УДК 678.046.01
DOI: 10.17277/vestnik.2019.04.pp.678-689

ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК И ИХ КОНЦЕНТРАЦИЙ НА ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ЭЛЕКТРОНАГРЕВАТЕЛЕЙ С САМОРЕГУЛИРОВАНИЕМ ТЕМПЕРАТУРЫ

В. С. Ягубов, А. В. Щегольков

Кафедра «Техника и технологии производства нанопродуктов», vitya-y@mail.ru; ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия

Ключевые слова: нагреватель; саморегулирование температуры; углеродные нанотрубки; удельное объемное сопротивление; удельное поверхностное сопротивление; эластомер.

Аннотация: Представлены результаты исследований эластомеров, модифицированных углеродными нанотрубками (УНТ), синтезированными на различных видах катализаторов. Разработана методика изготовления композитов на основе эластомеров с УНТ. Исследовано влияние различного массового содержания УНТ в эластомере на значения удельного объемного и поверхностного электрического сопротивления. Выявлено, что при увеличении массового содержания УНТ в эластомере максимальная мощность достигается при меньшем значении напряжения. Проведены измерения температурных полей на поверхности образцов нагревателей, в ходе которых установлено, что разброс температур на поверхности образцов нагревателей не превышает 5 °С.

Введение

Разработка электропроводящих полимеров – сложная междисциплинарная задача, в рамках которой необходимо учитывать ряд взаимосвязанных параметров. Электропроводящий полимер представляет собой композит, в который входят полимерная матрица и электропроводящая дисперсная фаза. В качестве матриц могут быть использованы различные полимеры [1], полиэтилен [2], сополимер этилена с винилацетатом [3] и т.д. Например, в работе [4] представлен электропроводящий полимер на основе бисерного поливинилацетата марки М-10. В качестве электропроводящей фазы применяли для сравнения несколько видов углеродных наполнителей: печной технический углерод П-805 Э, ламповый технический углерод марки Printex XE-2B и углеродное волокно марки УВИС-АК-П. Известны работы, где в качестве основы композитов рассмотрены такие полимеры, как сополимер пропилена с этиленом [5], полихлоропреновый каучук [6], силикон [7], парафин [8]. Большое значение в создании электропроводящих полимеров приобретает применение в качестве электропроводящей фазы углеродных наноматериалов (**УНМ**) в составе полимерных матриц, что обусловлено высокими электрофизическими свойствами УНМ [9 – 11].

В работе [12] исследована клеевая композиция на основе эпоксидной смолы ЭД-20, модифицированная углеродными нанотрубками (**УНТ**), аморфным углеродом и фуллереном, которые могут применяться для упрочнения соединений конструкций авиатехники. В работе [13] представлена клеевая композиция на ос-

нове хлоропренового каучука, модифицированная УНТ Таунит-М и графеном, допированным азотом.

Наномодифицированые полимеры используют в качестве электронагревательных устройств, например, для антиобледенительных систем [14 – 16]. Применение УНМ в основе композитов позволяет получать саморегулируемые нагреватели, обладающие управляемой скоростью нагрева при регулируемом значении питающего напряжения постоянного тока. В работе [17] показаны исследования прозрачных нагревателей на основе однослойных УНТ (**ОУНТ**), которые наносятся на прозрачную подложку. Исследования полученных прозрачных нагревателей показывают, что при номинальном питающем напряжении постоянного тока 7 В нагрев до 100 °С происходит за 1…2 с. В работе [18] представлены прозрачные нагреватели на основе слоя графена, на поверхность которого нанесена сетка из серебра. Температура нагрева увеличивалась с 25 до 140 °С с возрастанием размеров ячейки серебряной сетки с 150 до 750 мкм соответственно. Время нагрева до 140 °С составляло 40 с.

Анализ статей [1 – 18] показывает, что существуют различные технологические подходы и материальная база при создании наномодифицированных полимеров. Данные полимеры обладают лучшими функциональными свойствами, по сравнению с немодифицированными, что и обуславливает их широкую сферу применения. Однако существуют противоречия в области изучения наномодифицированных полимерных матриц, предназначенных для создания электронагревателей, а также отсутствует информация о влиянии типа УНТ и их концентраций на электрофизические характеристики таких матриц.

В связи с этим в статье поставлены следующие основные задачи:

1) модифицировать эластомеры с помощью УНТ, синтезированных на различных катализаторах;

2) изготовить лабораторные образцы электронагревателей на основе наномодифицированных эластомеров;

3) исследовать корреляции электропроводящих свойств с тепловыделениями наномодифицированных эластомеров, подключенных к источнику постоянного тока;

4) исследовать закономерности влияния питающего напряжения постоянного тока на нагрев наномодифицированных полимеров.

Оборудование и материалы

В работе применяли следующие приборы: термогигрометр UNI-T UT333 (Uni-Trend Technology Limited, Коулун, КНР) для измерения относительной влажности воздуха; измеритель-регулятор микропроцессорный 2ТРМ1 (ОВЕН, Москва, Россия) – температуры окружающей среды. Материал полимерной матрицы – силикон высокопрочный марки Силагерм 8030 (ООО «ЭЛЕМЕНТ 14», Москва, Россия), который представляет собой кремнийорганический компаунд, состоящий из основы и катализатора. В качестве электропроводящей дисперсной фазы использовали УНТ. Взвешивание компонентов композита проводили на аналитических весах OHAUS Pioneer (PA) (Чанджоу, КНР) с точностью 10^{-5} г. Для изготовления образцов в целях исследования электрического сопротивления применяли фторопластовую ленту Ф-4 марки ЭО (ГОСТ 24222–80) толщиной 0,06 мм, которую определяли с помощью микрометра МК 0-25. Распределение температурного поля на поверхности исследовали тепловизором Testo 875-1 (Шварцвальд, Германия).

