

РАЗРАБОТКА ЭЛЕКТРОПРОВОДНОГО ПОЛИМЕРНОГО КОМПОЗИТА НА ОСНОВЕ ЛИНЕЙНОГО ПОЛИЭТИЛЕНА НИЗКОЙ ПЛОТНОСТИ, МОДИФИЦИРОВАННОГО ВЫСОКОСТРУКТУРНЫМ ТЕХНИЧЕСКИМ УГЛЕРОДОМ

Е. А. Рогачев, А. А. Каленчук

Омский государственный технический университет,
Россия, 644050, г. Омск, пр. Мира, 11

Экспериментально исследованы разработанные полимерные композиты на основе линейного полиэтилена низкой плотности, модифицированного техническим углеродом марки OMCARB CH85. Комплексный анализ свойств композитов показал, что применение данного вида наполнителя обеспечивает перколяционный переход при 25 % массовых долей наполнителя, в результате которого удельное сопротивление уменьшается на восемь порядков. Для образцов с меньшей концентрацией характерны значения электросопротивления, соответствующие диэлектрикам. При достижении концентрации наполнителя, равной 20 % масс., наблюдается максимальная жесткость материала, а характер растяжения меняется с пластичного на хрупкий. Электронная микроскопия образцов указывает на сетчатую микроструктуру полимерной матрицы, в которую встраиваются частицы технического углерода и действуют как центры кристаллизации. В результате чего происходит усиление механических свойств и электропроводности композита.

Ключевые слова: электропроводный технический углерод, линейный полиэтилен низкой плотности, электропроводные полимерные композиты, структура полимерных композитов, механические свойства полимерных композитов, изготовление полимерных композитов, электронная микроскопия полимеров.

Введение

Электропроводные полимерные композиционные материалы находят широкое применение в современной индустрии благодаря их уникальным свойствам, таким как высокая электропроводность в сочетании с малым весом и гибкостью материала. Данное сочетание свойств делает электропроводные полимерные композиционные материалы привлекательными для использования в различных отраслях, например, для создания экранов силовых кабелей высокого напряжения [1], в качестве термоэлектрических материалов [2], конденсаторов [3, 4] антистатических материалов [5]. Для улучшения свойств такие композиты модифицируют проводящими наполнителями [6–8].

Одним из ключевых наполнителей в полимерных композитах является технический углерод, который обладает высокой электропроводимостью и добавляется в матрицу полимера для придания материалу электропроводящих свойств [9, 10]. Технический углерод характеризуется большими значениями удельной поверхности и хорошей диспергируемостью в матрице полимера, что способствует формированию электропроводящей сетки в композите [11].

Технический углерод марки OMCARB CH85 выделяется на фоне других материалов благодаря своим уникальным преимуществам, которые делают его особенно ценным при создании электропроводных полимерных композиционных материалов. Ключевые преимущества включают высокую термостойкость и сохранение размеров при повышен-

ных температурах, устойчивость к агрессивным химическим средам, а также выдающиеся показатели прочности и износостойкости [12].

Принадлежность к классу высокоструктурных марок ТУ позволяет улучшать механические свойства полимерных композитов, в частности, прочность и устойчивость к износу. Это увеличивает общую прочность материала. Кроме того, высокоструктурный углерод улучшает электропроводность и теплопроводность композитов, что делает их идеальными для применения в электронике и теплоотводящих системах [13]. Высокая электропроводность OMCARB CH85 критически важна для функциональности электропроводных материалов [14].

Использование линейного полиэтилена низкой плотности в качестве матрицы для композитов обладает множеством преимуществ [15, 16]. Этот материал отличается низкой плотностью, что придает легкость композитам, делая их удобными в применениях, где важен вес изделия. Линейный полиэтилен низкой плотности также отличается своей ударопрочностью и гибкостью, что делает его отличным выбором для композитов, применяемых в условиях переменных нагрузок и деформаций. Его химическая стойкость позволяет использовать его в изготовлении композитов для агрессивных сред.

Таким образом, целью данной работы является разработка электропроводного полимерного композиционного материала на основе линейного полиэтилена низкой плотности с добавлением технического углерода марки OMCARB CH85.

