

НАНОМАТЕРИАЛЫ И НАНОТЕХНОЛОГИИ

NANOMATERIALS AND NANOTECHNOLOGIES

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)

УДК 62-533.65

DOI: 10.18503/1995-2732-2020-18-1-40-48



ТЕПЛОТЫДЕЛЕНИЯ НАНОМОДИФИЦИРОВАННОГО КОМПОЗИТА НА ОСНОВЕ СИЛИКОНА С БИНАРНЫМ НАПОЛНИТЕЛЕМ УНТ-ГРАФИТ

Щегольков А.В., Ягубов В.С.

Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия

Аннотация. Исследования в области создания функциональных наноматериалов являются актуальными и перспективными для развития технологий, где используется преобразование электрической энергии в тепловую. В работе приведены исследования температурных режимов образцов саморегулируемых электронагревателей. Представлена методика изготовления силикона, модифицированного углеродными нанотрубками и графитом, а также технология фиксации электродов, предназначенных для подключения образцов саморегулируемых электронагревателей. Проведено исследование распределения температурного поля на поверхности электронагревателей, выполненных в виде плоских пластин с размерами 50×50×2 и 60×40×2 мм. Исследована динамика постоянного электрического тока, протекающего в электронагревателе, в зависимости от температуры окружающей среды. Установлено, что рабочее напряжение для устройств электронагрева зависит от концентрации углеродных наноструктур и графита. Подобраны концентрации наполнителей, содержащих углеродные наноструктуры, для нагревателей, работающих под напряжением 12 и 24 В постоянного тока. Программная обработка термограмм позволила с помощью гистограмм распределения температур проанализировать температурные режимы для нагревателей с различной концентрацией углеродных наноструктур. Представлены температурные зависимости мощности образцов электронагревателей, работающих под напряжением 12 и 24 В постоянного электрического тока. Для нагревателя, работающего под напряжением 24 В постоянного тока, мощность тепловыделений составила 3 Вт, при этом максимальная температура нагрева доходила до 70°C. Мощность образца нагревателя, работающего под напряжением постоянного тока 12 В, составляла 8,3 Вт. Температурная зависимость мощности образца электронагревателя свидетельствует о нелинейном характере зависимости сопротивления материала нагревателя от температуры и характеризует его как материал с саморегулированием температуры.

Ключевые слова: силикон, углеродные нанотрубки, нагреватель, саморегулирование, температура.

Работа выполнена при финансовой поддержке Фонда содействия инновациям в рамках научного проекта по договору №13748ГУ/2018.

© Щегольков А.В., Ягубов В.С., 2020

Для цитирования

Щегольков А.В., Ягубов В.С. Тепловыделения наномодифицированного композита на основе силикона с бинарным наполнителем УНТ-графит // Вестник Тамбовского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2020. Т.18. №1. С. 40–48. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2020-18-1-40-48>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

HEAT GENERATED BY A NANOMODIFIED COMPOSITE MADE WITH SILICONE AND A CNT/GRAPHITE FILLER

Alexander V. Shegolkov, Viktor S. Yagubov

Tambov State Technical University, Tambov, Russia

Abstract. Research in the field of functional nanomaterials is of relevance for the future development of technologies that are based on electrical-into-thermal energy conversion. This paper describes a study that looked at the temperature regimes of pilot self-regulating electric heaters. The paper describes a technique for the manufacture of silicone modified with carbon nanotubes and graphite, as well as a method for mounting electrodes designed to connect pilot self-regulating electric heaters. A study was conducted to understand the distribution of the temperature field on the surface of electric heaters designed as flat plates with the following dimensions: $50 \times 50 \times 2$ mm and $60 \times 40 \times 2$ mm. The dynamics of the direct electric current flowing in the electric heater was studied in relation to the ambient temperature. It has been established that the operating voltage for electric heaters depends on the concentration of carbon nanostructures and graphite. Concentrations of fillers containing carbon nanostructures were established that would be optimum for 12 and 24 V DC heaters. Through thermogram analysis done with a special software programme, temperature distribution charts were built, and the temperature regimes were analyzed for heaters with different concentrations of carbon nanostructures. Temperature dependences of power are described for the pilot 12 and 24 V DC heaters. For the 24 V DC heater, the heat dissipation power was 3 W, while the maximum heating temperature would reach 70°C . The power of the 12 V DC pilot heater was 8.3 W. The temperature dependence of the heater power indicates a nonlinear dependence between the temperature and the material resistance and characterizes it as a self-regulating material.