Методика изготовления наномодифицированных образцов

Для исследований изготавливали наномодифицированные композиты, содержащие 1, 3, 5 и 7 масс. % УНТ, синтезированных на двух видах катализаторов: $Fe–Co/_{2,1}Al_2O_3$ (**ТМ1**) и $Co–Mo/Al_2O_3–MgO$ (**ТМ2**). Для приготовления 15 г эла-

стомерного композита, содержащего 1 масс. % УНТ, в лабораторный стакан емкостью 50 мл добавляли 0,15 г УНТ. К навеске УНТ добавляли 7,425 г основы кремнийорганического компаунда и перемешивали с помощью вертикальной роторной мешалки HT-120 DX (DAIHAN Scientific, Южная Корея) при частоте вращения пропеллерного перемешивающего устройства 1000 об/мин в течение 20 мин. К полученной смеси УНТ с основой силикона Силагерм 8030 (компонент А) добавляли 7,425 г катализатора Силагерм 8030 (компонент В) и снова перемешивали при тех же условиях, тем самым получая наномодифицированный композит. Для удаления воздуха наномодифицированный композит помещали в вакуумный термошкаф UT-4686V (ULAB, КНР) на 15 мин при температуре 25 °С и значении разрежения 0,1 МПа. По данной технологии были приготовлены все композиты, модифицированные УНТ.

Методика изготовления образцов наномодифицированных композитов для исследования удельных объемного и поверхностного сопротивлений

Для исследования удельных объемного и поверхностного сопротивлений наномодифицированный композит размещали на фторопластовую ленту, уложенную на стеклянную поверхность, на нее же по периметру устанавливали ограничители толщиной 1 мм, которые позволяли обеспечивать толщину слоя наномодифицированного композита. Сверху на композит так же укладывали фторопластовую ленту, которую прижимали к ограничителям стеклом с размерами 20×20×3 мм. Полученную сборку оставляли на 24 ч при температуре 20 °С для полного отверждения композита. По истечении указанного времени извлекали образцы наномодифицированного композита и формовали цилиндры с диаметром 23 мм (рис. 1). Композиты на основе эластомеров, содержащие ТМ1 и ТМ2, обозначили ЭТМ1 и ЭТМ2. Такие композиты, содержащие 1, 3, 5 и 7 масс. % модификаторов, обозначены как ЭТМ1-1, ЭТМ1-3, ЭТМ1-5, ЭТМ1-7 и ЭТМ2-1, ЭТМ2-3, ЭТМ2-5, ЭТМ2-7 соответственно.

Методика измерения удельных сопротивлений ЭТМ

Измерение удельных объемного и поверхностного сопротивлений ЭТМ1 и ЭТМ2 с различным содержанием ТМ1 и ТМ2 проводили с помощью измерителя JANDEL RM3000+ (рис. 2), работа которого основана на четырехзондовом методе измерения электрических сопротивлений. Предел измерения прибора составляет 1×10^6 Ом·см и 5×10^8 Ом/квадрат (или Ом/□) при исследовании удельных объемного и поверхностного электрических сопротивлений соответственно.

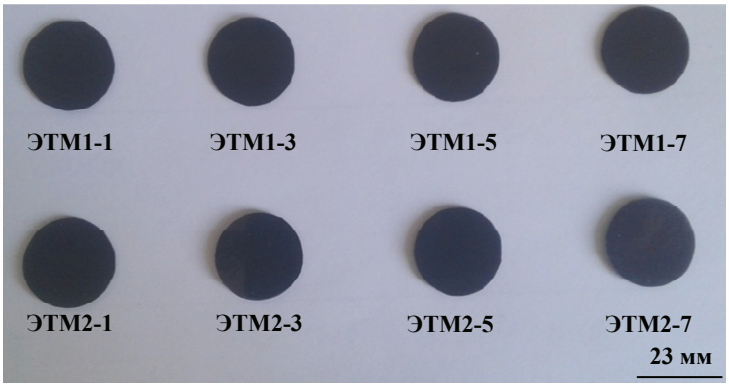

Рис. 1. Образцы наномодифицированного композита для исследования удельных электрических сопротивлений

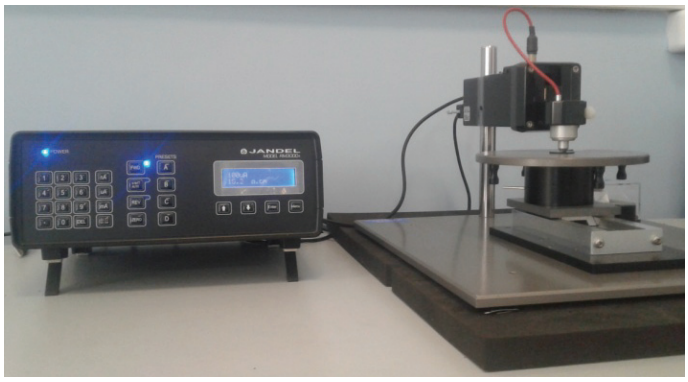

Рис. 2. Измерение удельных электрических сопротивлений наномодифицированных эластомеров

