.В.* Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2020. № 3(53). С. 65–72. DOI: 10.18323/2073-5073-2020-3-65-72.
11. *Щегольков А.В.* Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2021. № 1(55). С. 63–73. DOI: 10.18323/2073-5073-2021-1-63-73.
12. *Щегольков А.В.* Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2021. Т. 19. № 2. С. 58–67. DOI: 10.18503/1995-2732-2021-19-2-58-67.
13. *Дебай П.* Полярные молекулы, пер. с нем., М.- Л., 1931;
14. *Барфут Дж., Тейлор Дж.* Полярные диэлектрики и их применения, пер. с англ., М. 1981.
8. *Cacucciolo V., Shintake J., Kuwajima Y., Maeda S., Floreano D., Shea H.* Nature. 2019. V. 572. P. 516–519. DOI: 10.1038/s41586-019-1479-6.
9. *Bento J.L., Brown E., Woltornist S.J., Adamson D.H.* Adv. Funct. Mater. 2017. V. 27(1). P. 1604277. DOI: 10.1002/adfm.201604277.
10. *Shchegolkov A., Komarov F., Parfimovich I., Milchanin O., Shchegolkov A., Khrobak A., Semenkova A.* Science Vector of Togliatti State University. 2020.V.3. P. 65-72. DOI:10.18323/2073-5073-2020-3-65-72
11. *Shchegolkov A.* Science Vector of Togliatti State University. 2021. V. 1. P. 63-73. (In Russ.). DOI:10.18323/2073-5073-2021-1-63-73.
12. *Shchegolkov A.* Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova. 2021, V. 19(2), P. 58–67. DOI:10.18503/1995-2732-2021-19-2-58-67
13. *Debye P.* Polar Molecules / Per. with him. M.-L. : GTTI, 1931.247 P.
14. *Barfoot J., Taylor J.* Polar dielectrics and their applications, trans. from English, M., 1981.

Поступила в редакцию (Received) 01.08.2021

Принята к опубликованию (Accepted) 03.09.2021