Объекты и методы исследования

В рамках исследования полимерных композиционных материалов использовался линейный полиэтилен низкой плотности (ЛПЭНП) марки ЛПЭНП RM3845UV с добавлением технического углерода (ТУ) марки OMCARB CH85. Получены образцы полимерных композиционных материалов (ПКМ) с концентрацией наполнителя от 5 % до 25 % с шагом в 5 %.

В процессе изготовления ПКМ проводилась дегидратация компонентов смеси, а именно гранулы ЛПЭНП сушили в термошкафу в течение 2 часов при температуре 80 °С, а ТУ — в муфельной печи при температуре 125 °С в течение 4 часов. Далее в шаровой мельнице ВМУ-100 в течение 1 часа осуществлялось перемешивание с одновременной механической активацией компонентов смеси.

Процесс введения наполнителя в полимерную матрицу был осуществлен методом одношнековой экструзии на лабораторном экструдере SCAMEX RHEOSCAM Micro-extruder при температуре 150 °С. Полученный ПКМ гранулировался с использованием гранулятора Scamex Granulateur Fraise. С целью обеспечения однородности распределения наполнителя в композите полученный гранулят повторно экструдировался и гранулировался. Образцы для лабораторных испытаний изготавливались методом литья в форму. Литье осуществлялось с помощью малогабаритного термопластавтомата МиниТПА-100.

Определение удельного объемного сопротивления проводилось в соответствии с ASTM D 991 – 89. Электропроводность материала измерялась при помощи прибора Milli-TO 3 с четырехполюсным электродом VE-D-991, работающего по методу Кельвина, что позволяет точно определить сопротивление материалов.

Для исследования механических свойств проводили испытания на разрывной машине Zwick/Roell Xforce HP Z010. Испытания композиционных материалов проводили в соответствии с ГОСТ 11262-2017.

Показатель текучести расплава (ПТР), ключевой параметр, характеризующий поведение полимера в процессе его формообразования, измеряли с использованием прибора Instron CEAST Modular Melt Flow Tester MF 20. Испытания проводились в соответствии с ГОСТ 11645-73 при температуре 190 °С и под нагрузкой 2,160 кг.

Микроструктура образцов была исследована с помощью растрового электронного микроскопа Jeol JCM-5700. Для этого производился холодный скол образцов ПКМ в среде жидкого азота.

Плотность полученных образцов измеряли методом гидростатического взвешивания, в качестве среды использовался изопропанол-2.

Параметры надмолекулярной структуры рассчитывались на основе рентгенограмм, полученных на дифрактометре Shimadzu XRD-7000.

Комплексное применение различных методов исследования позволило получить всестороннюю характеристику свойств полимерного композита, что является важным этапом в разработке новых материалов с заданными свойствами.

Результаты эксперимента и их обсуждение

Характеристики электрических и механических свойств исследованных композитов представлены в табл. 1. В ненаполненном ЛПЭНП протекание тока через образец не регистрируется, так как значение удельного сопротивления для образца без углерода выходит за пределы диапазона измерительного прибора, так как полиэтилен является диэлектриком. С добавлением углерода до массовой доли 5 % удельное сопротивление полученного материала резко снижается, что указывает на увеличение электропроводности. Это может быть связано с формированием проводящих путей между частицами углерода. Однако для образца с концентрацией наполнителя 20 % наблюдался рост сопротивления. Данный факт, возможно, связан с образованием агломератов наполнителя, препятствующего его равномерному распределению в полимерной матрице, при этом такая концентрация была недостаточной для появления перколяционного кластера. Тем не менее композиты с концентрацией наполнителя от 5 до 20 % масс. имеют значение удельного сопротивления, соответствующего диэлектрическим материалам. При 25 % масс. концентрации технического углерода наблюдается снижение удельного сопротивления на 8 порядков до значения, соответствующего проводникам. Резкое снижение сопротивления объясняется достижением порога перколяции, при котором частицы углерода формируют непрерывную проводящую сеть внутри полимерной матрицы. Материалы данного типа применяются при изготовлении датчиков и средств защиты от электромагнитных помех [17].

