

**ТЕНЗОМЕТРИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ
НА ОСНОВЕ ЭЛАСТОМЕРОВ, МОДИФИЦИРОВАННЫЕ
МИКРО- И НАНОРАЗМЕРНЫМИ ЧАСТИЦАМИ**

© А. В. Щегольков^{1✉}, Ал. В. Щегольков²

¹ Кафедра «Электроэнергетика», *Energynano@yandex.ru*; ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Российская Федерация;

² Сектор научной деятельности, Передовая инженерная школа технологического лидерства FDR, Центр проектной деятельности, ФГАОУ ВО «Московский политехнический университет», Москва, Российская Федерация

Ключевые слова: сканирующая электронная микроскопия; тензометрический преобразователь (тензорезистор); углеродные нанотрубки; эластомер.

Аннотация: Приведено исследование тензометрического преобразователя, изготовленного на основе полимерной эластичной матрицы, содержащей микро-размерные частицы бронзы в виде пудры и наноразмерные частицы – углеродные нанотрубки (УНТ). Разработка такого класса преобразователей обусловлена необходимостью контроля экстремальных механических нагрузок и агрессивных сред, в частности, в системах, где требуется мониторинг механических воздействий на оборудование. Тензометрический преобразователь (тензорезистор) изготовлен путем формирования композита, в котором двухкомпонентная смесь, состоящая из УНТ и дисперсных металлических частиц (бронзовая пудра), была введена в полимерную матрицу. Механические воздействия приводят к изменению конфигурации проводящей сети, образованной переплетением нанотрубок и частиц металла, что в свою очередь приводит к изменению ее электрического сопротивления (ΔR), благодаря эффекту туннелирования электронов, зависящему от расстояния между отдельными УНТ. Синтезированные СВЧ-методом УНТ имеют шарообразную структуру с развитой поверхностью, что обеспечивает хороший контакт между ними и металлическими частицами. Экспериментально установлена зависимость чувствительности тензодатчика от концентрации УНТ с наличием оптимального значения при концентрации УНТ, равной 3 масс. %, и 3 масс. % бронзы.

Введение

Разработка новых чувствительных материалов, выступающих в качестве тензометрических преобразователей измерения деформации и давления, является актуальной научно-технической задачей [1]. Высокая значимость относится к портативной электронике, технологиям виртуальной реальности [2, 3] к системам мониторинга здоровья человека [4], исследованию трещин в горных породах [5] и других технических приложениях [6]. Кроме того, тензометрические

преобразователи (тензорезисторы) играют важное значения как в измерительной технике, системах контроля и управления, так и в машино- и автомобилестроении, а также авиационной промышленности [7 – 9].

Принцип действия тензометрических преобразователей основан на их способности изменять электрофизические параметры под действием упругой деформации. Важным аспектом для таких преобразователей является пьезорезистивный эффект (тензорезистивность), который заключается в изменении удельного электрического сопротивления материала под воздействием упругой механической деформации [10].

Металлические тензорезисторы характеризуются ограниченной чувствительностью, малой контактной площадью и узким диапазоном измеряемых деформаций [11]. В связи с этим разработка современных тензодатчиков направлена на достижение высокой чувствительности, линейности, низкого гистерезиса, температурной стабильности и широкого рабочего диапазона измерений.

Разработка тензорезисторов на основе полимерных композитов с проводящими наполнителями [12] является актуальным направлением. В качестве проводящих дисперсных наполнителей могут быть использованы углеродные наноструктуры [13]. Среди широкого многообразия углеродных наноматериалов наиболее эффективно проявляют себя углеродные нанотрубки (УНТ), использование которых обеспечивает высокую тензорезистивность при малых деформациях, то есть чувствительность [14]. Одним из вариантов углеродных нанотрубок являются многослойные углеродные нанотрубки, которые обладают оптимальными морфологическими и структурными свойствами и позволяют добиться высокой эффективности при создании тензорезисторов [15].

Современные исследования в области тензометрии направлены на выявление ключевых аспектов, которые определяют эффективность использования УНТ для измерения деформации на нано- и макроуровнях. На практике УНТ часто интегрируют в полимерные матрицы для достижения порога перколяции и формирования проводящих сетей соответственно. Такие нанокompозиты, изготавливаемые путем смешивания полимера с УНТ, демонстрируют высокую чувствительность и стабильный отклик на механическое воздействие, что значительно улучшает характеристики тензодатчиков [16]. Кроме того, исследования подтверждают, что УНТ сохраняют стабильный электрический отклик при изменении температуры [17], что в свою очередь повышает их надежность как материала для измерения механических деформаций, в частности в системах, где требуется мониторинг механических воздействий на оборудование.

Нанокompозиты на основе полимеров, оптимально подходят для измерения больших деформаций ($> 10\%$), что особенно важно для таких приложений, как роботизированные системы и мониторинг движений человека. При растяжении такого композита, массив из плотноупакованных УНТ подвергается изменению конфигурации сети, что в свою очередь приводит к изменению его электрического сопротивления ΔR . В основном на это влияют контакт между отдельными УНТ, туннелирование и перескоки электронов, которые зависят от расстояния между отдельными УНТ. Полимер, покрывающий массив УНТ, влияет на его пьезорезистивный отклик не только при первой нагрузке, но и при последующей (циклической). Такая реакция может зависеть от диэлектрических и механических свойств полимерного покрытия. Тонкопленочные сенсоры из УНТ также демонстрируют гистерезис сопротивления при циклическом деформационном нагружении [18], что связано с необратимым ухудшением контакта на границе раздела УНТ/полимер.