Keywords: silicone, carbon nanotubes, heater, self-regulation, temperature.

This research was funded by the Innovation Promotion Foundation under the research project contract No.13748GU/2018.

For citation

Shegolkov A.V., Yagubov V.S. Heat Generated by a Nanomodified Composite Made with Silicone and a CNT/Graphite Filler. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Novos Magnitogorsk State Technical University]. 2020, vol. 18, no. 1, pp. 40–48. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2020-18-1-40-48>

Введение

Электронагреватели нашли широкое применение как в бытовых электроприборах – тепловентиляторах, электроконвекторах, так и в качестве антиобледенительных систем [1] и подогревателей нефти [2]. В основе тепловыделений при протекании электрического тока через материал электронагревателя лежит закон Джоуля-Ленца [3]. Металлические сплавы [4] являются материалами, которые могут быть эффективными при преобразовании электрической энергии в тепловую. Однако нагреватели на основе металлов имеют ряд недостатков, которые проявляются в том, что им свойственны большая масса, ненадежность при эксплуатации [5], а также необходимость использования средств автоматизированного управления. Долгое время, занимаясь поиском новых материалов, отличных от металлов, ученые выяснили, что функциональными свойствами саморегулирования обладают керамические композиты [6–10]. Однако при наличии эффекта саморегулирования такие нагреватели не в полной мере удовлетворяют всем по-

требностям при разработке систем электронагрева, что связано с их хрупкостью и дорогой визной производства.

Основой нового типа нагревателей послужили углеродные материалы, такие как сажа, углеродные нанотрубки (УНТ), графит, графен или их гибриды, которые использовались в качестве наполнителей в нанокompозите для улучшения электропроводности, теплопроводности и механической прочности при одновременном снижении массы готового изделия [11]. Для создания электронагревателей наиболее востребованным электропроводящим наполнителем оказалась углеродная сажа (УС). Однако для достижения порога перколяции в композите необходимо использовать большее количество УС по сравнению с другими углеродными материалами. Порог перколяции достигается при определенном уровне наполнения композита УС, а именно в тот момент, когда между частицами УС образуется контакт [12]. Поэтому, в целях экономии, были предложены УНТ, которые легче УС и

размеры частиц УНТ меньше размеров частиц УС [13–14]. Кроме того, УНТ имеют большую удельную поверхность, что вызывает сильное взаимодействие между УНТ и полимером. Следствием этого является улучшение целого ряда параметров, таких как электропроводность, теплопроводность и механическая прочность нанокompозита по сравнению с композитом, в качестве наполнителя для которого используется УС [15,16]. Однако высокая стоимость УНТ ограничивает их применение в нагревателях. Использование графитовых чешуек в полимерной матрице затруднено из-за слабого взаимодействия с полимером, из-за отсутствия реакционной функциональной группы в базисной плоскости [17]. Как следствие, композиты, наполненные графитом, имеют слабую механическую прочность. Чтобы улучшить пропитку графита в полимерной матрице, необходимо модифицировать графит или использовать терморасширенный графит, восстановленный оксид графита или интеркалированное соединение графита [18,19]. Однако модифицированный графит может обладать низким уровнем электропроводности из-за его дефектной структуры. Решение вопросов, связанных с недостатками углеродных материалов, возможно путем применения их совмещения или создания гибридов: графит-УНТ и восстановленного оксида графита-УНТ [20,21]. В работе [21] электрические и термические свойства нагревателя были улучшены путем добавления небольшого количества УНТ в матрицу полимера, содержащего графит. С другой стороны - важное значение имеет тип полимерной матрицы, так как морфология и природа полимера лимитируют температурные режимы, и формирует максимальное и минимальное значение вводимых концентраций электропроводящей составляющей композита [22–28].

