

## Исследование тепловыделений в наномодифицированных эластомерах при растяжении и кручении под действием электрического напряжения

© 2022

*Щегольков Александр Викторович*<sup>\*1</sup>, кандидат технических наук, доцент,  
доцент кафедры «Техника и технологии производства нанопроductов»

*Щегольков Алексей Викторович*<sup>2</sup>, аспирант кафедры «Техника и технологии производства нанопроductов»

*Земцова Наталия Викторовна*<sup>3</sup>, аспирант кафедры «Техника и технологии производства нанопроductов»  
Тамбовский государственный технический университет, Тамбов (Россия)

\*E-mail: [Energynano@yandex.ru](mailto:Energynano@yandex.ru)

<sup>1</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4317-0689>

<sup>2</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1838-3842>

<sup>3</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5274-6133>

Поступила в редакцию 08.11.2021

Принята к публикации 06.06.2022

**Аннотация:** Проведено исследование эластомеров, модифицированных углеродными нанотрубками (МУНТ) с массовой концентрацией от 1 до 8 масс. %. Исследованы режимы тепловыделений наномодифицированных эластомеров в диапазоне от 30 до 260 В (переменного электрического тока) при различном уровне растяжения и кручения. Для образцов эластомеров с концентрацией МУНТ от 1 до 5 масс. % в диапазоне питающего напряжения до 260 В не было процесса тепловыделения. Установлено, что тепловыделения при питании композитов эластомеров с МУНТ наблюдаются при массовой концентрации, равной 6 масс. % МУНТ, и напряжении питания 70 В. Максимальное значение напряжения для образца эластомера с 6 масс. % МУНТ доходит до 260 В. Увеличение концентрации до 7 масс. % приводит к повышению мощности тепловыделений и снижению предельного уровня питающего напряжения до 180 В, при этом начальное напряжение тепловыделений составляет 40 В. При концентрации, равной 8 масс. %, мощность увеличивается и предельное напряжение падает до 100 В, а начальное напряжение устанавливается на уровне 36 В. Выявлено, что при кручении эластомера на 360° формируются участки с повышенной температурой справа и в центральной зоне образца (49,5 °С). При кручении на 540° происходит увеличение температуры в месте сгиба до 50,2 °С. Увеличение угла скручивания до 1080° приводит к формированию участков с повышенной температурой около правого токоподводящего зажима. Стоит отметить возможность применения полученных образцов эластомеров с МУНТ в качестве чувствительных элементов датчиков деформации, что позволит получать информацию о физических и химических параметрах в соответствии с принципами измерения изменения электрического сопротивления, которое возникает при растягивании и кручении.

**Ключевые слова:** многослойные углеродные нанотрубки (МУНТ); эластомер; кремнийорганический компаунд; наномодифицированные эластомеры.

**Благодарности:** Работа выполнена при финансовой поддержке в рамках Соглашения № 10-МУ-20 о поддержке победившего проекта № 23-МУ-20 (02) областного конкурса «Гранты для поддержки прикладных исследований молодых ученых 2020 года».

**Для цитирования:** Щегольков А.В., Щегольков А.В., Земцова Н.В. Исследование тепловыделений в наномодифицированных эластомерах при растяжении и кручении под действием электрического напряжения // *Frontier Materials & Technologies*. 2022. № 2. С. 121–132. DOI: 10.18323/2782-4039-2022-2-121-132.

### ВВЕДЕНИЕ

Расширение функциональных возможностей электронных устройств в современной микроэлектронике связано с применением электропроводящих гибких материалов. Такие материалы могут использоваться в биомедицинской инженерии, а именно в мониторинге параметров сердцебиения и человеко-машинных интерфейсах. Новые наноматериалы и технологии nanoиндустрии улучшили возможности устройств гибкой электроники. Гибкая электроника базируется на устройствах, которые включают в себя электронные материалы, интегрированные на гибкой подложке. По сравнению с печатными платами на жесткой основе, гибкие электронные схемы обладают способностью механически изгибаться, скручиваться, сжиматься и растягиваться в результате использования эластичных материалов (подложки).

В качестве эластичных материалов могут быть использованы полимеры, относящиеся к классу эласто-

меров. Эластомеры находят разнообразное применение, так как в них реализуются принципиально новые возможности, связанные с обратимым преобразованием внешнего механического воздействия – растяжения, сжатия и кручения в электрические сигналы, или импульсы [1; 2].

Датчики деформации (тензодатчики), основанные на использовании эластичных проводящих полимеров, позволяют получать информацию о физических и химических параметрах как объектов, так и окружающей среды. Тензодатчики работают на принципах измерения изменения электрического сопротивления или емкости, которое возникает при растяжении, сжатии и кручении. Примером тензодатчика является эластомер AgNWs [2], для которого растяжение вызывает проскальзывание наполнителей и разъединения между соседними проводящими наполнителями и приводит к потере перколяционной сети, влияющей на увеличение удельного сопротивления.

Электротермическое преобразование, присущее гибким электропроводящим полимерам [3; 4], может быть использовано для обогрева поверхностей со сложным рельефом. Электропроводящие сети в эластичных полимерных матрицах могут быть получены с использованием углеродных нанотрубок (УНТ) [5], графена [6] или оксида олова, легированного фтором ( $\text{SnO}_2\text{:F}$  или FTO), с металлическими наноточками (Cr-nd, NiCr-nd и Ni-nd) [7]. В работе [8] было установлено, что свойства эпоксидной смолы, модифицированной УНТ, зависят от природы наполнителя УНТ, морфологии, распределения и взаимосвязей. С целью получения электрического нагревателя в работе [9] использовали графен и ПВС (поливиниловый спирт). Температура нагрева для ПВС с графеном достигала  $60^\circ\text{C}$  при напряжении 10 В за 180 с. Для получения гибкого нагревателя в работе [10] использовали полиуретановую матрицу. Однако большинство этих гибких нагревателей не растягивались [7], а полиуретановая матрица [10] демонстрировала снижение мощности нагрева при растяжении из-за разрушения проводящей сети. Фактически выбор проводящих наполнителей и полимерной матрицы имеет большое значение для обеспечения тензометрических свойств.

Графен является эффективным дисперсным электропроводящим материалом [11], способным улучшить электропроводность и теплопроводность полимеров [12], а также придать дополнительные функциональные свойства [13]. Главное преимущество графеновых материалов – их универсальность и многофункциональность. Устройства, основанные на графене или графеновых композитах, могут использоваться для многомерных измерений (например, деформации, температуры, давления и магнитного поля) [12]. В [14] были разработаны нанокомпозиты на основе оксида графита и натурального каучука по технологии предварительного смешивания, приводящей к коагуляции каучука, с ультразвуковым контролем и последующим применением двухвалковой прокатной мельницы, что существенно улучшило свойства проводящего композита.

Следует учитывать, что различные концентрации МУНТ (многослойных углеродных нанотрубок) также оказывают влияние на термическую стабильность нагревателей на основе наномодифицированных полимеров [15]. При растяжении полимеров, содержащих МУНТ, последние подвергаются механическому растяжению, что влияет на различные параметры наномодифицированных материалов [16].

Электронагреватели на основе кремнийорганических эластомеров, представленные в работах [17–19], обладают свойствами, обеспечивающими устойчивое тепловыделение при питании от источника постоянного тока с реализацией эффекта саморегулирования температуры. Влияние кручения с разными углами закручивания (от  $0$  до  $900^\circ$ ) для наномодифицированного эластомера на значение его электропроводности исследовано в [20], где установлен скачкообразный характер изменения электропроводности. В работе [19] установлено, что использование МУНТ, синтезированных по CVD-технологии с применением катализатора  $\text{Co-Mo/Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$ , приводит как к повышению объемной электропроводности, так и к улучшению равномерности распределения температурного поля композита.

Практика использования гибких электронагревателей на основе полимеров, модифицированных УНТ, показана в работе [21]. В качестве объекта электронагрева была использована аккумуляторная батарея. Стоит учесть, что низкий уровень питающего напряжения (2 В) [21] делает применение таких нагревателей неэффективными из-за высокого значения тока, который потребует для увеличения мощности (в частности, для мощности, равной 100 Вт, значение силы тока составит 50 А), что может привести к выходу из строя как самого нагревателя, так и элементов токоподвода, а также к усиленному старению изоляции питающих проводов.