Широкая номенклатура различных материалов для тензометрических преобразователей связана с многообразием их технического применения. При разработке и совершенствовании тензодатчиков следует учитывать особенности устройств и технологию процессов, для которых они предназначены. Особую важность приобретает применение тензодатчиков для контроля механической напряженности в металлоемких конструкциях, к которым можно отнести строительные объекты, здания, мосты и т. д. [19], и в качестве весоизмерительных систем, которые могут устанавливаться на грузовом автотранспорте [20] или каких-либо стационарных объектах [21]. В связи с этим существует необходимость в создании тензометрических преобразователей, адаптированных к применению в сложных технических системах [22].

Цель работы – исследование эластомеров с электропроводящим смесевым наполнителем (УНТ и бронза) в качестве тензометрических преобразователей и анализ структурных свойств полученного композита.

Поставлены следующие *задачи* исследования:

- синтез углеродных наноструктур с заданными свойствами для тензометрического преобразователя;
- разработка полимерного нанокompозита на основе эластичной полимерной матрицы, содержащей углеродные наноструктуры и дисперсные частицы бронзы;
- проведение экспериментальных исследований зависимости чувствительности тензодатчика от концентрации УНТ и бронзы.

Материалы и методы

Изготовление тензорезистора проводилось путем перемешивания отдельных компонентов, входящих в состав эластичной матрицы, в результате распределения УНТ и дисперсных металлических частиц бронзы в эластомере (жидкое состояние). Процесс осуществлялся с помощью ультразвукового гомогенизатора (Sonicators, Qsonica, мощность 400 Вт, частота излучения 24 кГц).

Углеродные нанотрубки и дисперсные металлические частицы (бронза) вводили в компаунд по следующей методике:

- 1) перемешивание жидкой фазы полимера с проводящими компонентами;
- 2) расчет массы УНТ и дисперсных металлических частиц по отношению к массе компаунда по формуле

$$M_{\text{УНТ}} = (M_c C_{\text{УНТ}}) / (100 \text{ масс. \%} - C_{\text{УНТ}}), \quad (1)$$

где $M_{\text{УНТ}}$, M_c – массы УНТ и образца соответственно, г; $C_{\text{УНТ}}$ – концентрация УНТ, масс. %;

- 3) добавление и перемешивание УНТ и дисперсных металлических частиц бронзы в жидкой фазе А (силикон) и Б (отвердитель).

Для синтеза УНТ использовалась СВЧ-метод, который реализован в СВЧ-реакторе (рис. 1).

Первичный измерительный преобразователь (**ПИП**), изготовленный на основе эластомера с УНТ и микроразмерными частицами бронзы, помещали в емкость с жидкостью (ОИ – объект измерения) и подключали к мультиметру UT61E+ (UNI-T, Китай), который выполнял функцию вторичного измерительного прибора (**ВИП**). Аналоговый сигнал изменения электрического сопротивления (ΔR) поступал на мультиметр. Прибор оцифровывал данный сигнал и передавал массив данных на персональный компьютер (**ПК** – ноутбук HUAWEI MateBook D 15), где информация сохранялась в виде таблицы (рис. 2). Изменение механического воздействия определялось по величине ΔR тензорезистора.

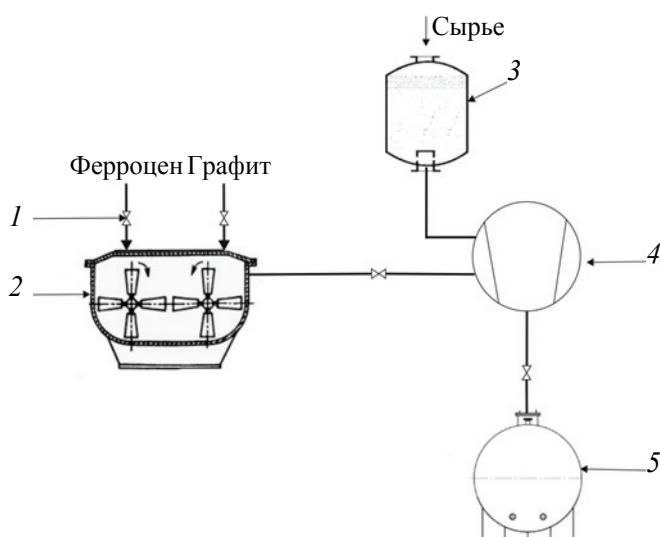


Рис. 1. Технология СВЧ-синтеза УНТ:

1 – вентильная задвижка; 2 – лопастной смеситель; 3 – СВЧ-печь; 4 – вакуумный насос; 5 – накопительная емкость

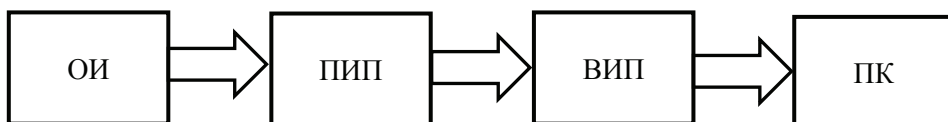


Рис. 2. Схема измерения и регистрации параметров тензорезистора

Спектры комбинационного рассеяния (**КР**) света проанализированы с помощью спектрометра на базе конфокального микроскопа (Spectra, NT-MDT SI), который используется в двух режимах, обеспечивающих сбор сигнала с одного и того же объема. Объектив $100\times$ с $NA = 0,7$, полупроводниковый лазер ($\lambda = 532$ нм, мощность возбуждения около 50 МВт) и точечное отверстие диаметром 100 мкм обеспечивают боковое разрешение около 400 нм и осевое разрешение около 1,6 мкм.