Анализ механических свойств (табл. 1) позволяет сделать следующие выводы о влиянии содержания технического углерода на свойства полимерных композитов: с увеличением содержания технического углерода в полимерных композитах наблюдается увеличение модуля Юнга. Максимальное значение модуля Юнга наблюдается у композита с концентрацией наполнителя 20 % масс., которое

Таблица 1. Электрические и механические свойства композитов
Table 1. Electrical and mechanical properties of composites

Содержание технического углерода, масс. %	Удельное сопротивление, Ом*м	Модуль Юнга, МПа	Прочность при растяжении, МПа	Прочность при разрыве, МПа	Относительное удлинение при разрыве, %	Относительное удлинение при максимальной нагрузке, %
0	>	674±23	26±7	25±8	880±250	820±320
5	(6,9±0,9)×10 ¹⁰	870±60	19,5±3,2	17±5	500±100	420±140
10	(1,08±0,05)×10 ¹⁰	800±38	—	17,0±3,1	800±450	—
15	(2,19±0,28)×10 ¹⁰	1000±60	—	17±6	700±190	—
20	(5,23±0,25)×10 ¹⁰	1040±90	—	16,8±2,3	410±130	—
25	250±60	960±30	—	15,4±3,7	480±300	—

Таблица 2. Показатели текучести расплава композитов
Table 2. Melt flow rates of composites

CH85 масс., %	ПТР, г/10 мин
0	4,774
5	3,776
10	3,120
15	2,727
20	2,162
25	1,364

Таблица 3. Плотность полимерных композиционных материалов

Table 3. Density of polymer composite materials

CH85 масс., %	Плотность ПКМ, г/см ³
0	907,0±0,9
5	967,7±3,5
10	959,7±3,8
15	995±17
20	1026±31
25	1040±5

в 1,5 раза выше, чем у ненаполненного полимера. Изменение тенденции увеличения модуля Юнга с увеличением содержания ТУ изменяется при содержании наполнителя 25 % масс., для которого среднее значения модуля Юнга на 8 % меньше, чем для композита с 20 % масс. ТУ. Можно предположить, что это объясняется известным эффектом «насыщения» матрицы наполнителем, связанным с подавляющим воздействием избыточной поверхности наполнителя на матрицу [18]. Прочность при растяжении и прочность при разрыве снижаются с увеличением концентрации углерода. Относительное удлинение при разрыве также снижается.

Технический углерод увеличивает жесткость композитов, но одновременно снижает их прочность. Это может быть важным фактором при выборе материалов для различных применений, где требуется определенный баланс между свойствами.

При добавлении углерода механические свойства композитов на основе ЛПЭНП изменяются. Увеличение содержания углерода приводит к увеличению модуля упругости, что указывает на улучшение жесткости за счет увеличения содержания наполнителя. Однако при высоких концентрациях углерода наблюдается изменение характера деформации с пластичного на более хрупкое поведение.

Наполнитель также оказывает влияние на текучесть расплава композитов. Показатель текучести расплава композитов изменяется в зависимости от концентрации наполнителя (табл. 2).

Значения показателей текучести расплава (ПТР) показывают, что технический углерод влияет на текучесть расплава полимерных композитов, что имеет последствия, которые важно учитывать при их обработке и формовании. С увеличением концентрации углерода общая тенденция заключается в уменьшении ПТР, увеличении вязкости и снижении текучести, особенно при концентрации 25 %, вероятно, из-за сильного взаимодействия между частицами углерода.