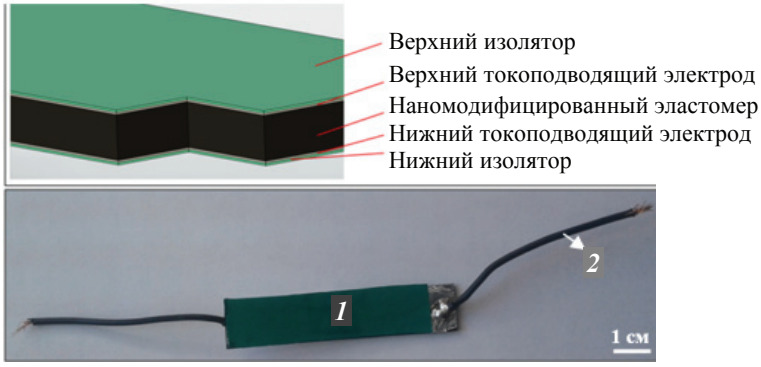

Рис. 3. Образец нагревателя ЭТМ с токоподводящими электродами

Методика изготовления лабораторных образцов для исследования влияния электрического поля на нагрев углеродных нанотрубок в наномодифицированных композитах

Для исследования влияния электрического поля на нагрев углеродных нанотрубок в наномодифицированных композитах обеспечивали подвод электрического постоянного тока к приготовленным композитам ЭТМ1 и ЭТМ2. Методика изготовления образцов нагревателя (**ОН**) для исследования схожа с методикой, приведенной выше, но вместо фторопластовых лент, композит формовали между двумя пластинами из алюминиевой фольги толщиной 100 мкм (ГОСТ 618–2014). После отверждения образцы разрезали, получая пластины с размерами 60×15 мм, которые изолировали с помощью клейкой пленки *1* марки ORACAL 640 (рис. 3). Для подвода электрического напряжения к исследуемым пластинам припаивали медные электропровода *2* с поперечным сечением 1,5 мм.

Методика исследования электрофизических параметров ОН ЭТМ

Для проведения исследований параметров разработан универсальный измерительный стенд, позволяющий проводить исследования ОН ЭТМ на постоянном электрическом токе. Принципиальная схема стенда показана на рис. 4.

В качестве источника переменного тока использовали лабораторный автотрансформатор Ресанта ЛАТР TDGC2-3 (Москва, Россия). Для преобразования переменного тока в постоянный к клеммам выходного напряжения автотранс-

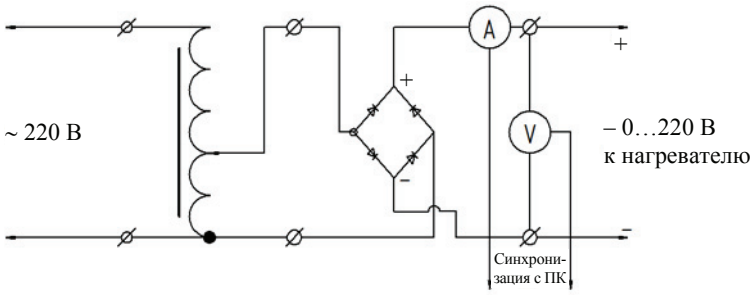

Рис. 4. Схема измерительного стенда для исследования электрофизических параметров ОН ЭТМ на постоянном токе

форматора подключали диодный мост, изготовленный из диодов 10А10, рассчитанных на максимальное постоянное напряжение 1000 В и электрический ток 10 А. Использование автотрансформатора в основе измерительного стенда обеспечивало регулировку значения выходного напряжения переменного тока от 0 до 220 В, что позволило провести исследования наномодифицированных полимеров на разных значениях питающего напряжения. В качестве измерительных приборов в конструкции измерительного стенда использовали два мультиметра UNI-T UT61E и WH5000 (КНР), которые обеспечивали синхронизацию измерения с персональным компьютером (**ПК**) с помощью интерфейсов USB и COM, что позволило в режиме реального времени проводить запись электрофизических параметров наномодифицированных полимеров на ПК. Стенд оснащен двухканальным микропроцессорным измерителем 2ТРМ1, предназначенным для контроля температуры окружающей среды и температуры на поверхности исследуемого нагревательного элемента с помощью двух термопар хромель–копель.

Результаты и их обсуждение

Из результатов измерений (рис. 5, *а*) следует, что ЭТМ1-1 обладает высоким удельным объемным сопротивлением (более 10^6 Ом·см).

При увеличении массового содержания ТМ1 в ЭТМ1 с 1 до 3 масс. % происходит спад удельного объемного сопротивления. Для ЭТМ1-3 данное значение составляет 55 Ом·см. Дальнейшее увеличение массового содержания ТМ1 в эластомере до 7 масс. % приводит к незначительному снижению удельного объемного сопротивления. Для композитов ЭТМ1-5 и ЭТМ1-7 значение удельного объемного сопротивления составляет 10 и 6 Ом·см соответственно. Увеличение вязкости ЭТМ1 при использовании ТМ1 более 7 масс. % приводит к невозможности формования композитов и получению образцов при исследовании. Для ЭТМ2 порог перколяции по удельному объемному сопротивлению находится в диапазоне 3… 5 масс. %.