Цель работы – исследование тепловыделений в наномодифицированных эластомерах с концентрацией МУНТ от 1 до 8 масс. % при их питании от источника переменного электрического тока в диапазоне от 6 до 250 В при растяжении и кручении под действием электрического напряжения.

## МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

### Порядок исследования

Исследование включало 4 этапа:

- 1) изготовление образцов электропроводящих наномодифицированных эластомеров с массовой концентрацией 1 до 8 масс. % (геометрические параметры: длина 100 мм, ширина 12 мм, толщина 1,5 мм);
- 2) исследование морфологии МУНТ с помощью СЭМ- и ПЭМ-методов и наномодифицированных эластомеров на рамановском микроскопе;
- 3) исследование электрофизических свойств наномодифицированных эластомеров с применением источников питания с возможностью регулировать напряжение;
- 4) исследование тепловыделений с помощью бесконтактного метода измерения температуры в электропроводящих наномодифицированных эластомерах при растяжении и кручении под действием электрического напряжения в диапазоне от 6 до 250 В.

### Изготовление электропроводящих наномодифицированных эластомеров

В качестве полимерной матрицы эластомера использовали кремнийорганический компаунд «Силагерм 8030» (ООО «ЭЛЕМЕНТ 14», Москва, Россия). В качестве электропроводящей добавки в матрицу эластомера применялись МУНТ, синтезированные по CVD-технологии с применением катализатора  $\text{Co-Mo/Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$ .

Для удаления влаги из МУНТ перед введением в эластомер использовали вакуумный термощкаф «ВТШ-К52-250» при температуре  $110^\circ\text{C}$ .

Компонент (А) – кремнийорганический компаунд и МУНТ смешивали на верхнеприводной механической мешалке WiseStir HT 120DX (Корея) при 200 об/мин в течение 20 мин. Далее в смесь вводили второй компонент на основе платины (Pt), обеспечивающий полимеризацию (В), с последующим перемешиванием в течение 10 мин при температуре  $22^\circ\text{C}$ . Концентрация МУНТ в эластомере изменялась от 1 до 8 масс. % с шагом в 1 %. Длина образца эластомера с МУНТ 100 мм, ширина 12 мм, толщина 1,5 мм (рис. 1).



a



b

**Рис. 1.** Лабораторная установка для исследования растяжения и кручения наномодифицированного эластомера:

*a* – подвижные зажимы с электропроводящим наномодифицированным эластомером;

*b* – скрученные между собой три полоски эластомера с разъемным питанием

**Fig. 1.** Laboratory unit for the study of tension and torsion of nanomodified elastomer:

*a* – movable clamps with electrically conductive nanomodified elastomer;

*b* – three strips of elastomer with a split power supply twisted together

Обозначения эластомеров, модифицированных МУНТ, приведены в таблице 1.

**Таблица 1.** Обозначения эластомеров, модифицированных МУНТ

**Table 1.** Designations of MWCNT-modified elastomers

Массовое содержание МУНТ в эластомере, %	Обозначение эластомера на основе кремнийорганического компаунда
1	НКОК 1
2	НКОК 2
3	НКОК 3
4	НКОК 4
5	НКОК 5
6	НКОК 6
7	НКОК 7
8	НКОК 8

#### Методика исследования морфологии МУНТ и наномодифицированных эластомеров

Морфологию МУНТ исследовали с помощью микроскопа Hitachi H-800 (Hitachi, Япония) (СЭМ, ПЭМ). Картирование поверхности наномодифицированных эластомеров проводилось на рамановском микроскопе

DXR (Raman Microscope Thermo Scientific). Длина волны возбуждающего лазера составляла 532 нм.

#### Методика исследования электрофизических свойств образцов наномодифицированных эластомеров

В качестве источника питания использовался лабораторный автотрансформатор (ЛАТР) («Ресанта ЛАТР TDGC2-3», Москва, Россия), с помощью которого возможно изменять питающее напряжение в диапазоне от 0 до 260 В. Для измерения напряжения и значения силы тока использовался анализатор качества электрической энергии Fluke 43В (Fluke, Германия). Измерение удельной объемной электропроводности проводили по методике ГОСТ Р 50499-93 (МЭК 93-80) с помощью термометра Е6-3 с диапазоном измерения электрического сопротивления от 10 кОм до 10 ГОм. Для других диапазонов измерения электрического сопротивления использовали мультиметр UNIT 71E (UNIT, Китай).

#### Методика исследования температурного поля на поверхности образцов наномодифицированных эластомеров

Для исследования температурного поля был использован бесконтактный метод измерения с помощью тепловизора Testo-875-1 с оптическим объективом 32×23° (Testo, Германия) с выдержкой расстояния 10 см от образцов наномодифицированных эластомеров в затемненном помещении без доступа солнечных лучей. Температура наномодифицированных эластомеров измерялась двухканальным термометром Testo 992 (Testo, Германия), при этом определялась температура поверхности, и на основании полученных данных производилось

сравнение с температурой, фиксируемой тепловизором, после чего подбирался коэффициент излучения, используемый при дальнейших измерениях. Полученные тепловизионные снимки эластомеров анализировались с помощью программного обеспечения IRSoft v4.9 SP1.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Полученные для МУНТ с помощью СЭМ-снимки представлены на рис. 2.

На рис. 3 представлена осциллограмма тока и напряжения для наномодифицированного эластомера.

Сравнительный анализ результатов рамановского картирования поверхности наномодифицированных эластомеров представлен на рис. 4 а–f для концентраций МУНТ от 3 до 8 %.

На рис. 5 представлены термограммы поверхности наномодифицированных эластомеров с массовой кон-

центрацией МУНТ, равной 6 (рис. 5 а), 7 (рис. 5 б) и 8 % (рис. 5 с).

На рис. 6 и рис. 7 а, 7 б представлены тепловизионные снимки распределения температурного поля в эластомере в исходном состоянии (максимальная температура 50 °С), а также при растяжении и кручении. На рис. 6 а показан эластомер с МУНТ (6 масс. %) в свободном состоянии при подаче на него переменного напряжения, равного 180 В, с температурой 50 °С. При растяжении образца эластомера с МУНТ на 20 % от исходной длины (рис. 6 б) наблюдается снижение максимальной температуры на 3 °С (47 °С).

На рис. 8 показано, как изменяется температура у скрученных между собой трех полосок эластомера при растяжении. Растяжение эластомера с МУНТ на 20 % приводит к снижению температуры с 54,4 (рис. 8 а) до 44,7 °С (рис. 8 б).

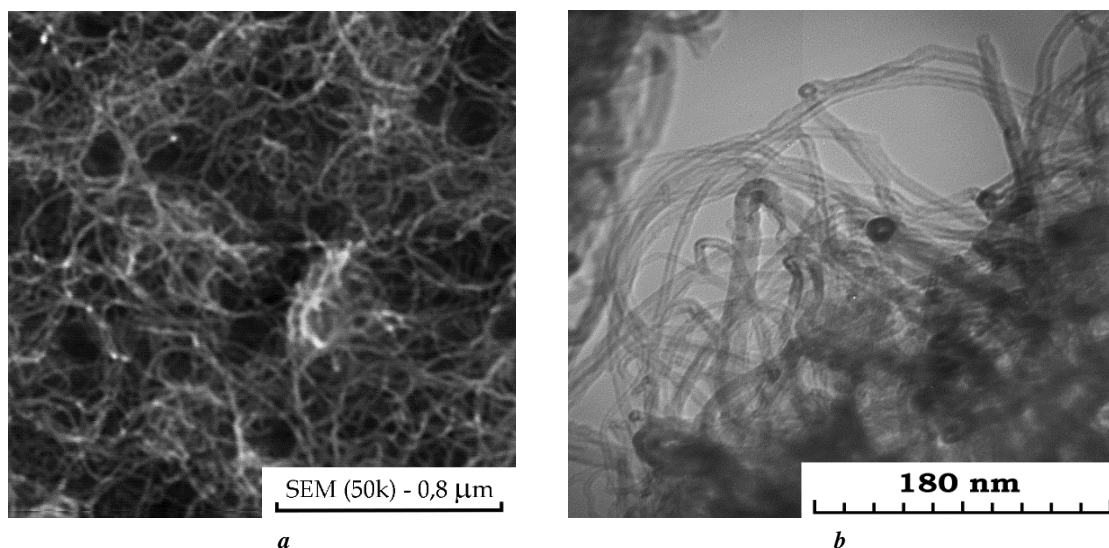


Рис. 2. СЭМ-изображения МУНТ:

а – МУНТ при разрешении 0,8 μm; б – МУНТ при разрешении 1,8 μm

Fig. 2. SEM images of MWCNT:

а – MWCNT at resolution of 0.8 μm; б – MWCNT at resolution of 1.8 μm

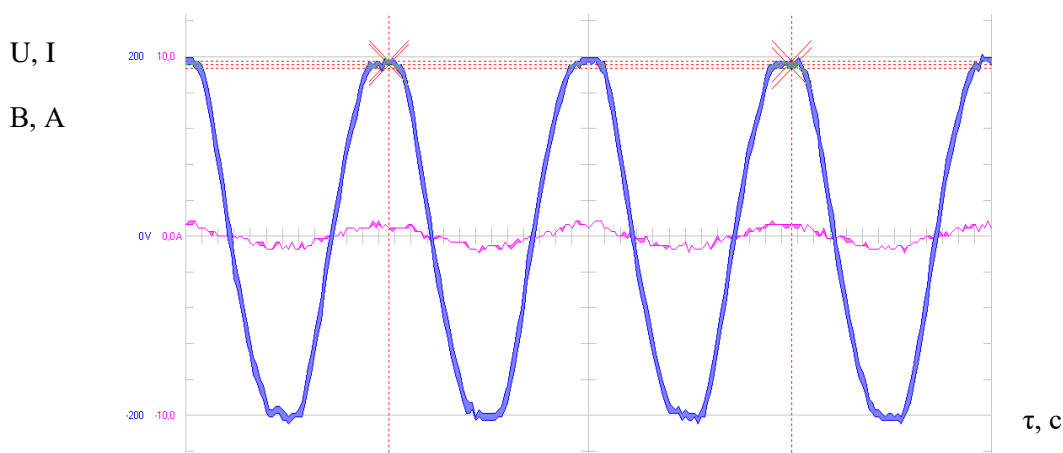
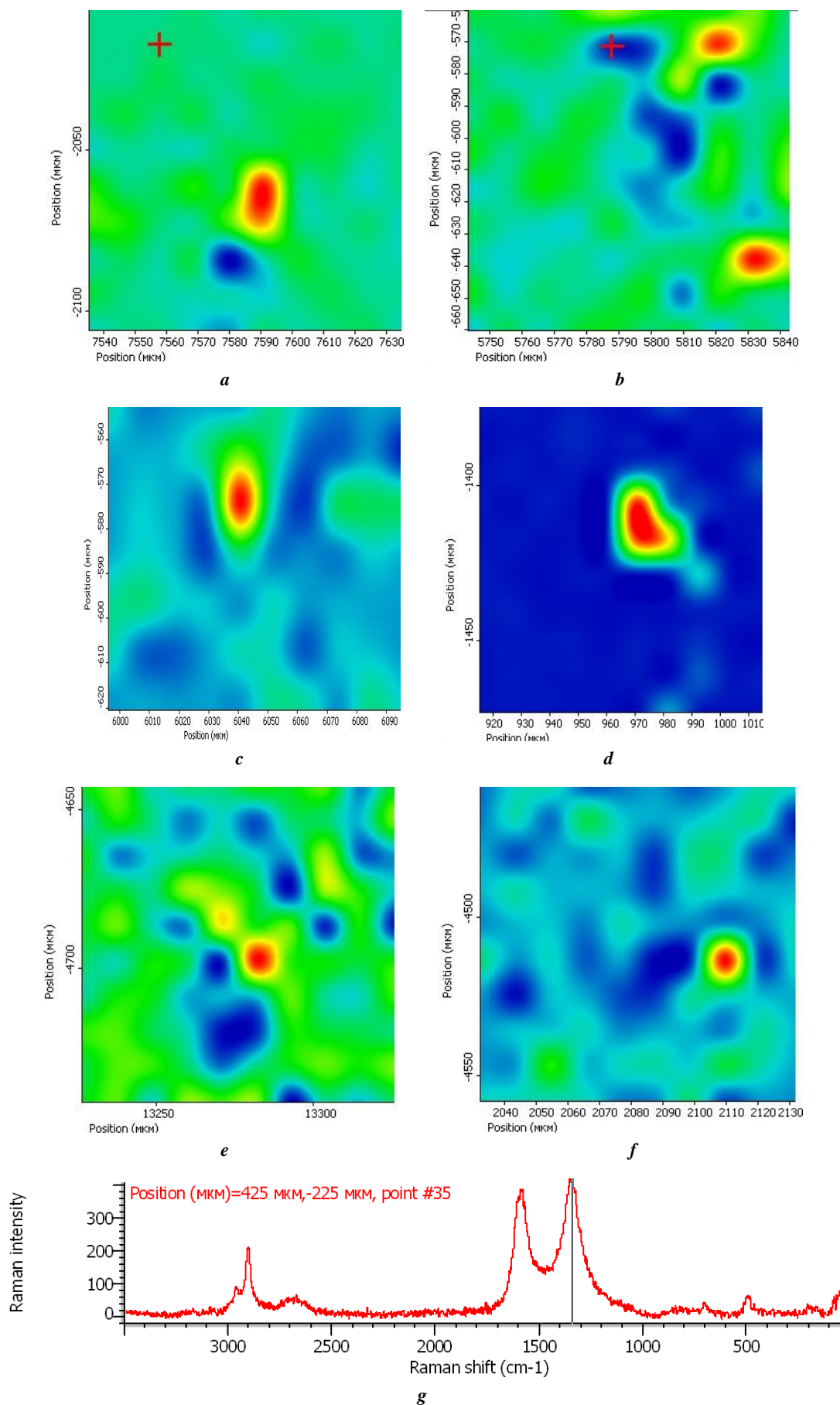


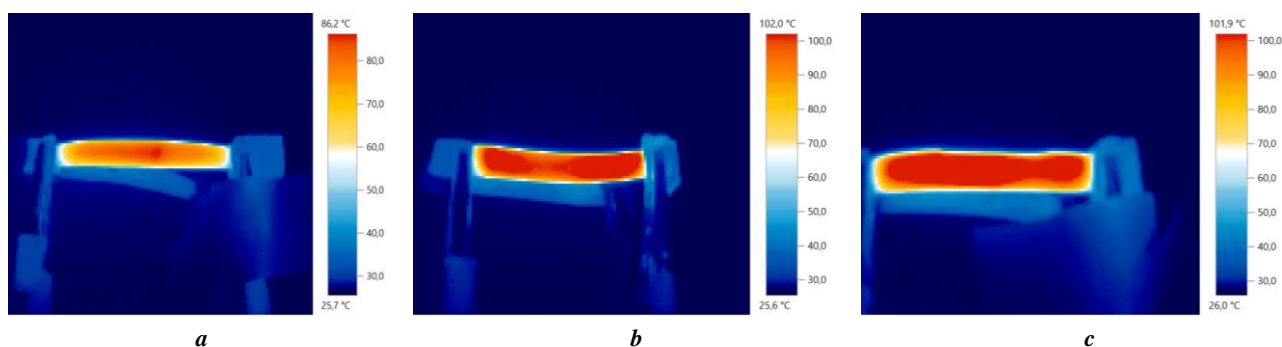
Рис. 3. Осциллограмма тока и напряжения для наномодифицированного эластомера

Fig. 3. Current and voltage oscillogram for a nanomodified elastomer





**Рис. 4.** Рамановское картирование поверхности наномодифицированных эластомеров: **a** – 3 %; **b** – 4 %; **c** – 5 %; **d** – 6 %; **e** – 7 %; **f** – 8 %; **g** – рамановские спектры полимера и МУНТ  
**Fig. 4.** Raman mapping of the surface of nanomodified elastomers: **a** – 3 %; **b** – 4 %; **c** – 5 %; **d** – 6 %; **e** – 7 %; **f** – 8 %; **g** – Raman spectra of a polymer and a MWCNT