Не для всех типов нагревателей, созданных с применением углеродных наноструктур, свойственен эффект саморегулирования температуры, и в этом отношении с технической точки зрения перспективы имеют нагреватели, изготовленные из материала, который обладает положительным температурным коэффициентом сопротивления (ПТКС).

В связи с этим целью данной работы является разработка наномодифицированного полимера, который может быть использован для изготовле-

ния образцов электронагревателей, обладающих эффектом саморегулирования температуры.

Задачами данной работы являются:

- Модифицировать силиконы с помощью углеродных наноструктур и графита.
- Изготовить лабораторные образцы электронагревателей на основе наномодифицированных силиконов.
- Провести испытания образцов электронагревателей, подключенных к источнику постоянного электрического тока при отрицательных температурах.
- Исследовать распределение температурных полей на поверхности плоских образцов электронагревателей.

Материалы и методы исследования

В качестве полимерной матрицы для нагревателей использовали силиконовый компаунд «Силагерм 8030» (ООО «ЭЛЕМЕНТ 14», Москва, Россия). Компаунды состояли из компонентов А и Б, для смешения которых использовали соотношение 1/1. В качестве электропроводящей дисперсной фазы использовали МУНТ марки «Таунит» (ООО «НаноТехЦентр», Тамбов, Россия) (УНТ) и чешуйчатый графит (ЧГ) (РОСГРАФИТ, Свердловская область, Россия). Для взвешивания компонентов композита использовали аналитические весы «ОНАУС Pioneer PA» (Чанджоу, Китай) с точностью 0,00001 г. Приготовление наномодифицированных композитов производили по схеме, представленной на **рис. 1**.

Сыпучие углеродные материалы диспергировали в компоненте А. Для этого в емкость объемом 100 мл вливали расчетное количество компоненты А и вносили: УНТ и ЧГ. После чего производили смешивание в течение 20 мин при частоте вращения смесителя 1000 об/мин. Далее смесь перемешивали с помощью фторопластового гомогенизатора. Затем гомогенизированную смесь модификаторов с компонентом А смешивали с компонентом Б в течение 5 мин с частотой вращения перемешивающего устройства 5 мин. Итоговая стадия заключалась в том, что смесевой композит помещали в вакуумный шкаф «ВТШ-К52-250» (Фрязино, Россия) на 10 мин под разряжение 0,1 МПа. Это позволяло убрать воздушные включения из композита, образовавшиеся во время смешивания. Вакуумированный композит формовали между двумя токоподводящими электродами по схеме, представленной на **рис. 2**.

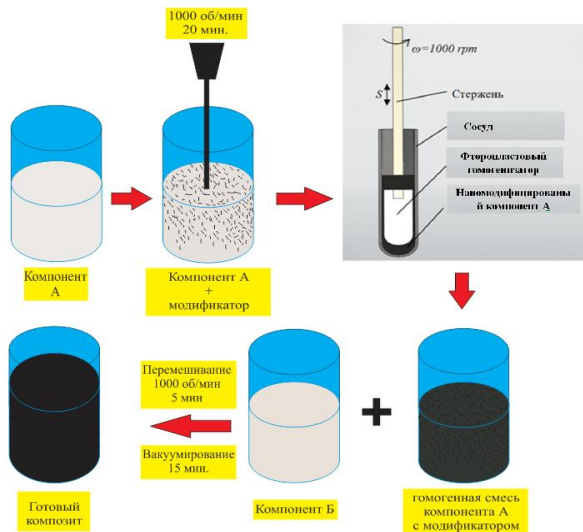


Рис. 1. Схема изготовления композита для образцов электронагревателей

Fig. 1. Composite for pilot electric heaters: Production process flow chart

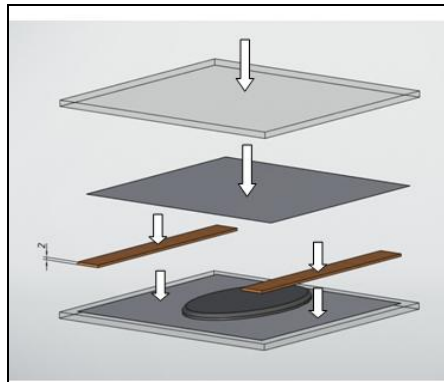


Рис. 2. Формовка наномодифицированного композита между двумя токоподводящими электродами