Для ЭТМ2-5 значение удельного объемного сопротивления составляет 38 Ом·см, что в 3,8 раза выше, чем для ЭТМ1-5. Пороги перколяции по удельному поверхностному сопротивлению (см. рис. 5, *б*) для ЭТМ1 и ЭТМ 2 находятся в тех же диапазонах массового содержания ТМ1 и ТМ2, что и по удельному объемному сопротивлению. Для ЭТМ1-3 удельное поверхностное сопротивление составляет 444 Ом/□. Самым минимальным удельным поверхностным сопротивлением (43 Ом/□) обладает ЭТМ1-7, что в 2 раза меньше значения для ЭТМ2-7.

Вследствие того, что композиты ЭТМ1-1, ЭТМ2-1 и ЭТМ2-3 имеют высокое удельное электрическое сопротивление, подключение образцов нагревателей ЭТМ1-1, ЭТМ2-1 и ЭТМ2-3 к постоянному напряжению до 15 В не обеспечивает

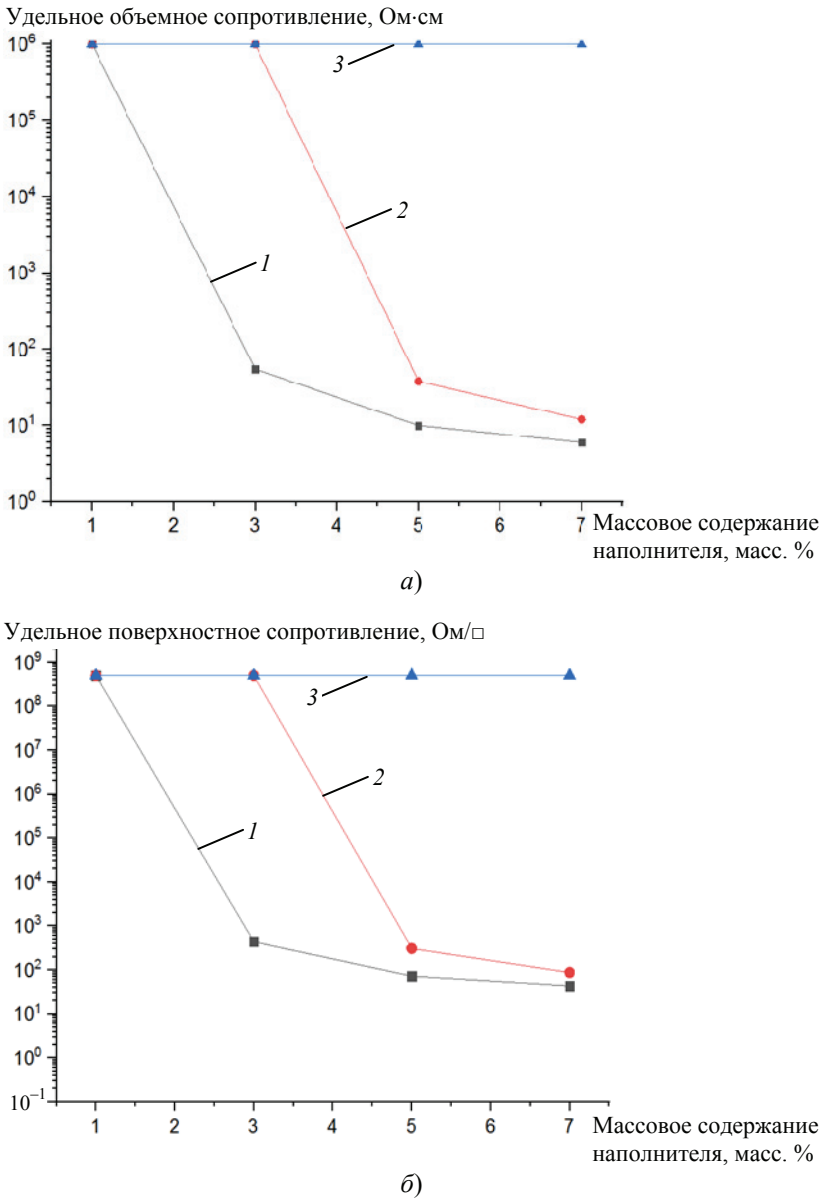

Рис. 5. Графики удельных объемного (*а*) и поверхностного (*б*) сопротивлений ЭТМ:
1 – ЭТМ1; *2* – ЭТМ2; *3* – предел измерения прибора

преобразования электрической энергии в тепловую. Режим работы ОН ЭТМ1-3, ЭТМ1-5 и ЭТМ1-7 сопровождается пусковыми токами (рис. 6, *а*). Для данных композитов значения пусковых токов составляли 30; 7,5 и 14 мА соответственно. После 100 с работы значение тока снижалось и стабилизировалось. Значения тока стабилизации для образцов, мА: ЭТМ1-3 – 7,5; ЭТМ1-5 – 1,3; ЭТМ1-7 – 4,8. Величина питающего напряжения для ОН ЭТМ1 ограничивается массовым содержанием модификатора, увеличение значения которого приводит к уменьшению питающего нагреватель напряжения. Например, для образцов нагревателей ЭТМ1-3, ЭТМ1-5 и ЭТМ1-7 рабочие значения питающего напряжения составляют 12, 9 и 6 В соответственно.