Морфологию УНТ проводили на сканирующем электронном микроскопе (**СЭМ**) JSM 7001F (Jeol, Япония) с детектором Inca Penta FETx3 (Оксфорд, Англия).

Результаты и их анализ

На рисунке 3 представлены результаты морфологического и структурного анализа синтезированных УНТ (СЭМ- и КР-спектроскопия).

Представленные на рис. 3, *а* структуры характеризуются извилистой, сильно переплетенной морфологией, типичной для нанотрубок, и образуют развитую проводящую сеть в виде шарообразных образований. Для синтезированных УНТ значения сдвига КР, соответствующие пикам *D* и *G* равны $1345,2$ и $1577,1$ см^{-1} , соответственно, представленных на рис. 3, *б*. Степень дефектности оценивали с помощью соотношения *D/G* и получили значение, равное 1,172. На рисунке 4 представлены микрофотографии поверхности образцов эластомера, где 4, *а* – детализированное изображение с микроразмерными металлическими частицами, 4, *б* – общий вид поверхности.

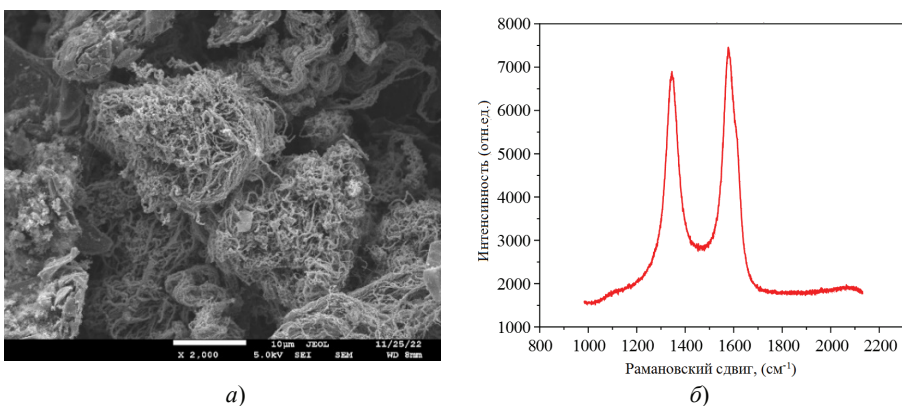


Рис. 3. СЭМ-изображение (а) и КР-спектроскопия (б) УНТ

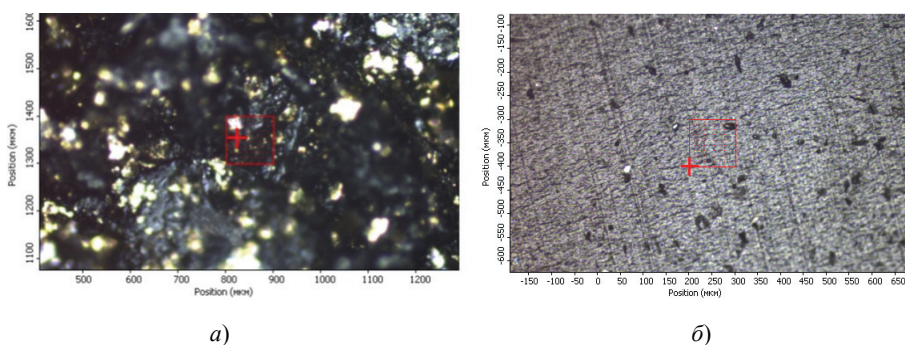


Рис. 4. Поверхность образца эластомера с добавками металлических дисперсных частиц:

а – детализированное изображение с визуализацией микроразмерных металлических частиц, $\times 200$; б – общий вид, $\times 10$

Сравнительный анализ микрофотографий позволяет выявить влияние металлического дисперсного наполнителя на структуру композита. На образце с добавками металлических частиц (см. рис. 4, а) наблюдается их равномерное распределение в полимерной матрице совместно с УНТ, что свидетельствует о хорошей совместимости компонентов.

На рисунке 5 представлена зависимость чувствительности тензодатчика от концентрации УНТ. Чувствительность тензодатчика на основе эластичного композита определяется переходной областью между режимами низкой и насыщенной проводимости, где возникает оптимальная чувствительность. Данная область формируется благодаря эффектам туннельной и прыжковой проводимости, зависящим от концентрации проводящего дисперсного наполнителя. При этом выбор типа полимерной матрицы и дисперсного наполнителя влияет на положение и ширину области оптимальной чувствительности.

Для оценки влияния нано- и микроразмерных составляющих на параметры тензодатчика проведем аналитическую оценку всех составляющих и сформируем общую аналитическую модель [21 – 23]. Углеродные нанотрубки образуют проводящую сеть внутри полимера. При деформации полимера сеть нарушается, расстояние между отдельными УНТ увеличивается. Контакты между УНТ ослабевают или разрываются. Меняется туннельное сопротивление между соседними УНТ, что приводит к увеличению электрического сопротивления R всей пленки при растяжении и уменьшению – при сжатии.