Анализируя представленные значения плотности материалов (табл. 3), можно сделать следующие

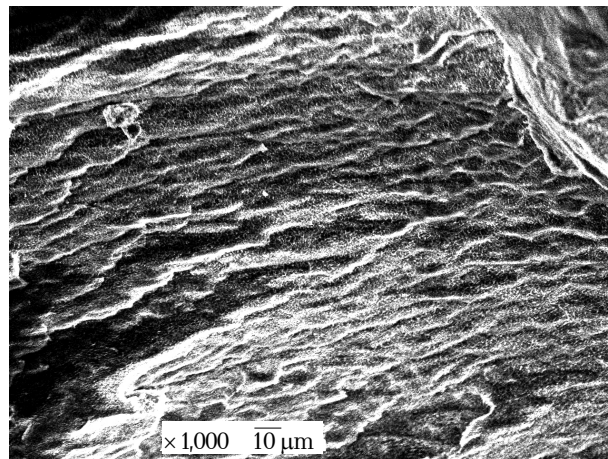


Рис. 1. РЭМ-микрофотография полимерного композиционного материала на основе ЛПЭНП с добавлением ТУ OMCARB CH85 концентрацией 5 %, увеличение $\times 1000$

Fig. 1. SEM-images a polymer composite material based on LLDPE with filler of carbon black «OMCARB CH85» a concentration of 5 %, magnification $\times 1000$

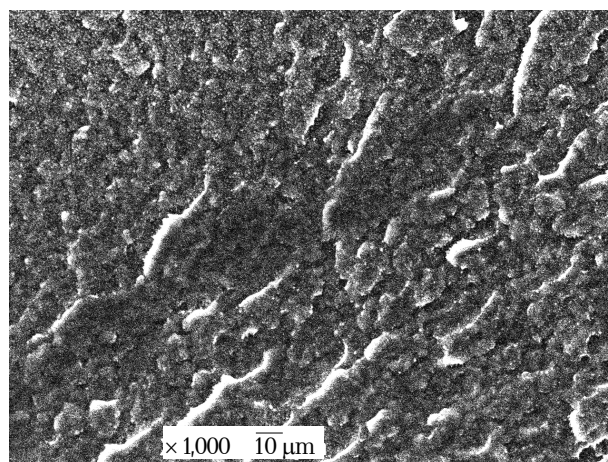


Рис. 2. РЭМ-микрофотография полимерного композиционного материала на основе ЛПЭНП с добавлением ТУ OMCARB CH85 концентрацией 15 %, увеличение $\times 1000$

Fig. 2. SEM-images a polymer composite material based on LLDPE with filler of carbon black «OMCARB CH85» a concentration of 15 %, magnification $\times 1000$

выводы о влиянии концентрации технического углерода на плотность полимерных композиционных материалов. При добавлении 5 % масс. плотность увеличивается. Это указывает на то, что углерод, обладающий большей плотностью, заполняет пространство в полимерной матрице, увеличивая общую плотность полученного материала. При 10 % концентрации углерода плотность незначительно снижается, что может быть связано с агломерацией частиц углерода и формированием пористой структуры. При дальнейшем увеличении концентрации плотность композита возрастает, что может свидетельствовать о повышении плотности упаковки частиц наполнителя. Это коррелирует с упомянутым выше фактом изменения тенденции роста модуля Юнга, предположительно так же связанным с агломерацией частиц наполнителя.

С помощью сканирующей электронной микроскопии получена информация о морфологии, структуре и распределении наполнителя в композитном

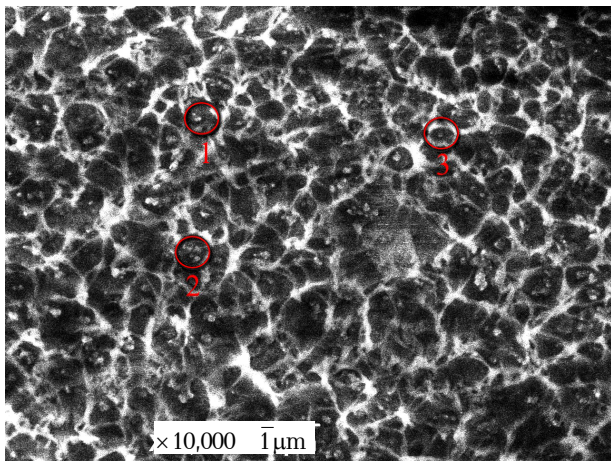


Рис. 3. РЭМ-микротография полимерного композиционного материала на основе ЛПЭНП с добавлением ТУ OMCARB CH85 концентрацией 5 %, увеличение $\times 10000$: 1, 2, 3 — характерные участки агрегации наполнителя