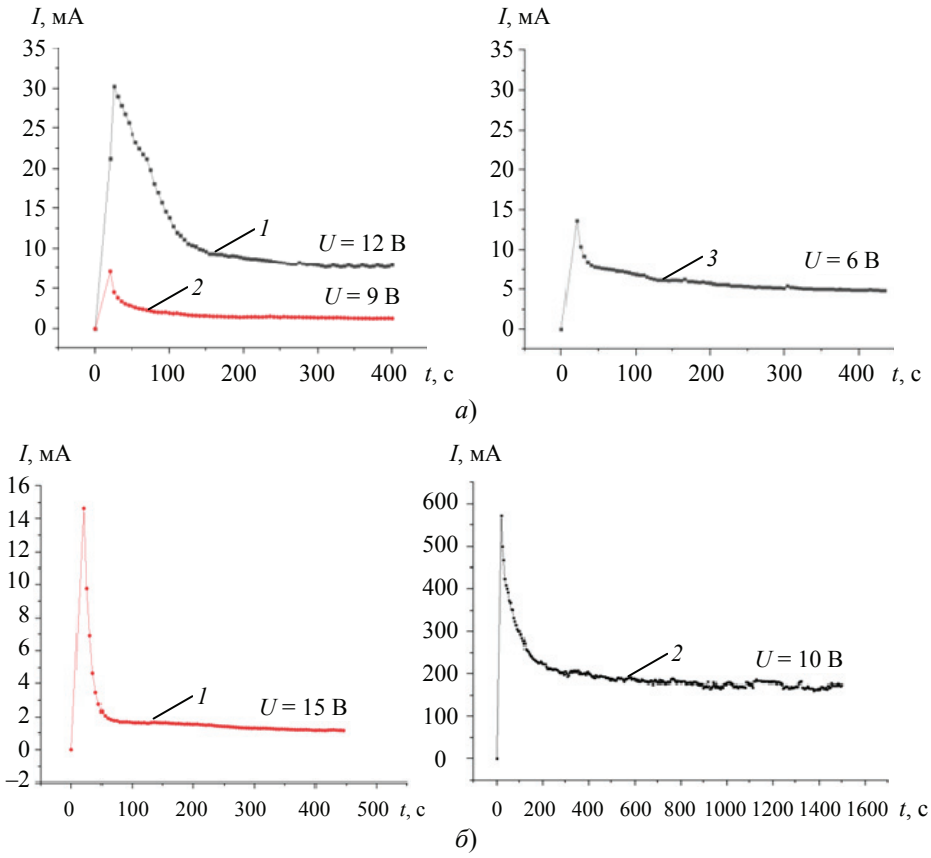

Рис. 6. Графики изменений значения силы тока образцов нагревателей ЭТМ1 (*а*) и ЭТМ2 (*б*) от времени:
а: *1* – ЭТМ1-3; *2* – ЭТМ1-5; *3* – ЭТМ1-7
б: *1* – ЭТМ2-5; *2* – ЭТМ2-7

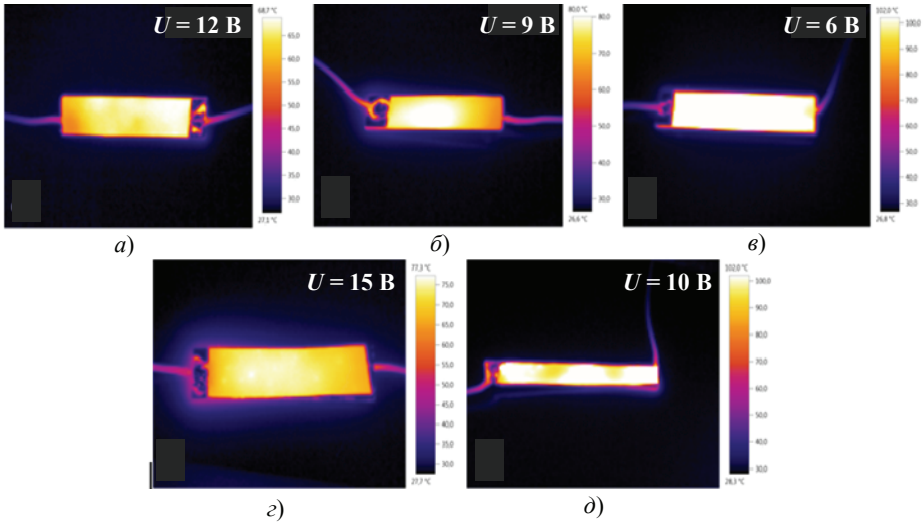

Рис. 7. Температурное поле на поверхности образцов нагревателей ЭТМ1 и ЭТМ2 подключенных к измерительному стенду:
а – ЭТМ1-3; *б* – ЭТМ1-5; *в* – ЭТМ1-7; *г* – ЭТМ2-5; *д* – ЭТМ2-7

Таблица 1

Значения электрической мощности и максимальной температуры на поверхности образцов нагревателей ЭТМ

Содержание УНТ в образцах нагревателей, масс. %	Электрическая мощность, Вт	Максимальная температура нагрева, °С
ЭТМ1		
3	0,0840	65
5	0,0135	80
7	0,1900	100
ЭТМ2		
5	0,0150	75
7	2,0000	100

Аналогичное поведение характеристик наблюдалось и у ОН ЭТМ-2 (см. рис. 6, *б*). Пусковой ток для ОН ЭТМ2-5 и ЭТМ2-7 составлял 14,4 и 575 мА соответственно. Стабилизация значения тока у ОН ЭТМ2-5 происходила за 80 с, ЭТМ2-7 – 575 с. Для образцов ЭТМ2-5 и ЭТМ2-7 ток стабилизации составлял 1,15 и 175 мА соответственно.