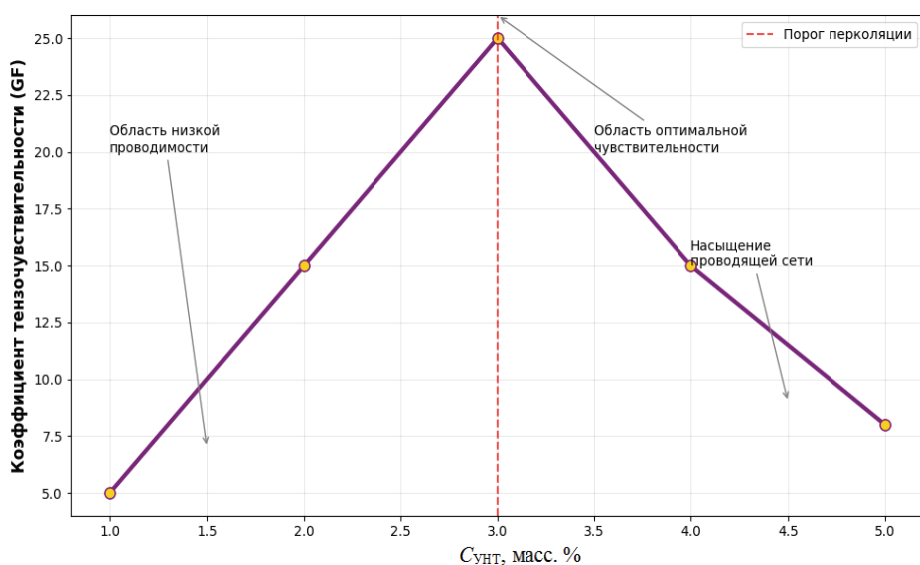


Рис. 5. Зависимость чувствительности тензодатчика от концентрации УНТ

Для оценки влияния изменение формы тензометрического преобразователя может быть использовано следующее аналитическое описание, которое учитывает геометрические параметры:

$$(\Delta R/R_0)_Г = (1 + 2\mu)\varepsilon + 3(1 - 2\mu)\varepsilon^2 + 4\nu(1 - \mu)\varepsilon^3, \quad (2)$$

где ΔR – изменение сопротивления; R_0 – начальное сопротивление композита, Ом; ε – механическая деформация; μ – коэффициент Пуассона полимерной матрицы (0,45...0,49 для кремнийорганического компаунда); $(1 + 2\mu)\varepsilon$ – линейное изменение длины и площади; $3(1 - 2\mu)\varepsilon^2$ – квадратичная поправка для больших деформаций; $4\nu(1 - \mu)\varepsilon^3$ – объемные эффекты при больших деформациях.

Для нахождения коэффициент Пуассона [21] использовано выражение

$$\mu = -\frac{\Delta d}{d} \frac{l}{\Delta l}, \quad (3)$$

где d , l – характерные поперечный (ширина образца) и продольный (длина образца) размеры, м.

Вклад туннельной проводимости для УНТ [22, 23] определяет основную составляющую чувствительности

$$(\Delta R/R_0)_{УНТ} = A_{УНТ} \cdot [\exp(\beta_{УНТ} \varepsilon) - 1] + S_{УНТ} \cdot [1 - \exp(-\delta_{УНТ} \varepsilon)], \quad (4)$$

где $A_{УНТ}$ – амплитуда туннельного эффекта (зависит от концентрации УНТ); $\beta_{УНТ}$ – параметр туннельного переноса (8 – 12 для УНТ/полимер); $S_{УНТ}$ – коэффициент, учитывающий разрыв контактов между УНТ; $\delta_{УНТ}$ – скорость разрыва проводящих путей.

Контактный вклад металлических дисперсных частиц может быть описан с помощью выражения

$$(\Delta R/R_0)_М = B_M \cdot [1 - \exp(-\gamma_M \varepsilon^2)] + D_M \varepsilon \exp(-\eta_M \varepsilon), \quad (4)$$

где B_M – амплитуда, связанная с металлическими частицами; γ_M – параметр пластической деформации металлических частиц; D_M – коэффициент контактного сопротивления; η_M – параметр релаксации контактов металлических частиц.

Для оценки взаимодействия УНТ и микродисперсного металла может быть использовано следующая зависимость:

$$(\Delta R/R_0)_{\text{общ}} = K_1 \varepsilon \cdot (\Delta R/R_0)_{\text{УНТ}} (\Delta R/R_0)_M + K_2 \varepsilon^2 \exp(-\xi \varepsilon), \quad (5)$$

где K_1, K_2 – коэффициенты синергии первого и второго порядка соответственно; ξ – параметр затухания синергетических эффектов.

Полная обобщенная модель

Модель общего относительного изменения сопротивления композитного тензорезистора, объединяющая все рассмотренные механизмы, принимает вид

$$\begin{aligned} \Delta R/R_0 = & (1 + 2\mu)\varepsilon + 3(1 - 2\mu)\varepsilon^2 + 4\mu(1 - \mu)\varepsilon^3 + A_{\text{УНТ}} [\exp(\beta_{\text{УНТ}}\varepsilon) - 1] + \\ & + S_{\text{УНТ}} [1 - \exp(-\delta_{\text{УНТ}} \varepsilon)] + B_M [1 - \exp(-\gamma_M \varepsilon^2)] + D_M \varepsilon \exp(-\eta_M \varepsilon) + \\ & + K_1 \varepsilon (\Delta R/R_0)_{\text{УНТ}} (\Delta R/R_0)_M + K_2 \varepsilon^2 \exp(-\xi \varepsilon). \end{aligned} \quad (6)$$

В соответствии с зависимостями (2) – (6) могут быть построены кривые чувствительности композита тензорезистора с УНТ/полимер + микродисперсные металлы. Проведенные исследования показали, что величина деформации тензодатчика ε при механическом нагружении определяется концентрацией УНТ и долей дисперсных частиц металла в эластичной матрице, что вызывает изменение электрического сопротивления композита ΔR . Основной вклад в такой механизм вносят контактное сопротивление между отдельными УНТ, а также явления туннелирования и прыжковой проводимости электронов [23]. Поскольку эти процессы критически зависят от расстояния между нанотрубками, а на него в свою очередь влияют геометрические параметры УНТ [24], появляется возможность использовать данную зависимость для разработки высокоэффективных тензометрических систем в составе мягкой электроники, предназначенной для работы в условиях больших деформаций [25]. Таким образом, разработанный эластомерный тензопреобразователь обладает регулируемой чувствительностью, которая зависит от типа и концентрации компонентов, введенных в полимерную матрицу.