Fig. 3. SEM-images a polymer composite material based on LLDPE with filler of carbon black «OMCARB CH85» a concentration of 15 %, magnification $\times 10000$: 1, 2, 3 — typical areas of filler aggregation

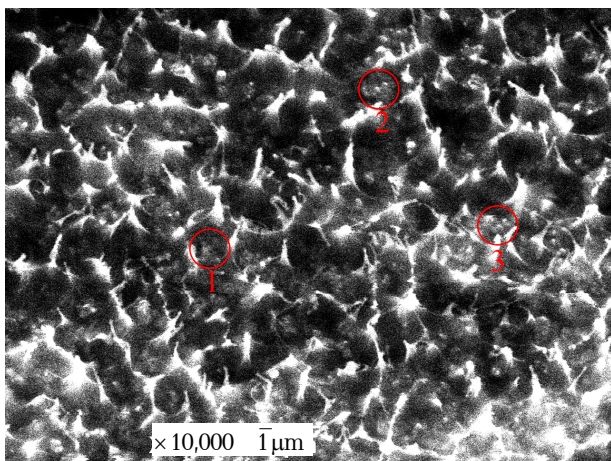


Рис. 4. РЭМ-микротография полимерного композиционного материала на основе ЛПЭНП с добавлением ТУ OMCARB CH85 концентрацией 25 %, увеличение $\times 10000$: 1, 2, 3 — характерные участки агрегации наполнителя

Fig. 4. SEM-images a polymer composite material based on LLDPE with filler of carbon black «OMCARB CH85» a concentration of 25 %, magnification $\times 10000$: 1, 2, 3 — typical areas of filler aggregation

материале. Характерные микротографии ПКМ с концентрацией 5 % масс. и 25 % масс. представлены на рис. 1–4. При увеличении $\times 1000$ крат на микротографиях (рис. 1–2) идентифицируются чёткие границы надмолекулярных образований. Идентифицируются контуры сферолитов, которые представляют собой кристаллические области в аморфной матрице полиэтилена. Для образца ЛПЭНП+5масс.%СН85 (рис. 1) сферолиты имеют овальную форму размером в среднем 5×20 мкм. Для образца ЛПЭНП+25масс.%СН85 (рис. 2) более характерным является неправильная форма сферолитов, размером около 10 мкм. Размер и распределение сферолитов указывают на однородность структуры, что связано с влиянием технического углерода на процесс затвердевания полимерной ма-

трицы.

При большем увеличении микротографии (рис. 3–4) наблюдается детальное строение композиционных материалов. Сферические частицы углерода, распределённые по всей поверхности, встраиваются в волокнистую сеть полиэтилена. Эта сеть состоит из протяженных образований, сформированных макромолекулами полимера, создающими прочную и гибкую структуру. При этом с увеличением концентрации наполнителя плотность его упаковки возрастает.

Выводы и заключение

Исследование влияния технического углерода на свойства полимерных композитов на основе линейного полиэтилена низкой плотности показало, что удельное электрическое сопротивление композита значительно снижается при добавлении углерода, достигая порога перколяции при 25масс.%ТУ, что свидетельствует о формировании непрерывной проводящей сети. Достигнутый уровень электропроводности позволяет рекомендовать композит ЛПЭНП+25масс.%ТУ для применения в качестве антистатического материала, самовосстанавливающихся предохранителей.

Текущее расплава композита изменяется в зависимости от концентрации углерода, что важно для процессов обработки и формования. Максимальный модуль Юнга материала наблюдается при 20 % концентрации углерода.

В интервале массовых долей от 5 до 20 % наполнитель СН85 обеспечивает повышение модуля упругости композитов на основе ЛПЭНП без придания им электропроводящих свойств. Плотность композита увеличивается с добавлением углерода, что указывает на его эффективное заполнение в матрице.