Помимо электрофизических характеристик исследованы тепловыделения на поверхности ОН ЭТМ1 и ЭТМ2, подключенных к постоянному напряжению (рис. 7). Из представленных термограмм очевидно, что с увеличением массового содержания УНТ в ОН ЭТМ1 и ЭТМ2, максимальная температура тепловыделений увеличивается.

Подключение ОН ЭТМ к питающему напряжению, значение которого превышает номинальное напряжение питания, приводит к поломке образцов. Все образцы нагревателей демонстрируют равномерность температурного поля на их поверхности – разброс температур не превышает 5 °С. Отметим, что различные типы УНТ с соответствующими концентрациями влияют на значения электрической мощности тепловыделений и соответственно температуру нагрева (табл. 1).

Заключение

Разработана методика модифицирования эластомеров УНТ, синтезированных на двух типах катализаторов: $Fe–Co/_{2,1}Al_2O_3$ и $Co–Mo/Al_2O_3–MgO$. Изготовлены лабораторные образцы электронагревателей формовкой наномодифицированных эластомеров между двумя токоподводящими электродами, выполненными из алюминиевой фольги.

В ходе исследований установлено, что на основе эластомера Силагерм 8030 для изготовления электропроводящего композита, массовое содержание УНТ, синтезированного на катализаторе $Fe–Co/_{2,1}Al_2O_3$, находится в диапазоне 3…7 масс. %; УНТ, синтезированного на другом катализаторе $Co–Mo/Al_2O_3–MgO$ – в диапазоне 5…7 масс. %. Максимальные значения удельного объемного сопротивления для эластомеров, модифицированных 7 масс. % УНТ, синтезированного на катализаторах $Fe–Co/_{2,1}Al_2O_3$ и $Co–Mo/Al_2O_3–MgO$, составляют 12 и 6 Ом·см.

Разработан измерительный стенд, позволяющий исследовать электрофизические параметры образцов нагревателей, изготовленных на основе наномодифицированных эластомеров при постоянном напряжении. С помощью бесконтактного

метода изучены температурные поля на поверхностях образцов нагревателей с различным содержанием УНТ. Установлено, что при низких значениях электрической мощности, образцы нагревателей способны к высокотемпературному нагреву, равному 100 °С.

Выявлено, что при увеличении массового содержания УНТ в эластомере значение максимально возможного питающего напряжения постоянного тока снижается. При превышении данного значения образец нагревателя выходит из строя. Установлено, что нагреватели на основе наномодифицированного эластомера имеют скорость разогрева, равную 0,2…0,5 °С/с. Такие материалы могут быть использованы в различных сферах промышленности, где требуется применение локального обогрева каких-либо устройств.

Список литературы

1. Polymer-Derived Ceramic/Graphene Oxide Architected Composite with High Electrical Conductivity and Enhanced Thermal Resistance / B. Román-Manso [et al.] // Journal of the European Ceramic Society. – 2018. – Vol. 38, No. 5. – P. 2265 – 2271.

2. The Effects of Octadecylamine Functionalized Multi-Wall Carbon Nanotubes on the Conductive and Mechanical Properties of Ultra-High Molecular Weight Polyethylene [Электронный ресурс] / R. Chen [et al.] // Journal of Polymer Research. – 2018. – No. 25. – 6 p. – Режим доступа : https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s10965-018-1533-3.pdf (дата обращения: 28.06.2019).

3. Electrical and Thermal Conductivity of Ethylene Vinyl Acetate Composite with Graphene and Carbon Black Filler / S. Azizi [et al.] // Polymer Testing. – 2018. – Vol. 72. – P. 24 – 31.

4. Электропроводящие полимерные композиции на основе поливинилацетата / М. И. Абдуллин [и др.] // Пластические массы. – 2018. – Т. 1, № 2. – С. 54 – 57.

5. Тарновская, О. Д. Исследование электропроводящих свойств саженаполненных композиций от особенностей введения и типа углеродных нанотрубок / О. Д. Тарновская, А. Н. Таракановская, М. А. Поздняков // Химия и химическая технология в XXI веке : материалы XIX Междунар. науч.-практ. конф. студентов и молодых ученых им. проф. Л. П. Кулёва, 21 – 24 мая, 2018 г., г. Томск. – Томск, 2018. – С. 548 – 549.

6. Комова, Н. Н. Эффект допирования в системе полихлоропрен–шунгит / Н. Н. Комова, Е. Э. Потапов, И. К. Ерастов // European Research : сб. ст. XIV Междунар. науч.-практ. конф.,7 февраля, 2018 г., г. Пенза. – Пенза, 2018. – С. 33 – 36.

7. Electrically Conductive PDMS-Grafted CNTs-Reinforced Silicone Elastomer / J. Kong [et al.] // Composites Science and Technology. – 2018. – Vol. 159. – P. 208 – 215.

8. Щегольков, А. В. Электро- и теплофизические характеристики электрического теплоаккумулирующего нагревателя / А. В. Щегольков, А. С. Юдин // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2013. – Т. 19, № 3. – С. 527 – 531.

9. Электрофизические свойства углеродных наноматериалов / Н. И. Кускова [и др.] // Вестн. Национального техн. ун-та «ХПИ». Сер.: Техника и электрофизика высоких напряжений. – 2016. – № 36 (1208). – С. 52 – 57.

10. Углеродные наноматериалы: новые возможности в биоэлектрокатализе / В. А. Алферов [и др.] // Известия Тульского гос. ун-та. Естественные науки. – 2015. – № 1. – С. 102 – 114.