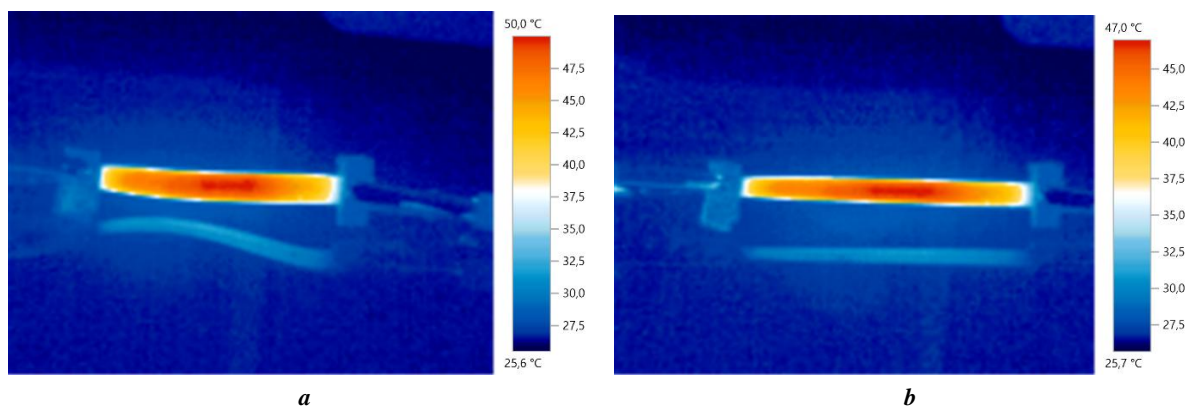


**Рис. 5.** Термограммы поверхности наномодифицированных эластомеров:

- a* – образец наномодифицированного эластомера (6 масс. %);
- b* – образец наномодифицированного эластомера (7 масс. %);
- c* – образец наномодифицированного эластомера (8 масс. %)

**Fig. 5.** Thermograms of the nanomodified elastomers' surface:

- a* – a nanomodified elastomer sample (6 % wt.);
- b* – a nanomodified elastomer sample (7 % wt.);
- c* – a nanomodified elastomer sample (8 % wt.)



**Рис. 6.** Термограмма поверхности наномодифицированного эластомера:

- a* – исходный образец наномодифицированного эластомера (6 масс. %);
- b* – образец наномодифицированного эластомера (6 масс. %) после растяжения на 20 %

**Fig. 6.** A thermogram of the nanomodified elastomer surface:

- a* – an initial sample of nanomodified elastomer (6 % wt.);
- b* – a nanomodified elastomer sample (6 % wt.) after stretching by 20 %

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

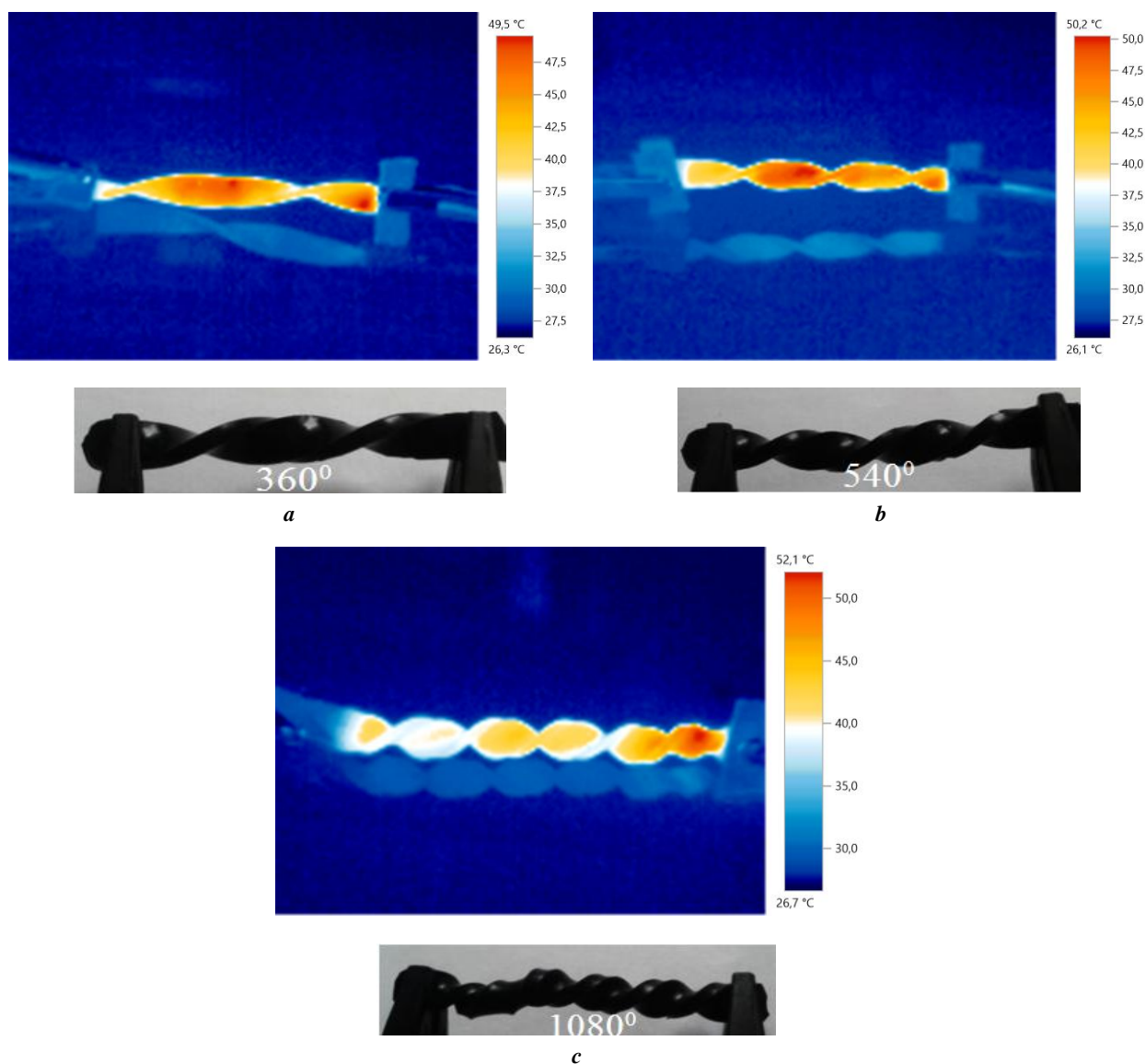
Анализ рис. 2 а и 2 б (разрешение от 0,8 до 1,8  $\mu\text{m}$ ) показывает наличие спутанных МУНТ в виде отдельных пучков, что характерно как для макро-, так и для наноуровня. У отдельных МУНТ наблюдается разброс по диаметру, который укладывается в диапазон от 40 до 70 нм. МУНТ имеют разнообразные места излома, перегиба с различными углами перегиба (рис. 2 б). МУНТ переплетаются между собой, формируя развитую электропроводящую сеть (рис. 2 а).

Анализ осциллограммы тока и напряжения для наномодифицированного эластомера позволяет охарактеризовать поведение тока в зависимости от напряжения без угла фазового сдвига, что говорит об активном характере нагрузки.

Проведенное рамановское картирование поверхностей эластомеров с МУНТ показывает, что даже для концентрации в 8 масс. % МУНТ (рис. 4 ф) имеется поверхностное сочетание как диэлектрической фазы,

связанной с эластомером, так и проводящей фазы, связанной с МУНТ. Наиболее равномерное распределение МУНТ в структуре эластомеров характерно для массовых концентраций 7 масс. % НКОК 7 (рис. 4 е) и 8 масс. % НКОК 8 (рис. 4 ф). Изменение массовой концентрации МУНТ в эластомере на 1 %, начиная со значения 7 %, приводит к увеличению электропроводности с 1,8 (НКОК 7) до 2  $\text{См}\times\text{см}^{-1}$  (НКОК 8). Микро-размерное агломерирование, которое присутствует на поверхности эластомера, позволяет сделать вывод о том, что контактное взаимодействие отдельных агломератов МУНТ влияет на перколяционный переход проводимости.