Fig. 2. Nanomodified composite built between two conducting electrodes

Формовка композита и электродов заключалась в том, что на нижнее стекло с размерами $200 \times 200 \times 5$ мм укладывали алюминиевую фольгу толщиной 100 мкм (ООО «Уральская

фольга», Михайловск, Россия), на которую наносили наномодифицированный композит (функциональную основу нагревателя). Толщина наномодифицированного композита обеспечивалась с помощью ограничителей в виде стеклянных пластин толщиной 2 мм. После этого композит накрывали вторым листом алюминиевой фольги. На второй лист алюминиевой фольги устанавливали идентичное первому второе стекло, на котором размещали груз массой 50 кг. Представленная технология позволяет изготавливать лабораторные образцы электронагревателей с максимальной площадью 180×180 мм.

Применение плоских стекол в качестве формообразующих поверхностей позволило изготавливать образцы нагревателей с равномерной толщиной, что являлось одним из очень важных параметров, влияющих на равномерность разогрева образцов электронагревателей.

С помощью эксперимента были подобраны концентрации модификаторов для получения лабораторных образцов электронагревателей под питающее напряжение 12–24 В постоянного электрического тока. Состав композитов представлен в **таблице**.

Поворот зерен после первого и второго отжигов

Grain rotation after the 1st and 2nd heat treatment cycles

№ п/п	Величина питающего напряжения постоянного, В	Массовое содержание модификатора
1	12	15 масс. % УНТ + 14 масс.% ЧГ
2	24	14,5 масс. % УНТ + 11 масс.% ЧГ

Для безопасности исследований все образцы электронагревателей были изолированы с помощью клейкой пленки 1 (рис. 3) «ORACAL 640» («ООО ПЛАСТТОРГ», Тамбов, Россия). Для подвода электрического напряжения к исследуемым пластинам припаивали медные электропровода 2 (см. рис. 3) с поперечным сечением 1,5 мм с помощью припоя «ПОС-60».

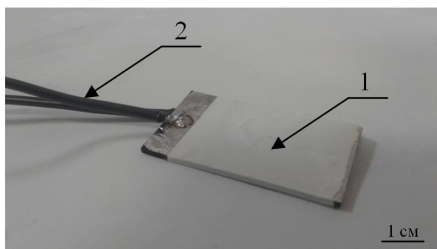


Рис. 3. Образец лабораторного электронагревателя с токоподводящими электродами

Fig. 3. A pilot laboratory electric heater with conducting electrodes

Методика подключения образцов электронагревателей к электрическому току

Для исследования нагревателей разработан автоматизированный измерительный стенд, который позволял производить исследования как на постоянном, так и на переменном электрическом токе.

В качестве регулируемого источника переменного тока использовали лабораторный автотрансформатор «Ресанта ЛАТР TDGC2-3» (Москва, Россия) с выходным напряжением от 0 до 220 В и шагом регулирования 1 В. Для измерения тока и напряжения использовали мультиметры «UNI-T UT61E» (Дунгуань, Китай) и «WH5000» (Чжанчжоу, Китай) с USB и COM интерфейсами. Это позволило в режиме реального времени производить запись замеров электрофизических параметров образцов элек-

тронагревателей на ПК на базе процессора «Intel Xeon E5450» с 12 МБ кэш-памяти и тактовой частотой 3,00 ГГц. Частота системной шины 1333 МГц. Для температурных измерений использован прибор «2ТРМ1» (ОВЕН, Москва, Россия) с двумя термодатчиками «ХК».

Для исследования электрофизических параметров образцов нагревателей под постоянным напряжением использовали диодный мост «GBL04-E3/51» («Vishay», США) с максимальным постоянным обратным напряжением 400 В и максимальным прямым (выпрямленный за полупериод) током 4 А.

Внешний вид измерительного стенда в работе представлен на рис. 4.