Заключение

Разработан тензометрический преобразователь на основе эластичной полимерной матрицы с гибридным наполнителем, включающим УНТ и дисперсные частицы бронзы. Применение ультразвуковой гомогенизации обеспечило равномерное распределение компонентов и формирование однородной электропроводящей структуры композита. Методом СВЧ-синтеза получены углеродные наноструктуры, характеризующиеся шарообразными агломератами с переплетением отдельных нанотрубок. По данным спектроскопии комбинационного рассеяния, наличие D - и G -пиков при $1345,2$ и $1577,1 \text{ см}^{-1}$ и отношение интенсивностей $I_D/I_G = 1,172$ свидетельствуют о высокой степени дефектности УНТ, что способствует эффективному туннелированию носителей заряда при деформации.

Экспериментально установлена зависимость тензочувствительности от содержания углеродных нанотрубок. Область оптимальной чувствительности соот-

ветствует переходу между режимами низкой и насыщенной проводимости и достигается при концентрации УНТ 3 масс. %. Предложена аналитическая модель, описывающая вклад геометрических изменений, туннельного эффекта, контактного сопротивления металлических частиц и синергетических эффектов в общее относительное изменение сопротивления композита.

Полученные результаты демонстрируют перспективность использования комбинированных наполнителей на основе УНТ и микродисперсной бронзы для создания тензорезисторов с регулируемой чувствительностью, предназначенных для работы в условиях больших деформаций в мягкой электронике, системах мониторинга и робототехнике.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Государственное задание FZRR-2024-0003).

Список литературы

1. Novel synthetic iron (III) oxide-based force sensor / E. Šutinys, A. Dzedzickis, U. Samukaitė-Bubnienė, V. Bučinskas // *Sensors and Actuators A: Physical*. – 2021. – Vol. 331. – P. 113043. doi: 10.1016/j.sna.2021.113043
2. Tuli, A. Polymer-based wearable nano-composite sensors: a review / A. Tuli, A.P. Singh // *International Journal of Polymer Analysis and Characterization*. – 2023. – Vol. 28, No. 2. – P. 156–191. doi: 10.1080/1023666X.2022.2161737
3. Joseph, J. MEMS-Based Flexible Sensors / J. Joseph, A. S. M. A. Haseeb // *Encyclopedia of Materials: Electronics*, Academic Press. – 2023. – P. 129–137. doi: 10.1016/B978-0-12-819728-8.00132-7
4. Carbon nanotube-reinforced polymer nanocomposites for sustainable biomedical applications: A review / O. K. Abubakre, R. O. Medupin, I. B. Akintunde, O. T. Jimoh, A. S. Abdulkareem, R. A. Muriana, J. A. James, K. O. Ukoba, T.-C. Jen, K. O. Yoro // *Journal of Science: Advanced Materials and Devices*. – 2023. – Vol. 8, No. 2. – P. 100557. doi: 10.1016/j.jsamd.2023.100557
5. Experimental investigations of fractured rock deformation: A direct measurement method using strain gauges / H. Ma, J. Wang, J. Qian, Q. Luo, X. Wei // *Journal of Structural Geology*. – 2023. – Vol. 171. – P. 104869. doi: 10.1016/j.jsg.2023.104869
6. Recent progressive developments in conductive-fillers based polymer nanocomposites (CFPNC's) and conducting polymeric nanocomposites (CPNC's) for multifaceted sensing applications / S. Sharma, A. Verma, S. M. Rangappa, S. Siengchin, S. Ogata // *Journal of Materials Research and Technology*. – 2023. – Vol. 26. – P. 5921–5974. doi: 10.1016/j.jmrt.2023.08.300
7. Effect of carbonyl iron powder incorporation on the piezoresistive sensing characteristics of CNT-based polymeric sensor / D. Jang, H. N. Yoon, I. W. Nam, H. K. Lee // *Composite Structures*. – 2020. – Vol. 244. – P. 112260. doi: 10.1016/j.compstruct.2020.112260
8. A theoretical study on the piezoresistive response of carbon nanotubes embedded in polymer nanocomposites in an elastic region / H. Sourji, J. Yu, H. Jeon, J. W. Kim, C.-M. Yang, N.-H. You, B. J. Yang // *Carbon*. – 2017. – Vol. 120. – P. 427–437. doi: 10.1016/j.carbon.2017.05.059
9. Cetin, M. S. Flexible electronics from hybrid nanocomposites and their application as piezoresistive strain sensors / M. S. Cetin, H. A. K. Toprakci //

Composites Part B: Engineering. – 2021. – Vol. 224. – P. 109199. doi: 10.1016/j.compositesb.2021.109199

10. Arana, G. Piezoresistive and thermoresistive responses of carbon nanotube-based strain gauges with different grid geometric parameters / G. Arana, F. Gamboa, F. Avilés // *Sensors and Actuators A: Physical*. – 2023. – Vol. 359. – P. 114477. doi: 10.1016/j.sna.2023.114477

11. Mao, N. Dynamic response and failure mechanisms of a laser-fabricated flexible thin film strain gauge / N. Mao, P. D. Enrique, A. I. H. Chen, N. Y. Zhou, P. Peng // *Sensors and Actuators A: Physical*. – 2022. – Vol. 342. – P. 113655. doi: 10.1016/j.sna.2022.113655

