

## ВЛИЯНИЕ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ СОДЕРЖАЩЕГО ОДНОСТЕННЫЕ УГЛЕРОДНЫЕ НАНОТРУБКИ СОПОЛИМЕРА ТЕТРАФТОРЭТИЛЕНА С ЭТИЛЕНОМ

© 2023 г. В. П. Селькин<sup>a</sup>, \*, С. В. Копылов<sup>b</sup>, \*\*

<sup>a</sup> Институт механики металлокомпозитных систем имени В.А. Белого Национальной академии наук Беларусь, ул. Кирова, 32А, 246050, Гомель, Беларусь

<sup>b</sup> Московский политехнический университет, ул. Большая Семёновская, 38, 107023, Москва, Россия

\*E-mail: selkin\_y@mail.ru

\*\*E-mail: kopsv@mail.ru

Поступила в редакцию 05.05.2023 г.

После доработки 16.05.2023 г.

Принята к публикации 19.05.2023 г.

DOI: 10.31857/S0023119323050121, EDN: VZAUPT

Одностенные углеродные нанотрубки (ОУНТ) были открыты еще в 1993 г. [1]. ОУНТ обладают многими уникальными характеристиками [2], включая хорошую электропроводность. Однако из-за трудности синтезирования углеродных нанотрубок с заданными электронными параметрами [3] их использование в электронике пока ограничено. В то же время совершенствование технологии производства нанотрубок, и ОУНТ в частности, позволяет все шире применять их при создании антистатических и электропроводящих материалов на полимерной основе. Нами получены путем введения ОУНТ Tuball производства компании OCSiAl опытные образцы электропроводящего полимерного композита (удельное объемное электрическое сопротивление менее  $10^5$  Ом м) на основе сополимера тетрафторэтилена с этиленом (ЭТФЭ), имеющего исходное значение удельного объемного электрического сопротивления более  $10^{14}$  Ом м [4]. Поскольку известно, что радиационное сшивание ЭТФЭ повышает его механические характеристики в области высоких эксплуатационных температур [5] нами было осуществлена радиационная обработка полученного электропроводящего композита излучением ускоренных электронов. При этом обнаружено снижение в 5–6 раз удельного электрического сопротивления материала.

### МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования являлся отечественный ЭТФЭ – фторопласт-40 марки П (порошок) по ТУ 301-05-17-89. Для введения в полимерную матрицу ОУНТ использовали концентрат, представляющий собой деагломерированные в поли-

этиленовом воске трубы Tuball (10% ОУНТ, 90% полиэтиленовый воск). Концентрат механически смешивали с порошком ЭТФЭ при соотношении 1 : 20 (содержание ОУНТ в смеси около 0.5 мас. %) с последующим прессованием при температуре 290–300°C и давлении 20 МПа для получения пленок толщиной  $0.5 \pm 0.05$  мм. Количество исследованных образцов 10. Радиационную обработку осуществляли генерируемым ускорителем ЭЛВ-4 излучением электронов с энергией 1.0 МэВ, обеспечивающей их линейный пробег в ЭТФЭ больше, чем толщина испытываемых образцов. Мощность поглощенной дозы 104 Гр/с. Поглощенная доза 350 кГр, Поглощенную композитом дозу излучения определяли с помощью пленочных детекторов ДПЭ-50/2000 [6]. Удельное объемное электрическое сопротивление измеряли по ГОСТ 6433.2-71 с помощью мегаомметра Е6-32 при диаметре измерительного и высоковольтного электродов 25 и 40 мм и испытательном напряжении 100 В. Для исключения влияния на показания электретов, которые могли образоваться вследствие воздействия излучения ускоренных электронов, образцы после облучения выдерживали между заземленными металлическими пластинами в течение 7 суток, после чего методом подъемного электрода по ГОСТ 25209-82 контролировали отсутствие поверхностных зарядов.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Обнаружено, что удельное объемное электрическое сопротивление электропроводящего композита на основе ЭТФЭ, содержащего 0.5% ОУНТ, после облучения снизилось с  $6.8 \times 10^4$  Ом

м до  $1.1 \times 104$  Ом м. При этом отмечено, что при хранении образцов при комнатной температуре в течение 2 мес сопротивление незначительно выросло до  $1.3 \times 104$  Ом м. Однако это изменение находится в пределах погрешности измерения при доверительной вероятности 0.95, поэтому достоверно утверждать об обратимости обнаруженного эффекта нельзя. Снижение в 6 раз при воздействии потока ускоренных электронов удельного электрического сопротивления композита ЭТФЭ с ОУНТ можно объяснить на основании результатов работ [7, 8] при предположении образования в нем при введении ОУНТ трехмерной электропроводящей системы нанотрубок. В работе [7] сделан вывод, что проводимость сложной структуры, содержащей большое число ОУНТ, определяется имеющими более высокое сопротивление полупроводниковыми нанотрубками, и транспорт электронов в таких материалах ассоциируется с трехмерной прыжковой электропроводностью в полупроводниках. При этом в [8] показано, что прыжковая проводимость органических полупроводников экспоненциально убывает при ориентационном упорядочении системы. Отсюда можно сделать вывод, что обнаруженное снижение удельного электрического сопротивления композита может быть вызвано появлением при радиационном воздействии в структуре материала атомных дефектов в различных зарядовых состояниях, снижающих степень ориентационного упорядочения электропроводящей системы, образованной ОУНТ, и повышающих прыжковую проводимость.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлено, что обработка потоком ускоренных электронов оказывает существенное влияние на электропроводность ЭТФЭ содержащего ОУНТ, снижая в 5–6 раз удельное объемное электрическое сопротивление данного композита.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Bethune D.S., Kiang C.H., de Vries M.S. et al.* // *Nature*. 1993. V. 363. P. 605. <https://doi.org/10.1038/363605a0>
2. *Dresselhaus M.S., Dresselhaus G., Jorio A.* // *Annual Review of Materials Research*. 2004. V. 34. P. 247. <https://doi.org/10.1146/annurev.matsci.34.040203.114607>
3. *Елецкий А.В.* // *Успехи физических наук*. 2009. Т. 179. № 3. С. 225. <https://doi.org/10.3367/UFNr.0179.200903a.0225>
4. *Sina Ebnesajjad*. *Fluoroplastics*, V. 2, Second Edition: Melt processible fluoropolymers. The definitive user's guide and data book. Amsterdam: Elsevier, 2015. 766 p.
5. *Селькин В.П., Копылов С.В.* // *Химия высоких энергий*. 2022. Т. 56. № 5. С. 414. <https://doi.org/10.31857/S0023119322050151>
6. *Selkin V., Pleskachevsky Yu., Smirnov V., Gochaliev G., and Rubin B.* // *Int. J. of Rad. Appl. and Instr. Part C. Radiation Physics and Chemistry*. 1990. V. 35. № 4. P. 750. [https://doi.org/10.1016/1359-0197\(90\)90309-6](https://doi.org/10.1016/1359-0197(90)90309-6)
7. *Лобач А.С., Буравов Л.И., Спицына Н.Г. и др.* // *Химия высоких энергий*. 2011. Т. 45. № 4. С. 360.
8. *Венедиктов В.А., Звягин И.П.* // *Вестник Московского университета*. Сер. 3. Физика. Астрономия. 2011. № 6. С. 89.