Рис. 4. Измерительный стенд

Fig. 4. Measuring bench

Методика исследования электрофизических характеристик образцов нагревателей при отрицательных температурах

Для исследования электрофизических характеристик образцов нагревателей при отрицательных температурах предназначена установка, показанная на рис. 5. Установка содержит охлаждаемую камеру 1. Получение низких температур основывалось на теплообменной системе с жидким азотом (N₂), генерированным в ожижители азота Elan2 («ООО Криотрейд инжиниринг», Москва, Россия). Жидкий азот заливали в емкость 2, изготовленную из меди. Емкость 2 имела тепловой контакт с емкостью 1, для улучшения теплопроводности использовали теплопроводящую пасту «КИП-8» (Рязань, Россия) с теплопроводностью 0,65 Вт/м·°С. В целях снижения интенсивности испарения N₂ в окружающую среду емкость 2 закрывали крышкой 3, изготовленной из теплоизоляционного материала. С целью устранения контакта с окружающей средой камеру 1 и емкость 2 упаковывали в теплоизоляционный материал 4 – пенопласт. Корпус установки 5 изготавливали из оцинкованного металла толщиной 1,5 мм посредством клеп-

ки. Внутри камеры устанавливали температурный датчик 6, который связан с цифровым термометром, установленным на лицевой панели установки. Испытуемый образец нагревателя 8 располагали на подставке 7, установленной внутри камеры 1.

Для исследования распределения температурного поля использовали бесконтактный метод измерения, который реализован в тепловизоре «Testo 875-1» (Шварцвальд, Германия). Получаемые термограммы обрабатывали в программном обеспечении (ПО) «IR Soft 3.4». Построение графиков экспериментальных данных и их обработку производили с помощью ПО «OriginPro 2018».

Результаты и их обсуждения

Проведенные исследования позволили уста-

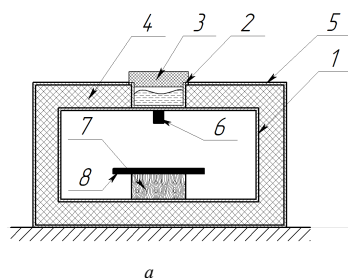


Рис. 5. Установка для испытания электронагревателей при отрицательных температурах: а – схема установки; б – общий вид установки

Fig. 5. A bench for testing electric heaters at subzero temperatures: a – Sketch of the bench; b – General view of the bench

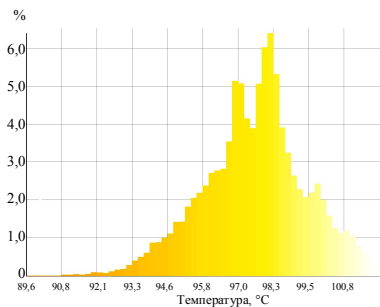
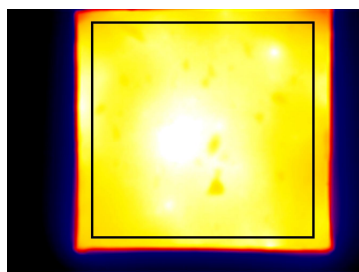


Рис. 6. Термограмма саморегулируемого нагревателя работающего под напряжением 12 В постоянного электрического тока: а – тепловизионная съемка образца нагревателя, б – гистограмма распределения температуры по площади

Fig. 6. Thermogram of the self-regulating 12 V DC heater: a – Thermal imaging of the pilot heater, b – Temperature distribution chart

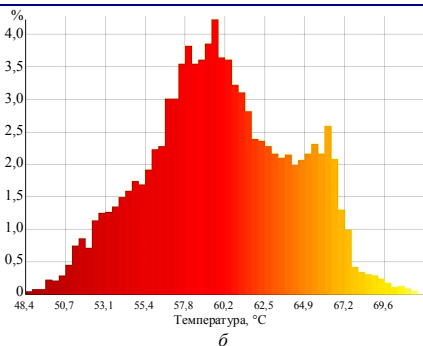
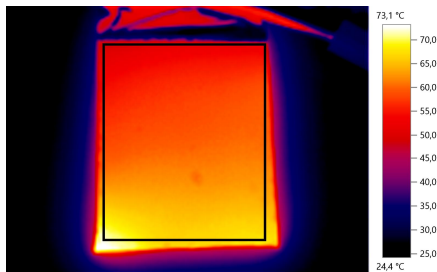


Рис. 7. Термограмма саморегулируемого нагревателя, работающего под напряжением 24 В постоянного электрического тока

Fig. 7. Thermogram of the self-regulating 24 V DC heater

Согласно анализу температуры на поверхности образца нагревателя, работающего под напряжением 24 В постоянного электрического тока (рис. 7,а), максимальная температура составляла 71,6°C, минимальная 49,6°C. Среднее значение температуры – 60,2°C. Скорость нагрева образца составляла 0,25 мин.