11. The Study of Operating Parameters of a Graphene Electrode-Based Supercapacitor by the Voltmeter-Ammeter Method / A. V. Shchegolkov [et al.] // Advanced Materials & Technologies. – 2016. – № 3. – С. 53 – 60. doi: 10.17277/amt.2016.03.pp.053-060

12. Клеевая композиция с добавками углеродных наноматериалов для авиационных конструкций на основе полимерных композитов / С. А. Титов [и др.] // Ученые записки Казанского ун-та. Сер.: Физико-математические науки. – 2015. – Т. 157, № 3. – С. 148 – 152.

13. Nanomodified Electroconducting Glue Compositions Based on Polychloroprene Rubber / V. Yagubov [et al.] // AIP Conference Proceedings. – 2018. – Vol. 2041, No. 1. – P. 020026.

14. Anti-Icing and De-Icing Coatings Based Joule's Heating of Graphene Nanoplatelets / O. Redondo [et al.] // Composites Science and Technology. – 2018. – Vol. 164. – P. 65 – 73.

15. Tailoring of the Electrical Properties of Carbon Black–Silica Coatings for De-Icing Applications / E. Enríquez [et al.] // Ceramics International. – 2015. – Vol. 41, No. 2. – P. 2735 – 2743.

16. Особенности получения антиобледенительных покрытий (обзор) / Л. В. Соловьянчик [и др.] // Труды ВИАМ. – 2018. – Т. 6, № 66. – С. 77 – 98. doi: 10.18577/2307-6046-2018-0-6-77-98

17. Ultra-Thin and High-Response Transparent and Flexible Heater Based on Carbon Nanotube Film / Y. Kim [et al.] // Applied Physics Letters. – 2017. – Vol. 110, No. 15. – P. 153301.

18. Ag-Grid/Graphene Hybrid Structure for Large-Scale, Transparent, Flexible Heaters / J. Kang [et al.] // Nanoscale. – 2015. – Vol. 7, No. 15. – P. 6567 – 6573.

The Effect of Various Types and Concentrations of Carbon Nanotubes on the Electrophysical Parameters of Electric Heaters with Self-Regulated Temperature

V. S. Yagubov, A. V. Schegolkov

Department of Equipment and Production Technology of Nanoproducts, vitya-y@mail.ru; TSTU, Tambov, Russia

Keywords: heater; temperature self-regulation; carbon nanotubes (CNTs); volume resistivity; surface resistivity; elastomer.

Abstract: The results of studies of elastomers modified by CNTs synthesized on various types of catalysts are presented. A method has for the manufacture of composites based on elastomers with CNTs been developed. The effect of various mass contents of CNTs in an elastomer on the value of the specific volumetric and surface electrical resistance was studied. It was found that with an increase in the mass content of CNTs in the elastomer, maximum power is achieved at a lower voltage value. Measurements of temperature fields on the surface of heater samples were carried out, during which it was established that the temperature spread on the surface of heater samples does not exceed 5 °C.

References

1. Román-Manso B., Moyano J.J., Pérez-Coll D., Belmonte M., Miranzo P., Osendi M.I. Polymer-Derived Ceramic/Graphene Oxide Architected Composite with High Electrical Conductivity and Enhanced Thermal Resistance, *Journal of the European Ceramic Society*, 2018, vol. 38, no. 5, pp. 2265-2271.

2. https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s10965-018-1533-3.pdf (accessed 28 June 2019).

3. Azizi S., David E., Fréchette M.F., Nguyen-Tri P., Ouellet-Plamondon C.M. Electrical and Thermal Conductivity of Ethylene Vinyl Acetate Composite with Graphene and Carbon Black Filler, *Polymer Testing*, 2018, vol. 72, pp. 24-31.

4. Abdullin M.I., Glazyrin A.B., Basyrov A.A., Gadeyev A.S., Nikolayeva A.A. [Electrically conductive polymer compositions based on polyvinyl acetate], *Plasticheskiye massy* [Plastics], 2018, vol. 1, no. 2, pp. 54-57. (In Russ., abstract in Eng.)

5. Tarnovskaya O.D., Tarakanovskaya A.N., Pozdnyakov M.A. *Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya v XXI veke: materialy XIX Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii studentov i molodykh uchenykh imeni professora L. P. Kulova* [Chemistry and chemical technology in the XXI century: proceedings of the XIX International Scientific and Practical Conference of Students and Young Scientists named after Professor L. P. Kulev], 21-24 May, 2018, Tomsk, 2018, pp. 548-549.

6. Komova N.N., Potapov Ye.E., Yerastov I.K. *European Research: sbornik statey XIV Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [European Research: collection of articles of the XIV International Scientific and Practical Conference], 07 February, 2018, Penza, 2018, pp. 33-36.

7. Kong J., Tong Y., Sun J., Wei Y., Thitsartarn W., Jayven C.C.Y., Muiruri J.K., Wong S.Y., He Ch. Electrically Conductive PDMS-Grafted CNTs-Reinforced Silicone Elastomer, *Composites Science and Technology*, 2018, vol. 159, pp. 208-215.

8. Shchegol'kov A.V., Yudin A.S. [Electro- and thermophysical characteristics of an electric heat-storage heater], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2013, vol. 19, no. 3, pp. 527-531.

9. Kuskova N.I., Rud A.D., Petrichenko S.V., Chelpanov D.I., Tsolin P.L. [Electrical and physical properties of carbon nanomaterials], *Vestnik Natsional'nogo tekhnicheskogo universiteta «KHPI». Seriya: Tekhnika i elektrofizika vysokikh napryazheniy* [Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage], 2016, no. 36 (1208), pp. 52-57.