Образцы с концентрацией от 1 до 5 % в диапазоне питающего напряжения от 0 до 260 не тепловыделяли при протекании электрического тока, при этом композиты обладали следующими значениями электропроводности: НКОК 1 –  $2,8\times 10^{-8} \text{См}\times\text{см}^{-1}$ ; НКОК 2 –  $4,5\times 10^{-7} \text{См}\times\text{см}^{-1}$ ; НКОК 3 –  $3,7\times 10^{-6} \text{См}\times\text{см}^{-1}$ ; НКОК 4 –  $5\times 10^{-5} \text{См}\times\text{см}^{-1}$ ; НКОК 5 –  $0,08 \text{См}\times\text{см}^{-1}$ . Установлено, что тепловыделения



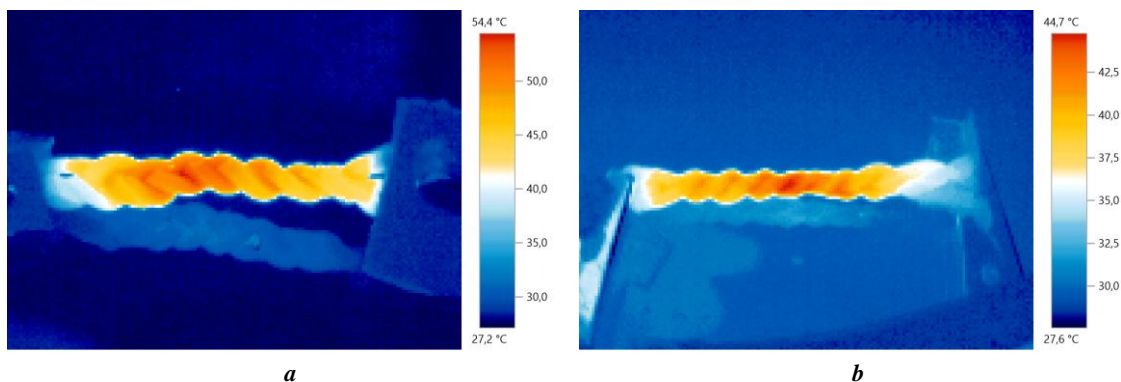
**Рис. 7.** Термограммы поверхности образца эластомера с МУНТ при кручении:  
**a** – образец, скрученный на  $360^\circ$ ; **b** – образец, скрученный на  $720^\circ$ ; **c** – образец, скрученный на  $1080^\circ$   
**Fig. 7.** Thermograms of the surface of an elastomer specimen with MWCNTs under torsion:  
**a** – a sample twisted by  $360^\circ$ ; **b** – a sample twisted by  $720^\circ$ ; **c** – a sample twisted by  $1080^\circ$

при подаче напряжения на эластомеры с МУНТ наблюдаются при массовой концентрации МУНТ, равной 6 масс. %, и напряжении, равном 70 В, у НКОК  $6 - 0,9 \text{ см} \times \text{см}^{-1}$ . Максимальное значение напряжения составляет 260 В (рис. 5 а), при этом температура доходит до  $86,2^\circ\text{C}$ . Увеличение концентрации до 7 масс. % приводит к повышению мощности тепловыделений и температуры ( $102^\circ\text{C}$ ), а также снижению предельного уровня питающего напряжения до 180 В (рис. 5 а), при этом начальное напряжение тепловыделений – 40 В. При концентрации, равной 8 %, мощность увеличивается и предельное напряжение падает до 100 В, а начальное напряжение падает до 36 В. Для напряжения, равного 100 В, температура устанавливается на значении  $101,9^\circ\text{C}$ .

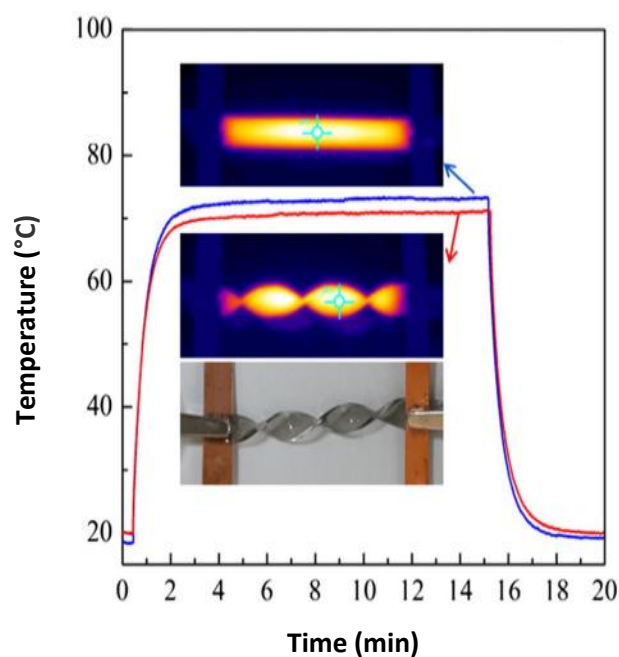
При кручении на  $360^\circ$  формируются участки эластомера с повышенной температурой справа и в центральной зоне ( $49,5^\circ\text{C}$ ). При кручении на  $540^\circ$  происходит увеличение температуры в месте сгиба до  $50,2^\circ\text{C}$

(рис 7 а, 7 б). Увеличение угла скручивания до  $1080^\circ$  приводит к формированию локации повышенной температуры около правого токоподводящего зажима.

Различия в распределении температурного поля на поверхности исследуемого эластомера с МУНТ при растяжении и кручении связаны с изменением локального электрического сопротивления на участках, подвергаемых механическим деформациям, что, с одной стороны, вызвано геометрическим искажением диэлектрической матрицы, а с другой стороны, деформацией МУНТ [16]. При этом растяжение эластомера вызывает снижение температуры тепловыделений, так как происходит внутреннее смещение в проводящей сетке, образованной как отдельными МУНТ, так и их агломератами. Это обстоятельство согласуется с аналогичными исследованиями [22], из которых также следует, что кручение полимерной матрицы с МУНТ приводит к снижению значения температуры тепловыделений (рис. 9).



**Рис. 8.** Термограммы поверхности наномодифицированных эластомеров:  
**a** – образец до растяжения; **b** – после растяжения  
**Fig. 8.** Thermograms of the nanomodified elastomers' surface:  
**a** – a sample before stretching; **b** – a sample after stretching



**Рис. 9.** Термограммы поверхности образца эластомера с МУНТ при кручении  
(MУНТ/PDMS при питающем напряжении 30 В) [22]  
**Fig. 9.** Thermograms of the surface of an MWCNT elastomer sample during torsion  
(MWCNT/PDMS at 30 V supply voltage) [22]

В таблице 2 представлено сравнение различных типов нагревателей на основе МУНТ. На характеристики изготавливаемых нагревателей влияет тип полимерной матрицы, который определяет основные свойства, а также значение питающего напряжения и метод получения образца нагревателя. Разработанный нагреватель на основе эластомера с МУНТ может быть использован при более высоком значении питающего напряжения (до 260 В), чем у аналогов: к примеру, для арамидного волокна [23] и полиуретана [24] с МУНТ питающее напряжение находится на уровне 10 В, для целлюлозы с МУНТ значение питающего напряжения повышается до 25 В [25], полидиметилсилоксан (PDMS) с МУНТ работает на напряжении 35 В [26], такой же материал

PDMS в работе [27] используется на напряжении 100 В, а в работе [28] PDMS с МУНТ – на напряжении до 110 В. Питающее напряжение на уровне 260 В может применяться в тех случаях, когда имеется ограничение на величину питающего тока.

Применение гибкого нагревателя позволяет создавать эффективные системы электронагрева, которые могут быть использованы в тепловентиляционном оборудовании, где для повышения эффективности теплообмена необходимо оптимизировать расположение нагревателей в соответствии с движением воздушных потоков. Стоит отметить возможность применения полученных образцов эластомеров с МУНТ в качестве чувствительных элементов датчиков деформации, что позволит



Таблица 2. Сравнительные характеристики нагревателей  
Table 2. Comparative characteristics of heaters

Материалы	Метод получения	Размер, мм	Напряжение, В	Сопротивление при растяжении	Литературный источник
Пленка УНТ/PDMS	Покрытие	120×18	2	Изменяется	[21]
МУНТ/PDMS	Литье раствора	20×5	100	Изменяется	[22]
МУНТ/М-Aramid	Литье раствора	40×5	10	Нерастягиваемый	[23]
МУНТ/TPU	Литье раствора	30×10	10	Изменяется	[24]
МУНТ/Целлюлоза	Погружение	20×20	25	Изменяется	[25]
МУНТ/PDMS	Литье раствора и электронно-лучевое излучение	20×5	35	Изменяется	[26]
МУНТ/PDMS	Литье раствора	20×5	100	Изменяется	[27]
МУНТ/PDMS	Распыляемое покрытие	20×0,5	110	Изменяется	[28]
МУНТ/НККОК 1–8	Литье в формы	100×10	36–260	Изменяется	Данное исследование

получать информацию о физических и химических параметрах в соответствии с принципами измерения изменения электрического сопротивления, которое возникает при растяжении, сжатии и кручении.

### ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Изготовлены и исследованы эластомеры с концентрацией МУНТ от 1 до 8 масс. % при их питании от источника переменного электрического тока в диапазоне от 6 до 250 В. Образцы с концентрацией от 1 до 5 масс. % в диапазоне питающего напряжения от 0 до 260 В не обеспечивали тепловыделений при протекании электрического тока. Установлено, что тепловыделения при подаче напряжения на эластомеры с МУНТ наблюдаются при массовой концентрации МУНТ равной 6 %, и напряжении, равном 70 В. Максимальное значение напряжения составляет 260 В, при этом температура доходит до 86,2 °С.

Увеличение концентрации МУНТ в эластомере до 7 масс. % приводит к повышению мощности тепловыделений и температуры (102 °С), а также снижению предельного уровня питающего напряжения до 180 В, при этом начальное напряжение тепловыделений – 40 В. При концентрации, равной 8 масс. %, мощность увеличивается и предельное напряжение падает до 100 В, а начальное напряжение падает до 36 В. Для напряжения, равного 100 В, температура устанавливается на значении 101,9 °С.

Установлено, что при кручении на 360° формируются участки эластомера с повышенной температурой справа и в центральной зоне (49,5 °С). При кручении на 540° происходит увеличение температуры в месте сгиба до 50,2 °С. Увеличение угла скручивания до 1080° приводит к формированию локализации повышенной температуры около правого токоподводящего зажима. Об-

разцы эластомеров обладают гибкостью, эластичностью и высокой эффективностью электротермического преобразования.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Jeong C.K., Lee J., Han S., Ryu J., Hwang G.T., Park D.Y., Park J.H., Lee S.S., Byun M., Ko S.H., Lee K.J. A hyper-stretchable elastic-composite energy harvester // *Advanced Materials*. 2015. Vol. 27. № 18. P. 2866–2875. DOI: [10.1002/adma.201500367](https://doi.org/10.1002/adma.201500367).
- Liang L., Gao C., Chen G., Guo C.Y. Large-area, stretchable, super flexible and mechanically stable thermoelectric films of polymer/carbon nanotube composites // *Journal of Materials Chemistry C*. 2016. Vol. 4. № 3. P. 526–532. DOI: [10.1039/C5TC03768A](https://doi.org/10.1039/C5TC03768A).
- Cacucciolo V., Shintake J., Kuwajima Y., Maeda S., Floreano D., Shea H. Stretchable pumps for soft machines // *Nature*. 2019. Vol. 572. № 7770. P. 516–519. DOI: [10.1038/s41586-019-1479-6](https://doi.org/10.1038/s41586-019-1479-6).
- Qu C., Wang S., Liu L., Bai Y., Li L., Sun F.Q., Hao M.M., Li T., Lu Q.F., Li L.L., Qin S.J., Zhang T. Bioinspired Flexible Volatile Organic Compounds Sensor Based on Dynamic Surface Wrinkling with Dual-Signal Response // *Small*. 2019. Vol. 15. № 17. Article number 1900216. DOI: [10.1002/smll.201900216](https://doi.org/10.1002/smll.201900216).
- Aouraghe M.A., Xu F., Liu X., Qiu Y. Flexible, quickly responsive and highly efficient E-heating carbon nanotube film // *Composites Science Technology*. 2019. Vol. 183. Article number 107824. DOI: [10.1016/j.compscitech.2019.107824](https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2019.107824).
- Xu P., Kang J., Suhr J., Smith J.P., Booksh K.S., Wei B., Yu J., Li F., Byun J., Oh Y., Chou T. Spatial strain variation of graphene films for stretchable electrodes // *Carbon*. 2015. Vol. 93. P. 620–624. DOI: [10.1016/j.carbon.2015.05.096](https://doi.org/10.1016/j.carbon.2015.05.096).

7. Hudaya C., Jeon B.J., Lee J.K. High thermal performance of SnO<sub>2</sub>:F thin transparent heaters with scattered metal nanodots // *ACS Applied Materials and Interfaces*. 2015. Vol. 7. № 1. P. 57–61. DOI: [10.1021/am507497u](https://doi.org/10.1021/am507497u).
8. Spinelli G., Lamberti P., Tucci V., Guadagno L., Vertuccio L. Damage Monitoring of Structural Resins Loaded with Carbon Fillers: Experimental and Theoretical Study // *Nanomaterials*. 2020. Vol. 10. № 3. Article number 434. DOI: [10.3390/nano10030434](https://doi.org/10.3390/nano10030434).
9. Guadagno L., Foglia F., Pantani R., Romero-Sanchez M.D., Calderon B., Vertuccio L. Low-Voltage Icing Protection Film for Automotive and Aeronautical Industries // *Nanomaterials*. 2020. Vol. 10. № 7. P. 1–16. DOI: [10.3390/nano10071343](https://doi.org/10.3390/nano10071343).
10. Luo J., Lu H., Zhang Q., Yao Y., Chen M., Li Q. Flexible carbon nanotube/polyurethane electrothermal films // *Carbon*. 2016. Vol. 110. P. 343–349. DOI: [10.1016/j.carbon.2016.09.016](https://doi.org/10.1016/j.carbon.2016.09.016).
11. Novoselov K.S., Geim A.K., Morozov S.V., Jiang D., Katsnelson M.I., Grigorieva I.V., Dubonos S.V., Firsov A.A. Two-dimensional gas of massless Dirac fermions in graphene // *Nature*. 2005. Vol. 438. № 7065. P. 197–200. DOI: [10.1038/nature04233](https://doi.org/10.1038/nature04233).
12. Stankovich S., Dikin D.A., Dommett G.H., Kohlhaas K.M., Zimney E.J., Stach E.A., Piner R.D., Nguyen S.T., Ruoff R.S. Graphene-based composite materials // *Nature*. 2006. Vol. 442. № 7100. P. 282–286. DOI: [10.1038/nature04969](https://doi.org/10.1038/nature04969).
13. Novoselov K.S., Fal'ko V.I., Colombo L., Gellert P.R., Schwab M.G., Kim K. A roadmap for graphene // *Nature*. 2012. Vol. 490. P. 192–200. DOI: [10.1038/nature11458](https://doi.org/10.1038/nature11458).
14. Potts J.R., Shankar O., Murali S., Du L., Ruoff R.S. Latex and two-roll mill processing of thermally-exfoliated graphite oxide/natural rubber nanocomposites // *Composites Science and Technology*. 2013. Vol. 74. P. 166–172. DOI: [10.1016/j.compscitech.2012.11.008](https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2012.11.008).
15. Chu K., Yun D.-J., Kim D., Park H., Park S.-H. Study of electric heating effects on carbon nanotube polymer composites // *Organic Electronics*. 2014. Vol. 15. № 11. P. 2734–2741. DOI: [10.1016/j.orgel.2014.07.043](https://doi.org/10.1016/j.orgel.2014.07.043).
16. Ning N., Ji L., Zhang L., Liu J., Lu Y., Wu S., Zou H., Tian M., Chan T.W. High elasticity and conductivity of elastomer composites with arrayed carbon nanotubes as nanosprings // *Composites Science and Technology*. 2015. Vol. 118. P. 78–84. DOI: [10.1016/j.compscitech.2015.08.012](https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2015.08.012).
17. Ali I., AlGarni T.S., Shchegolkov A., Shchegolkov A., Jang S.-H., Galunin E., Komarov F., Borovskikh P., Imanova G.T. Temperature self-regulating flat electric heaters based on MWCNTs-modified polymers // *Polymer Bulletin*. 2021. Vol. 78. № 11. P. 6689–6703. DOI: [10.1007/s00289-020-03483-y](https://doi.org/10.1007/s00289-020-03483-y).
18. Щегольков А.В., Щегольков А.В., Комаров Ф.Ф., Парфимович И.Д. Применение эластомеров, модифицированных углеродными нанотрубками при создании саморегулируемых электронагревателей и материалов для защиты от электромагнитного излучения // *Российский химический журнал*. 2020. Т. 64. № 4. С. 39–45. DOI: [10.6060/rcj.2020644.4](https://doi.org/10.6060/rcj.2020644.4).
19. Щегольков А.В. Сравнительный анализ тепловых эффектов в эластомерах, модифицированных МУНТ при постоянном электрическом напряжении // *Вектор науки Тольяттинского государственного университета*. 2021. № 1. С. 63–73. DOI: [10.18323/2073-5073-2021-1-63-73](https://doi.org/10.18323/2073-5073-2021-1-63-73).
20. Щегольков А.В., Комаров Ф.Ф., Парфимович И.Д., Мильчанин О.В., Щегольков А.В., Хробак А.В., Семенкова А.В. Влияние углеродных нанотрубок на электропроводность реактопластов и эластомеров // *Вектор науки Тольяттинского государственного университета*. 2020. № 3. С. 65–72. DOI: [10.18323/2073-5073-2020-3-65-72](https://doi.org/10.18323/2073-5073-2020-3-65-72).
21. Xu F., Aouraghe M.A., Xie X., Zheng L., Zhang K., Fu K.K. Highly stretchable, fast thermal response carbon nanotube composite heater // *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2021. Vol. 147. Article number 106471. DOI: [10.1016/j.compositesa.2021.106471](https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2021.106471).
22. Yan J., Kim B., Jeong Y.G. Thermomechanical and electrical properties of PDMS/MWCNT composite films crosslinked by electron beam irradiation // *Journal of Materials Science*. 2015. Vol. 50. № 16. P. 5599–5608. DOI: [10.1007/s10853-015-9110-1](https://doi.org/10.1007/s10853-015-9110-1).
23. Jeong Y.G., Jeon G.W. Microstructure and performance of multiwalled carbon nanotube/m-aramid composite films as electric heating elements // *ACS Applied Materials and Interfaces*. 2013. Vol. 5. № 14. P. 6527–6534. DOI: [10.1021/am400892k](https://doi.org/10.1021/am400892k).
24. Yan J., Jeong Y.G. Multiwalled carbon nanotube/polydimethylsiloxane composite films as high performance flexible electric heating elements // *Applied Physics Letters*. 2014. Vol. 105. № 5. Article number 051907. DOI: [10.1063/1.4892545](https://doi.org/10.1063/1.4892545).
25. Yan J., Kim B., Jeong Y.G. Thermomechanical and electrical properties of PDMS/MWCNT composite films crosslinked by electron beam irradiation // *Journal of Materials Science*. 2015. Vol. 50. № 16. P. 5599–5608. DOI: [10.1007/s10853-015-9110-1](https://doi.org/10.1007/s10853-015-9110-1).
26. Yan J., Jeong Y.G. Highly elastic and transparent multiwalled carbon nanotube/polydimethylsiloxane bilayer films as electric heating materials // *Materials & Design*. 2015. Vol. 86. P. 72–79. DOI: [10.1016/j.matdes.2015.07.089](https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.07.089).
27. Luo J., Lu H., Zhang Q., Yao Y., Chen M., Li Q. Flexible carbon nanotube/polyurethane electrothermal films // *Carbon*. 2016. Vol. 110. P. 343–349. DOI: [10.1016/j.carbon.2016.09.016](https://doi.org/10.1016/j.carbon.2016.09.016).
28. Lee T.-W., Lee S.-E., Jeong Y.-G. Carbon nanotube/cellulose papers with high performance in electric heating and electromagnetic interference shielding // *Composites Science and Technology*. 2016. Vol. 131. P. 77–87. DOI: [10.1016/j.compscitech.2016.06.003](https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2016.06.003).