Из анализа гистограммы распределения температур по площади, соответствующей выделенной области нагревателя (рис. 7,б), 4,2% площади занимают участки с температурой 60,2°C. Результаты исследований образцов нагревателей при отрицательных температурах показывают, что с понижением температуры увеличивается значение мощности нагревателя, работающего под напряжением 12В постоянного электрического тока (рис. 8).

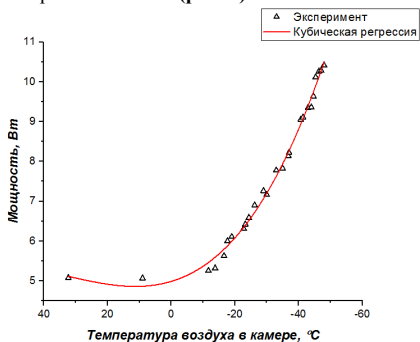


Рис.8. Температурная зависимость мощности образца электронагревателя, работающего под напряжением 12В постоянного электрического тока

Fig. 8. Temperature dependence of power in the pilot 12 V DC heater

При охлаждении образца нагревателя с 32 до минус 50°C его мощность менялась с 5 до 10,5 Вт. Данное изменение аппроксимировали кубической регрессионной моделью.

$$y = A + Bx + Cx^2 + Dx^3. \quad (1)$$

В результате обработки экспериментальных данных были определены коэффициенты А,В,С и D, значения которых подставляли в уравнение (1), тем самым получая зависимость изменения мощности нагревателя (P) от температуры (t) окружающей среды.

$$P(t) = 4,98 - 2 \times 10^{-2}t + 1,28 \times 10^{-3}t^2 - 1,28 \times 10^{-5}t^3. \quad (2)$$

Коэффициенты корреляции (R) и детерминации (R²) равны 0,997 и 0,994 соответственно. Средняя ошибка аппроксимации (\bar{A}) составляет 1,68%.

Схожий рост мощности демонстрировал образец нагревателя, работающий под напряжением 24В постоянного электрического тока. При охлаждении образца нагревателя с 20 до минус 50°C его мощность возрастала с 1,5 до 8,5 Вт

Зависимость мощности нагревателя от температуры окружающей среды описывает уравнение с R= 0,997 и R²= 0,995 соответственно. $\bar{A} = 3,06\%$.

$$P(t) = 1,8 - 3,01 \times 10^{-2}t + 1,38 \times 10^{-3}t^2 - 1,38 \times 10^{-5}t^3 \quad (3)$$

Используя аппроксимационные зависимости (2) и (3), можно спрогнозировать значение мощности электронагревателя в температурном диапазоне от 20 до минус 50°C.

Температурная зависимость мощности образца электронагревателя свидетельствует о

нелинейном характере зависимости сопротивления материала нагревателя от температуры и характеризует его как материал с саморегулированием температуры (рис. 9).

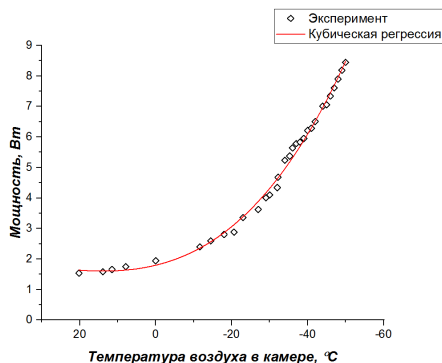


Рис. 9. Температурная зависимость мощности образца электроннагревателя, работающего под напряжением 24 В постоянного электрического тока, при его охлаждении в камере