12. Sensing characterization of an amorphous PDMS/Ecoflex blend composites with an improved interfacial bonding and rubbing performance / A. N. Kouediatouka, Q. Liu, F. J. Mawignon, W. Wang, J. Wang, C. Ruan, K. F. H. Yeo, G. Dong // *Applied Surface Science*. – 2023. – Vol. 635. – P. 157675. doi: 10.1016/j.apsusc.2023.157675

13. Boosting electrical and piezoresistive properties of polymer nanocomposites via hybrid carbon fillers: A review / K. Ke, L. Yue, H. Shao, M.-B. Yang, W. Yang, I. Manas-Zloczower // *Carbon*. – 2021. – Vol. 173. – P. 1020–1040. doi: 10.1016/j.carbon.2020.11.070

14. Highly flexible and multifunctional CNTs/TPU fiber strain sensor formed in one-step via wet spinning / W. Liu, C. Xue, X. Long, Y. Ren, Z. Chen, W. Zhang // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2023. – Vol. 948. – P. 169641. doi: 10.1016/j.jallcom.2023.169641

15. Kumar, S. Strong, stretchable and ultrasensitive MWCNT/TPU nanocomposites for piezoresistive strain sensing / S. Kumar, T. K. Gupta, K. M. Varadarajan // *Composites Part B: Engineering*. – 2019. – Vol. 177. – P. 107285. doi: 10.1016/j.compositesb.2019.107285

16. Fabrication of a strain sensor from a thermoplastic vulcanizate with an embedded interconnected conducting filler network / S. Salaeh, A. Das, K. W. Stöckelhuber, S. Wießner // *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. – 2020. – Vol. 130. – P. 105763. doi: 10.1016/j.compositesa.2020.105763

17. Polymer Composites with Nanomaterials for Strain Gauging: A Review / A. V. Shchegolkov, A. V. Shchegolkov, V. V. Kaminskii, M. A. Chumak // *Journal of Composites Science*. – 2025. – Vol. 9, No. 1. – P. 8. doi: 10.3390/jcs9010008

18. Комбинированный метод исследования акустической кавитации / А. В. Котухов, В. С. Гаврилюк, В. С. Минчук, Н. В. Дежкунов // *Доклады Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники*. – 2020. – Т. 18, № 4. – С. 80–88. doi: 10.35596/1729-7648-2020-18-4-80-88

19. De Oliveira V. P. Assessing the Evolution of Structural Health Monitoring through Smart Sensor Integration / V. P. De Oliveira, A. Reis, J. A. A. S. Filho // *Procedia Structural Integrity*. – 2024 – Vol. 64, P. 653–660. doi: 10.1016/j.prostr.2024.09.323.

20. Zero-point fault detection of load cells in truck scale based on recursive principal component analysis and comprehensive evaluation method. / H. Lin, H. Li, G. Shao, Y. Ye, Y. Yang // *Measurement*. – 2020, Vol. 159, P. 107706. doi: 10.1016/j.measurement.2020.107706.

21. Атапин, В. Г. Сопротивление материалов : базовый курс, дополнительные главы / В. Г. Атапин, А. Н. Пель, А. И. Темников. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2011. – 507 с.

22. Tutak, P. Application of strain gauges in measurements of strain distribution in complex objects / P. Tutak // *Journal of Applied Computer Science Methods*. – 2014. – Vol. 6, No. 2. – P. 135–145. doi: 10.1515/jacsm-2015-0004

23. Zare, Y. Correlation of tunneling diameter between neighboring carbon nanotubes in polymer nanocomposites to interphase depth, tunneling factors and the

percentage of networked nanoparticles / Y. Zare, K. Y. Rhee // *Journal of Physics and Chemistry of Solids*. – 2020. – Vol. 142. – P. 109467. doi: 10.1016/j.jpcs.2020.109467

24. Using bent carbon nanotubes for the fabrication of electromechanical switches / A. Sani, S. Darbari, Y. Abdi, E. Arzi // *Carbon*. – 2012. – Vol. 50, No. 10. – P. 3635–3640. doi: 10.1016/j.carbon.2012.03.035

25. Suo, Z. Mechanics of stretchable electronics and soft machines / Z. Suo // *MRS Bulletin*. – 2012. – Vol. 37, No. 3. – P. 218–225. doi: 10.1557/mrs.2012.32

Elastomer-Based Strain Transducers Modified with Micro- and Nano-Scale Particles

© A. V. Schegolkov¹, Al. V. Schegolkov²

¹ *Department of Electrical Power Engineering, Energynano@yandex.ru; TSTU,
Tambov, Russian Federation;*

² *Research Sector, Advanced Engineering School of Technological Leadership (FDR),
Project Activity Center, Moscow Polytechnic University, Moscow, Russian Federation*

Keywords: scanning electron microscopy; strain gauge; carbon nanotubes; elastomer.

Abstract: This paper presents a study of a strain gauge transducer based on a polymer elastic matrix containing micro-sized bronze particles in the form of powder and nano-sized carbon nanotubes (CNTs). The development of this class of transducers is driven by the need to control extreme mechanical loads and aggressive environments, particularly in systems that require monitoring mechanical impacts on equipment. The strain gauge transducer (strain gage) is manufactured by forming a composite in which a two-component mixture consisting of CNTs and dispersed metal particles (bronze powder) is introduced into the polymer matrix. Mechanical impacts lead to a change in the configuration of the conductive network formed by the interweaving of nanotubes and metal particles, which in turn leads to a change in its electrical resistance (ΔR), due to the effect of electron tunneling, which depends on the distance between individual CNTs. Microwave-synthesized CNTs have a spherical structure with a developed surface area, ensuring good contact between them and the metal particles. The dependence of strain gauge sensitivity on CNT concentration was experimentally established, with an optimal value found at a CNT concentration of 3 wt.% and 3 wt.% bronze.