10. Alferov V.A., Reshetilov A.N., Alferov S.V., Zaytsev N.K. [Carbon nanomaterials: new opportunities in bioelectrocatalysis], *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Yestestvennyye nauki* [Bulletin of Tula State University. Natural Sciences], 2015, no. 1, pp. 102-114.

11. Shchegolkov A.V., Galunin E.V., Shchegolkov (Jr.) A.V., Zyablova A.M., Memetov N.R., Korotkov S.V. The Study of Operating Parameters of a Graphene Electrode-Based Supercapacitor by the Voltmeter-Ammeter Method, *Advanced Materials & Technologies*, 2016, no. 3, pp. 53-60, doi: 10.17277/amt.2016.03.pp.053-060

12. Titov S.A., Vermel' V.D., Kornev Yu.V., Nikitina Ye.A. [Adhesive composition with additives of carbon nanomaterials for aircraft structures based on polymer composites], *Uchenyye zapiski Kazanskogo universiteta. Seriya: Fiziko-matematicheskiye nauki* [Uchenye zapiski Kazan University. Series: Physics and Mathematics], 2015, vol. 157, no. 3, pp. 148-152. (In Russ., abstract in Eng.)

13. Yagubov V., Stolyarov, R., Memetov N., Blokhin A., Tkachev A., Gorshkova A., Moskova M. Nanomodified Electroconducting Glue Compositions Based on Polychloroprene Rubber, *AIP Conference Proceedings*, 2018, vol. 2041, no. 1, pp. 020026.

14. Redondo O., Prolongo S.G., Campo M., Sbarufatti C., Giglio M. Anti-Icing and De-Icing Coatings Based Joule's Heating of Graphene Nanoplatelets, *Composites Science and Technology*, 2018, vol. 164, pp. 65-73.

15. Enríquez E., Fernández J.F., De Frutos J., De la Rubia M.A. Tailoring of the Electrical Properties of Carbon Black–Silica Coatings for De-Icing Applications, *Ceramics International*, 2015, vol. 41, no. 2, pp. 2735-2743.

16. Solov'yanchik L.V., Kondrashov S.V., Nagornaya V.S., Mel'nikov A.A. [Features of obtaining anti-icing coatings (review)], Trudy VIAM [Proceedings of VIAM], 2018, vol. 6, no. 66, pp. 77-98, doi: 10.18577/2307-6046-2018-0-6-77-98 (In Russ., abstract in Eng.)

17. Kim Y., Lee H.R., Saito T., Nishi Y. Ultra-Thin and High-Response Transparent and Flexible Heater Based on Carbon Nanotube Film, *Applied Physics Letters*, 2017, vol. 110, no. 15, p. 153301.

18. Kang J., Jang Y., Kim Y., Cho S.H., Suhr J., Hong B.H., Byun D. Ag-Grid/Graphene Hybrid Structure for Large-Scale, Transparent, Flexible Heaters, *Nanoscale*, 2015,vol. 7, no. 15, pp. 6567-6573.

Die Auswirkung verschiedener Arten und Konzentrationen von Kohlenstoffnanoröhren auf die elektrophysikalischen Parameter der elektrischen Heizgeräte mit Selbstregulierung der Temperatur

Zusammenfassung: Es sind die Ergebnisse von Untersuchungen an Elastomeren vorgestellt, die durch an verschiedenen Katalysatortypen synthetisierten CNTs modifiziert wurden. Die Technik der Herstellung der Verbundwerkstoffe auf der Basis von Elastomeren mit CNT ist entwickelt. Es ist der Einfluss verschiedener Massengehalte von CNTs im Elastomer auf den Wert des spezifischen volumetrischen und elektrischen Oberflächenwiderstands untersucht. Es ist festgestellt, dass mit einer Erhöhung des Massengehalts an CNTs im Elastomer die maximale Leistung bei einem niedrigeren Spannungswert erreicht wird. Es sind Messungen der Temperaturfelder auf der Oberfläche von Heizproben durchgeführt, wobei festgestellt wurde, dass die Temperaturverteilung auf der Oberfläche von Heizproben 5 °C nicht überschreitet.

Influence de différents types et de concentrations des nanotubes de carbone sur les paramètres électrophysiques des radiateurs électriques à régulation automatique de la température

Résumé: Sont présentés les résultats des études des élastomères, NTC modifiés synthétisés sur différents types de catalyseurs. Est élaborée une technique de la fabrication des composites à la base des élastomères avec NTC. Est étudié l'effet de la teneur en masse différente des NTC dans l'élastomère sur la valeur de la résistance électrique volumétrique et superficielle spécifique. Est établi qu'avec une augmentation de la teneur en masse de NTC dans l'élastomère, la puissance maximale est obtenue à une valeur de tension inférieure. Sont effectuées des mesures des champs de température sur la surface des échantillons de chauffage au cours desquelles est établi que la dispersion des températures à la surface des échantillons de chauffage ne dépasse pas 5 °C.

Авторы: ***Ягубов Виктор Сахибович*** – аспирант кафедры «Техника и технологии производства нанопродуктов»; ***Щегольков Александр Викторович*** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Техника и технологии производства нанопродуктов», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

Рецензент: ***Ткачев Алексей Григорьевич*** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Техника и технологии производства нанопродуктов», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.