## REFERENCES

1. Jeong C.K., Lee J., Han S., Ryu J., Hwang G.T., Park D.Y., Park J.H., Lee S.S., Byun M., Ko S.H., Lee K.J. A hyper-stretchable elastic-composite energy harvester. *Advanced Materials*, 2015, vol. 27, no. 18, pp. 2866–2875. DOI: [10.1002/adma.201500367](https://doi.org/10.1002/adma.201500367).
2. Liang L., Gao C., Chen G., Guo C.Y. Large-area, stretchable, super flexible and mechanically stable thermoelectric films of polymer/carbon nanotube composites. *Journal of Materials Chemistry C*, 2016, vol. 4, no. 3, pp. 526–532. DOI: [10.1039/C5TC03768A](https://doi.org/10.1039/C5TC03768A).

3. Cacucciolo V., Shintake J., Kuwajima Y., Maeda S., Floreano D., Shea H. Stretchable pumps for soft machines. *Nature*, 2019, vol. 572, no. 7770, pp. 516–519. DOI: [10.1038/s41586-019-1479-6](https://doi.org/10.1038/s41586-019-1479-6).
4. Qu C., Wang S., Liu L., Bai Y., Li L., Sun F.Q., Hao M.M., Li T., Lu Q.F., Li L.L., Qin S.J., Zhang T. Bioinspired Flexible Volatile Organic Compounds Sensor Based on Dynamic Surface Wrinkling with Dual-Signal Response. *Small*, 2019, vol. 15, no. 17, article number 1900216. DOI: [10.1002/smll.201900216](https://doi.org/10.1002/smll.201900216).
5. Aouraghe M.A., Xu F., Liu X., Qiu Y. Flexible, quickly responsive and highly efficient E-heating carbon nanotube film. *Composites Science Technology*, 2019, vol. 183, article number 107824. DOI: [10.1016/j.compscitech.2019.107824](https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2019.107824).
6. Xu P., Kang J., Suhr J., Smith J.P., Booksh K.S., Wei B., Yu J., Li F., Byun J., Oh Y., Chou T. Spatial strain variation of graphene films for stretchable electrodes. *Carbon*, 2015, vol. 93, pp. 620–624. DOI: [10.1016/j.carbon.2015.05.096](https://doi.org/10.1016/j.carbon.2015.05.096).
7. Hudaya C., Jeon B.J., Lee J.K. High thermal performance of SnO<sub>2</sub>:F thin transparent heaters with scattered metal nanodots. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 2015, vol. 7, no. 1, pp. 57–61. DOI: [10.1021/am507497u](https://doi.org/10.1021/am507497u).
8. Spinelli G., Lamberti P., Tucci V., Guadagno L., Vertuccio L. Damage Monitoring of Structural Resins Loaded with Carbon Fillers: Experimental and Theoretical Study. *Nanomaterials*, 2020, vol. 10, no. 3, article number 434. DOI: [10.3390/nano10030434](https://doi.org/10.3390/nano10030434).
9. Guadagno L., Foglia F., Pantani R., Romero-Sanchez M.D., Calderon B., Vertuccio L. Low-Voltage Icing Protection Film for Automotive and Aeronautical Industries. *Nanomaterials*, 2020, vol. 10, no. 7, pp. 1–16. DOI: [10.3390/nano10071343](https://doi.org/10.3390/nano10071343).
10. Luo J., Lu H., Zhang Q., Yao Y., Chen M., Li Q. Flexible carbon nanotube/polyurethane electrothermal films. *Carbon*, 2016, vol. 110, pp. 343–349. DOI: [10.1016/j.carbon.2016.09.016](https://doi.org/10.1016/j.carbon.2016.09.016).
11. Novoselov K.S., Geim A.K., Morozov S.V., Jiang D., Katsnelson M.I., Grigorieva I.V., Dubonos S.V., Firsov A.A. Two-dimensional gas of massless Dirac fermions in grapheme. *Nature*, 2005, vol. 438, no. 7065, pp. 197–200. DOI: [10.1038/nature04233](https://doi.org/10.1038/nature04233).
12. Stankovich S., Dikin D.A., Dommett G.H., Kohlhaas K.M., Zimney E.J., Stach E.A., Piner R.D., Nguyen S.T., Ruoff R.S. Graphene-based composite materials. *Nature*, 2006, vol. 442, no. 7100, pp. 282–286. DOI: [10.1038/nature04969](https://doi.org/10.1038/nature04969).
13. Novoselov K.S., Fal'ko V.I., Colombo L., Gellert P.R., Schwab M.G., Kim K. A roadmap for grapheme. *Nature*, 2012, vol. 490, pp. 192–200. DOI: [10.1038/nature11458](https://doi.org/10.1038/nature11458).
14. Potts J.R., Shankar O., Murali S., Du L., Ruoff R.S. Latex and two-roll mill processing of thermally-exfoliated graphite oxide/natural rubber nanocomposites. *Composites Science and Technology*, 2013, vol. 74, pp. 166–172. DOI: [10.1016/j.compscitech.2012.11.008](https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2012.11.008).
15. Chu K., Yun D.-J., Kim D., Park H., Park S.-H. Study of electric heating effects on carbon nanotube polymer composites. *Organic Electronics*, 2014, vol. 15, no. 11, pp. 2734–2741. DOI: [10.1016/j.orgel.2014.07.043](https://doi.org/10.1016/j.orgel.2014.07.043).
16. Ning N., Ji L., Zhang L., Liu J., Lu Y., Wu S., Zou H., Tian M., Chan T.W. High elasticity and conductivity of elastomer composites with arrayed carbon nanotubes as nanosprings. *Composites Science and Technology*, 2015, vol. 118, pp. 78–84. DOI: [10.1016/j.compscitech.2015.08.012](https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2015.08.012).
17. Ali I., AlGarni T.S., Shchegolkov A., Shchegolkov A., Jang S.-H., Galunin E., Komarov F., Borovskikh P., Imanova G.T. Temperature self-regulating flat electric heaters based on MWCNTs-modified polymers. *Polymer Bulletin*, 2021, vol. 78, no. 11, pp. 6689–6703. DOI: [10.1007/s00289-020-03483-y](https://doi.org/10.1007/s00289-020-03483-y).
18. Shchegolkov A.V., Shchegolkov A.V., Komarov F.F., Parfimovich I.D. The use of elastomers modified with carbon nanotubes when creating self-regulating electric heaters and materials for protection against electromagnetic radiation. *Rossiyskiy khimicheskiy zhurnal*, 2020, vol. 64, no. 4, pp. 39–45. DOI: [10.6060/rcj.2020644.4](https://doi.org/10.6060/rcj.2020644.4).
19. Shchegolkov A.V. The comparative analysis of thermal effects in elastomers modified with MCNT at constant DC voltage. *Vektor nauki Tolyattinskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2021, no. 1, pp. 63–73. DOI: [10.18323/2073-5073-2021-1-63-73](https://doi.org/10.18323/2073-5073-2021-1-63-73).
20. Shchegolkov A.V., Komarov F.F., Parfimovich I.D., Milchanin O.V., Shchegolkov A.V., Khrobak A.V., Semenkova A.V. The influence of carbon nanotubes on the electric conductivity of thermosetting plastics and elastomers. *Vektor nauki Tolyattinskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2020, no. 3, pp. 65–72. DOI: [10.18323/2073-5073-2020-3-65-72](https://doi.org/10.18323/2073-5073-2020-3-65-72).