References

1. Šutinys E., Dzedzickis A., Samukaitė-Bubnienė U., Bučinskas V. Novel synthetic iron (III) oxide-based force sensor, *Sensors and Actuators A: Physical*, 2021, vol. 331, pp. 113043. doi: 10.1016/j.sna.2021.113043

2. Tuli A., Singh A.P. Polymer-based wearable nano-composite sensors: a review, *International Journal of Polymer Analysis and Characterization*, 2023, vol. 28, no. 2, pp. 156-191. doi: 10.1080/1023666X.2022.2161737

3. Joseph J., Haseeb A.S.M.A. MEMS-Based Flexible Sensors, *Encyclopedia of Materials: Electronics*, Academic Press, 2023, pp. 129-137. doi: 10.1016/B978-0-12-819728-8.00132-7

4. Abubakre O.K., Medupin R.O., Akintunde I.B., Jimoh O.T., Abdulkareem A.S., Muriana R.A., James J.A., Ukoba K.O., Jen T.-C., Yoro K.O. Carbon nanotube-

reinforced polymer nanocomposites for sustainable biomedical applications: A review, *Journal of Science: Advanced Materials and Devices*, 2023, vol. 8, no. 2, pp. 100557. doi: 10.1016/j.jsamd.2023.100557

5. Ma H., Wang J., Qian J., Luo Q., Wie X. Experimental investigations of fractured rock deformation: A direct measurement method using strain gauges, *Journal of Structural Geology*, 2023, vol. 171, pp. 104869. doi: 10.1016/j.jsg.2023.104869

6. Sharma S., Verma A., Rangappa S.M., Siengchin S., Ogata S. Recent progressive developments in conductive-fillers based polymer nanocomposites (CFPNC's) and conducting polymeric nanocomposites (CPNC's) for multifaceted sensing applications, *Journal of Materials Research and Technology*, 2023, vol. 26, pp. 5921-5974. doi: 10.1016/j.jmrt.2023.08.300

7. Jang D., Yoon H.N., Nam I.W., Lee H.K. Effect of carbonyl iron powder incorporation on the piezoresistive sensing characteristics of CNT-based polymeric sensor, *Composite Structures*, 2020, vol. 244, pp. 112260. doi: 10.1016/j.compstruct.2020.112260

8. Sourì H., Yu J., Jeon H., Kim J.W., Yang C.-M., You N.-H., Yang B.J. A theoretical study on the piezoresistive response of carbon nanotubes embedded in polymer nanocomposites in an elastic region, *Carbon*, 2017, vol. 120, pp. 427-437. doi: 10.1016/j.carbon.2017.05.059

9. Cetin M.S., Toprakci H.A.K. Flexible electronics from hybrid nanocomposites and their application as piezoresistive strain sensors, *Composites Part B: Engineering*, 2021, vol. 224, pp. 109199. doi: 10.1016/j.compositesb.2021.109199

10. Arana G., Gamboa F., Avilés F. Piezoresistive and thermoresistive responses of carbon nanotube-based strain gauges with different grid geometric parameters, *Sensors and Actuators A: Physical*, 2023, vol. 359, pp. 114477. doi: 10.1016/j.sna.2023.114477

11. Mao N., Enrique P.D., Chen A.I.H., Zhou N.Y., Peng P. Dynamic response and failure mechanisms of a laser-fabricated flexible thin film strain gauge, *Sensors and Actuators A: Physical*, 2022, vol. 342, pp. 113655. doi: 10.1016/j.sna.2022.113655

12. Kouediatouka A.N., Liu Q., Mawignon F.J., Wang W., Wang J., Ruan C., Yeo K.F.H., Dong G. Sensing characterization of an amorphous PDMS/Ecoflex blend composites with an improved interfacial bonding and rubbing performance, *Applied Surface Science*, 2023, vol. 635, pp. 157675. doi: 10.1016/j.apsusc.2023.157675

13. Ke K., Yue L., Shao H., Yang M.-B., Yang W., Manas-Zloczower I. Boosting electrical and piezoresistive properties of polymer nanocomposites via hybrid carbon fillers: A review, *Carbon*, 2021, vol. 173, pp. 1020-1040. doi: 10.1016/j.carbon.2020.11.070

14. Liu W., Xue C., Long X., Ren Y., Chen Z., Zhang W. Highly flexible and multifunctional CNTs/TPU fiber strain sensor formed in one-step via wet spinning, *Journal of Alloys and Compounds*, 2023, vol. 948, pp. 169641. doi: 10.1016/j.jallcom.2023.169641

15. Kumar S., Gupta T.K., Varadarajan K.M. Strong, stretchable and ultrasensitive MWCNT/TPU nanocomposites for piezoresistive strain sensing, *Composites Part B: Engineering*, 2019, vol. 177, pp. 107285. doi: 10.1016/j.compositesb.2019.107285

16. Salaeh S., Das A., Stöckelhuber K.W., Wießner S. Fabrication of a strain sensor from a thermoplastic vulcanizate with an embedded interconnected conducting filler network, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2020, vol. 130, pp. 105763. doi: 10.1016/j.compositesa.2020.105763

17. Shchegolkov A.V., Shchegolkov A.V., Kaminskii V.V., Chumak M.A. Polymer Composites with Nanomaterials for Strain Gauging: A Review, *Journal of Composites Science*, 2025, vol. 9, no. 1, pp. 8. doi: 10.3390/jcs9010008