Fig. 9. Temperature dependence of power in the pilot 24 V DC heater during chamber cooling

Заключение

Проведенные исследования показали, что рабочее напряжение для электроннагревателей зависит от концентрации углеродных наноструктур и графита. В ходе работы подобрано оптимальное массовое содержание углеродных наноструктур и графита в силиконе для нагревателей, работающих под напряжением 12, 24 В постоянного электрического тока. Это композиты, со-

держащие 15 масс. % углеродных наноструктур + 14 масс.% чистого графита и 14,5 масс. % углеродных наноструктур + 11 масс.% чистого графита соответственно. Согласно гистограмме распределения температур по площади, соответствующей выделенной области нагревателя, 4,2% площади занимают участки с температурой 60,2°C. Образец нагревателя, работающий под напряжением 24 В постоянного тока, имел размеры 60×40×2 мм. Мощность данных нагревателей составляла 3 Вт, при этом максимальная температура нагрева составляла 70°C. Мощность образца нагревателя работающего под напряжением постоянного тока 12 В составляла 8,3 Вт. Размер образца нагревателя составлял 50×50×2 мм. При этом в выделенной области термограммы образца нагревателя минимальная температура нагрева составляла 87,1°C, максимальная 102°C. Среднее значение температуры составляло 97,5°C. Согласно гистограмме распределения температур по площади, соответствующей выделенной области нагревателя, 6% площади занимают участки с температурой 98°C. Время нагрева образца нагревателя до средней температуры 102,5°C составляла 0,3 мин. При охлаждении образца нагревателя с 32 до минус 50°C его мощность менялась с 5 до 10 Вт.

Исследован рост мощности нагревателя при снижении температуры (при охлаждении образца нагревателя с 20 до минус 50°C его мощность возрастала 1,5 до 8,5 Вт), что является следствием эффекта саморегулирования при напряжениях 12 и 24 В постоянного электрического тока.

Список литературы

References

1. X. Yao, S.C. Hawkins, B.G. Falzon. Carbon. 136, 130 (2018). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2018.04.039>.
2. Z. Wang, D. Gao, B. Diao, L. Tan, W. Zhang and K. Liu. Appl. Therm. Eng. 160, 114105 (2019). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114105>.
3. J. Kang, H. Kim, K.S. Kim, S.K. Lee, S. Bae, J.H. Ahn, Y.J. Kim, J.B. Choi, B.H. Hong. Nano Lett. 11 (12) 5154 (2011). DOI: <https://doi.org/10.1021/nl202311v>.
4. K.T.L. Trinh, W. Wu, N.Y. Lee. Sensor. Actuat. B-Chem. 190, 177 (2014). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.snb.2013.08.056>.
5. T.K. Hei, J.D. Raal. AIChE J. 55 (1) 206 (2009). DOI: <https://doi.org/10.1002/aic.11685>.
6. M. Nakahara, T. Murakami. J. Appl. Phys. 45 (9), 3795 (1974). DOI: 10.1063/1.1663862.
7. D. Mächler, R. Schmidt, J. Töpfer. J. Alloy. Compd. 762, 209 (2018). DOI: 10.1016/j.jallcom.2018.05.049.
8. S. Chatterjee, B.D. Stojanovic, H.S. Maiti. Mater. Chem. Phys. 78 702 (2003). DOI: [https://doi.org/10.1016/S0254-0584\(02\)00381-4](https://doi.org/10.1016/S0254-0584(02)00381-4).