21. Xu F., Aouraghe M.A., Xie X., Zheng L., Zhang K., Fu K.K. Highly stretchable, fast thermal response carbon nanotube composite heater. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2021, vol. 147, article number 106471. DOI: [10.1016/j.compositesa.2021.106471](https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2021.106471).
22. Yan J., Kim B., Jeong Y.G. Thermomechanical and electrical properties of PDMS/MWCNT composite films crosslinked by electron beam irradiation. *Journal of Materials Science*, 2015, vol. 50, no. 16, pp. 5599–5608. DOI: [10.1007/s10853-015-9110-1](https://doi.org/10.1007/s10853-015-9110-1).
23. Jeong Y.G., Jeon G.W. Microstructure and performance of multiwalled carbon nanotube/m-aramid composite films as electric heating elements. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 2013, vol. 5, no. 14, pp. 6527–6534. DOI: [10.1021/am400892k](https://doi.org/10.1021/am400892k).
24. Yan J., Jeong Y.G. Multiwalled carbon nanotube/polydimethylsiloxane composite films as high performance flexible electric heating elements. *Applied Physics Letters*, 2014, vol. 105, no. 5, article number 051907. DOI: [10.1063/1.4892545](https://doi.org/10.1063/1.4892545).
25. Yan J., Kim B., Jeong Y.G. Thermomechanical and electrical properties of PDMS/MWCNT composite films crosslinked by electron beam irradiation. *Journal of Materials Science*, 2015, vol. 50, no. 16, pp. 5599–5608. DOI: [10.1007/s10853-015-9110-1](https://doi.org/10.1007/s10853-015-9110-1).
26. Yan J., Jeong Y.G. Highly elastic and transparent multiwalled carbon nanotube/polydimethylsiloxane bilayer films as electric heating materials. *Materials & Design*, 2015, vol. 86, pp. 72–79. DOI: [10.1016/j.matdes.2015.07.089](https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.07.089).
27. Luo J., Lu H., Zhang Q., Yao Y., Chen M., Li Q. Flexible carbon nanotube/polyurethane electrothermal films.

*Carbon*, 2016, vol. 110, pp. 343–349. DOI: [10.1016/j.carbon.2016.09.016](https://doi.org/10.1016/j.carbon.2016.09.016).

28. Lee T.-W., Lee S.-E., Jeong Y.-G. Carbon nanotube/cellulose papers with high performance in electric

heating and electromagnetic interference shielding. *Composites Science and Technology*, 2016, vol. 131, pp. 77–87. DOI: [10.1016/j.compscitech.2016.06.003](https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2016.06.003).

## Investigation of heat release in nanomodified elastomers during stretching and torsion under the action of electric voltage

© 2022

*Aleksandr V. Shchegolkov*\*<sup>1</sup>, PhD (Engineering), Associate Professor,

assistant professor of Chair “Technology and Methods of Nanoproducts Manufacturing”

*Aleksey V. Shchegolkov*<sup>2</sup>, postgraduate student of Chair “Technology and Methods of Nanoproducts Manufacturing”

*Nataliya V. Zemtsova*<sup>3</sup>, postgraduate student of Chair “Technology and Methods of Nanoproducts Manufacturing”  
*Tambov State Technical University, Tambov (Russia)*

\*E-mail: [Energynano@yandex.ru](mailto:Energynano@yandex.ru)

<sup>1</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4317-0689>

<sup>2</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1838-3842>

<sup>3</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5274-6133>

Received 08.11.2021

Accepted 06.06.2022

**Abstract:** The authors studied the elastomers modified with carbon nanotubes (MWCNTs) with a mass concentration from 1 to 8 % wt. and investigated the modes of heat release of nanomodified elastomers within the range between 30 and 260 V (of alternating current) at different levels of stretching and torsion. Samples of elastomers with the MWCNT concentration from 1 to 5 % wt. in the supply voltage range up to 260 V did not generate heat. The study showed that heat release when feeding composites of elastomers with MWCNTs was observed at a mass concentration of 6 % wt. of MWCNTs and a supply voltage of 70 V. The maximum voltage for an elastomer sample with 6 % wt. of MWCNTs reaches 260 V. An increase in concentration to 7 % wt. causes the increase in the heat release power and the decrease in the maximum supply voltage level to 180 V when the initial heat release voltage is 40 V. At the 8 % wt. concentration, the power increases, and the limiting voltage drops to 100 V, while the initial voltage becomes 36 V. The study identified that when twisting elastomer by 360°, the areas with an increased temperature on the right and in the central zone of the sample (49.5 °C) are formed. The temperature at the bend point increases up to 50.2° C when twisting elastomer by 540°. An increase in the twisting angle to 1080° leads to the formation of areas with the elevated temperature near the right-side current-carrying clamp. It is worth noting the possibility of using the produced samples of elastomers with MWCNTs as sensitive elements of strain sensors, which will allow obtaining the information on physical and chemical parameters according to the principles of measuring the change in electrical resistance that occurs during stretching and torsion.

**Keywords:** multiwall carbon nanotubes (MWCNT); elastomer; silicone compound; nanomodified elastomers.

**Acknowledgements:** The work was carried out under the financial support within the Agreement No. 10-MU-20 for the support of winning project No. 23-MU-20 (02) of the regional competition “Grants to Support the Applied Research of Young Scientists in 2020”.

**For citation:** Shchegolkov A.V., Shchegolkov A.V., Zemtsova N.V. Investigation of heat release in nanomodified elastomers during stretching and torsion under the action of electric voltage. *Frontier Materials & Technologies*, 2022, no. 2, pp. 121–132. DOI: [10.18323/2782-4039-2022-2-121-132](https://doi.org/10.18323/2782-4039-2022-2-121-132).