18. Kotukhov A.V., Gavrilyuk V.S., Minchuk V.S., Dezhkunov N.V. [Combined method of acoustic cavitation research], *Doklady Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta informatiki i radioelektroniki* [Papers of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics], 2020, vol. 18, no. 4, pp. 80-88. doi: 10.35596/1729-7648-2020-18-4-80-88 (In Russ., abstract in Eng.)
19. De Oliveira V. P., Reis A., Filho J. A. A. S. Assessing the Evolution of Structural Health Monitoring through Smart Sensor Integration, *Procedia Structural Integrity*, 2024, vol. 64, pp. 653–660. doi: 10.1016/j.prostr.2024.09.323.
20. Lin H., Li H., Shao G., Ye Y., Yang Y. Zero-point fault detection of load cells in truck scale based on recursive principal component analysis and comprehensive evaluation method, *Measurement*, 2020, vol. 159, pp. 107706. doi: 10.1016/j.measurement.2020.107706.
21. Atapin V.G., Pel' A.N., Temnikov A.I. *Soprotivlenie materialov: bazovyy kurs, dopolnitel'nye glavy* [Strength of Materials: Basic Course, Additional Chapters], Novosibirsk: Izdatel'stvo NGTU, 2011, 507 p. (In Russ.)
22. Tutak P. Application of strain gauges in measurements of strain distribution in complex objects, *Journal of Applied Computer Science Methods*, 2014, vol. 6, no. 2, pp 135-145. doi: 10.1515/jacsm-2015-0004
23. Zare Y., Rhee K.Y. Correlation of tunneling diameter between neighboring carbon nanotubes in polymer nanocomposites to interphase depth, tunneling factors and the percentage of networked nanoparticles, *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 2020, vol. 142, pp. 109467. doi: 10.1016/j.jpcs.2020.109467
24. Sani A., Darbari S., Abdi Y., Arzi E. Using bent carbon nanotubes for the fabrication of electromechanical switches, *Carbon*, 2012, vol. 50, no. 10, pp. 3635-3640. doi: 10.1016/j.carbon.2012.03.035
25. Suo Z. Mechanics of stretchable electronics and soft machines, *MRS Bulletin*, 2012, vol. 37, no. 3, pp. 218-225. doi: 10.1557/mrs.2012.32
-

Mit Mikro- und Nanopartikeln modifizierte Dehnungsmessstreifen auf Elastomerbasis

Zusammenfassung: Dieser Artikel beschreibt eine Studie des Dehnungsmessstreifens auf Basis einer elastischen Polymermatrix mit mikrometergroßen Bronzepulverpartikeln und nanometergroßen Kohlenstoffnanoröhren (CNTs). Die Entwicklung dieser Klasse von Wandlern ist durch den Bedarf an Überwachung extremer mechanischer Belastungen und aggressiver Umgebungen vorangetrieben, insbesondere in Systemen, die mechanische Einwirkungen auf Geräte erfassen müssen. Der Dehnungsmessstreifen ist durch die Bildung eines Komposits hergestellt, in das eine Zweikomponentenmischung aus CNTs und dispergierten Metallpartikeln (Bronzepulver) in die Polymermatrix eingebracht wird. Mechanische Einwirkungen verändern die Konfiguration des leitfähigen Netzwerks, das durch die Verflechtung von Nanoröhren und Metallpartikeln entsteht. Dies führt zu einer Änderung des elektrischen Widerstands (ΔR) aufgrund von Elektronentunnelierung, die vom Abstand zwischen den einzelnen CNTs abhängt. Mikrowellensynthetisierte CNTs weisen eine sphärische Struktur mit einer großen Oberfläche auf, wodurch ein guter Kontakt zwischen ihnen und den Metallpartikeln gewährleistet wird. Die Abhängigkeit der Dehnungsmessstreifenempfindlichkeit von der CNT-Konzentration ist experimentell ermittelt. Ein optimaler Wert ist bei einer CNT-Konzentration von 3 Gew.-% und 3 Gew.-% Bronze gefunden.

Transducteurs de contrainte à base d'élastomère modifiés par des particules micro et nanométriques

Résumé: Est présentée une étude d'un convertisseur de contrainte fabriqué à partir d'une matrice élastique polymère contenant des particules de bronze de taille micro sous forme de poudre et des particules nanométriques-nanotubes de carbone (NTC). Le développement de cette classe de transducteurs est dû à la nécessité de surveiller les charges mécaniques extrêmes et les environnements corrosifs, en particulier dans les systèmes où il est nécessaire de surveiller les effets mécaniques sur l'équipement. Le transducteur de contrainte (résistance à la contrainte) est fabriqué en formant un composite dans lequel un mélange à deux composants composé de NTC et de particules métalliques dispersées (poudre de bronze) est introduit dans une matrice polymère. Les effets mécaniques entraînent une modification de la configuration du réseau conducteur formé par l'entrelacement de nanotubes et de particules métalliques, ce qui entraîne une modification de sa résistance électrique (RE), due à l'effet de tunnel d'électrons dépendant de la distance entre les NTC individuels. Les NTC synthétisés par micro-ondes ont une structure sphérique avec une surface développée qui assure un bon contact entre eux et les particules métalliques. Est établi expérimentalement que la sensibilité de la cellule de charge dépend de la concentration de CNT, avec une valeur optimale pour une concentration de CNT égale à 3 masses. % et de bronze égale à 3 masses. %.

Авторы: *Щегольков Александр Викторович* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроэнергетика», ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Российская Федерация; *Щегольков Алексей Викторович* – кандидат технических наук, доцент сектора научной деятельности, старший научный сотрудник Передовой инженерной школы технологического лидерства FDR, Центр проектной деятельности, ФГАОУ ВО «Московский политехнический университет», Москва, Российская Федерация.

Для заметок