9. V. Paunović, V. Mitić, V. Pavlović, M. Miljković, L. Živković. *Process. Appl. Ceram.* 4 253 (2010).
10. M.M. Vijatović Petrović, J.D. Bobić, R. Grigalaitis, B.D. Stojanović, J. Banys. *Acta Phys. Pol. A.* 124 155 (2013). DOI: 10.12693/APhysPolA.124.155.
11. J.R. Potts, D.R. Dreyer, C.W. Bielawski, R.S. Ruoff. *Polymer.* 52 (1) 5 (2011). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2010.11.042>.
12. F. El-Tantawy, K. Kamada, H. Ohnabe. *Mater. Lett.* 56 (1–2) 112 (2002). DOI: [https://doi.org/10.1016/S0167-577X\(02\)00401-9](https://doi.org/10.1016/S0167-577X(02)00401-9)
13. A. Celzard, E. McRae, C. Deleuze, M. Dufort, G. Furdin, J.F. Mareche. *Phys. Rev. B* 53 (10) 6209 (1996). DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.53.6209>
14. S.H. Munson-McGee. *Phys. Rev. B* 43 (4) 3331 (1991). DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.43.3331>
15. S. Isaji, Y. Bin, M. Masaru. *Polymers.* 50 (4) 1046 (2009). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2008.12.033>.
16. S. Ghosh, S. Dutta, E. Gomes, D. Carroll, R. D'Agostino, J. Olson, M. Guthold, W.H. Gmeiner. *ACS Nano.* 3 (9) 2667 (2009). DOI: <https://doi.org/10.1021/nn900368b>.
17. R. Sengupta, M. Bhattacharya, S. Bandyopadhyay, A.K. Bhowmick. *Prog. Polym. Sci.* 36 (5) 638 (2011). DOI: <https://doi.org/10.1021/nn900368b>.
18. A. Yoshida, Y. Hishiyama, M. Inagaki. *Carbon.* 29 (8) 1227 (1991). DOI: [https://doi.org/10.1016/0008-6223\(91\)90040-P](https://doi.org/10.1016/0008-6223(91)90040-P).
19. G.C. Chung, H.J. Kim, S.I. Yu, S.H. Jun, J.W. Choi, M.H. Kim, *J. Electrochem. Soc.* 147 (12) 4391 (2000). DOI: 10.1149/1.1394076.
20. A.S. Patole, S.P. Patole, S.Y. Jung, J.B. Yoo, J.H. An, T.H. Kim. *Eur. Polym. J.* 48 (2) 252 (2012). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2011.11.005>.
21. S.R. Dhakate, S. Sharma, N. Chauhan, R.K. Seth, R.B. Mathur. *Int. J. Hydrogen Energy* 35 (9) 4195 (2010). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.02.072>.
22. S.P. Bao, G.D. Liang, S.C. Tjong. *IEEE Trans Nanotechnol.* 8 (6) 729 (2009). DOI: 10.1109/TNANO.2009.2023650.
23. J.H. Lee, S.K. Kim, N.H. Kim. *Scripta Mater.* 55 (12) 1119 (2006). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2006.08.051>.
24. Sabet M., Soleimani H. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 64 012001 (2014). DOI: 10.1088/1757-899X/64/1/012001.
25. L. Yang, S. Lia, X. Zhou, J. Liu, Y. Lia, M. Yang, Q. Yuan, W. Zhang. *Synthetic Met.* 253 122 (2019). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.synthmet.2019.05.008>
26. B.G. Soares, L.F. Calheiros, A.A. Silva, T. Indrusiak, G.M. Barra, S. Livi. *J. Appl. Polym. Sci.* 135 (24) 45564 (2018). DOI: <https://doi.org/10.1002/app.45564>.
27. A. Gao, F. Zhao, F. Wang, G. Zhang, S. Zhao, J. Cui, Y. Yan. *Compos. Part A-Appl. S.* 122 1 (2019). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2019.04.019>.
28. S.K. Jain, Y. Tadesse. *Int. J. Nanosci. Ser.* 18 (05) 1850026 (2018). DOI: <https://doi.org/10.1142/S0219581X18500266>.

Поступила 13.11.2019; принята к публикации 20.01.2020; опубликована 25.03.2020
Submitted 13/11/2019; revised 20/01/2020; published 25/03/2020

Щегольков Александр Викторович – канд. техн. наук, доцент,
Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия. ORCID 0000-0002-4317-0689

Ягубов Виктор Сахибович – аспирант
Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия. E-mail: vitya-y@mail.ru.
ORCID 0000-0003-4855-0530

Alexander V. Shchegolkov – PhD, Associate Professor
Tambov State Technical University. ORCID 0000-0002-4317-0689

Viktor S. Yagubov – Graduate Student
Tambov State Technical University. E-mail: vitya-y@mail.ru. ORCID 0000-0003-4855-0530