Результаты исследования показывают на различную роль концентрации углерода в изменении баланса между электропроводностью, жесткостью, прочностью и гибкостью композита и характеристиками физико-механических свойств. Оптимальное содержание углерода зависит от конкретной области применения разрабатываемых ПКМ и требуемого баланса между механическими свойствами.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект № FSGF-2024-0003.

Список источников

- Huang X., Sun B., Yu C. [et al.]. Highly conductive polymer nanocomposites for emerging high voltage power cable shields: experiment, simulation and applications // High Voltage. 2020. Vol. 5. P. 387–396. DOI: 10.1049/hve.2020.0101.
- Chen X., Zheng Y., Han X. [et al.]. Low-dimensional Thermoelectric Materials. // Flexible Thermoelectric Polymers and Systems. 2022. P. 210. DOI: 10.1002/9781119550723.ch7.
- Hoefer M., Bandaru P. R. Determination and enhancement of the capacitance contributions in carbon nanotube based electrode systems // Applied Physics Letters. Vol. 95 (18). DOI: 10.1063/1.3258353.
- Golovakhin V., Litvinova V. I., Manakhov A. [et al.]. Conductive polymer-multi-walled carbon nanotube composites for gas sensors and supercapacitors // Materials Today Communications. 2024. Vol. 39. 109163. DOI: 10.1016/j.mtcomm.2024.109163.

5. Рагушина М. Д., Евсеева К. А., Калугина Е. В., Ушакова О. Б. Полимерные композиционные материалы с антистатическими и электропроводящими свойствами // Пластические массы. 2021. № 3–4. С. 6–9. DOI: 10.35164/0554-2901-2021-3-4-6-9. EDN: QFMBRB.

6. Цобкалло Е. С., Москалюк О. А., Степашкина А. С. Функциональные композиционные полимерные материалы электротехнического назначения // Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (Технического университета). 2020. № 52. С. 28–35. DOI: 10.36807/1998-9849-2020-52-78-28-35. EDN: ZRBXWB.

7. Наумова Л. Н., Ватаман В. Ю., Сущенко Н. А. [и др.] Разработка компонентного состава порошковой краски с антистатическими свойствами на основе полиэфирной смолы // Вестник Сыктывкарского университета. Серия 2. Биология. Геоология. Химия. Экология. 2023. № 2 (26). С. 54–69. DOI: 10.34130/2306-6229-2023-2-54. EDN: EDLTQL.

8. Мякин С. В., Чекуряев А. Г., Голубева А. И. [и др.]. Электрические свойства полимерных композитов на основе титаната бария, модифицированного графеном // Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета). 2019. № 49 (75). С. 65–68. EDN: ILTQBG.

9. Badrul F., Abdul H., Mohd S. [et al.] Preliminary investigation on the correlation between mechanical properties and conductivity of low-density polyethylene/carbon black (LDPE/CB) conductive polymer composite (CPC) // Journal of Physics Conference Series. 2022. Vol. 2169 (1). 012020. DOI: 10.1088/1742-6596/2169/1/012020.

10. Azizi S., David E., Fr̄ichette M. F. [et al.]. Electrical and thermal phenomena in low-density polyethylene/carbon black composites near the percolation threshold // Journal of Applied Polymer Science. 2019. Vol. 136. DOI: 10.1002/app.47043.

11. Ou X., Ye G., Jiang J. [et al.]. Improving electrical and mechanical properties of cement composites by combined addition of carbon black and carbon nanotubes and steel fibers // Construction and Building Materials. 2024. Vol. 438. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.136931.

12. Моисеевская Г. В., Раздьяконова Г. И., Петин А. А. [и др.] Инновационные направления расширения ассортимента технического углерода в России // Химия в интересах устойчивого развития. 2017. Т. 25, № 1. С. 49–56. DOI: 10.15372/KhUR20170107. EDN: XWRWIN.

13. Шадрин Н. В., Антоев К. П. Электропроводящая резина с эффектом положительного температурного коэффициента сопротивления из шинного регенерата // Перспективные материалы. 2021. № 3. С. 21–29. DOI: 10.30791/1028-978X-2021-3-21-29. EDN: XBTTUT.

14. Моисеевская Г. В., Раздьяконова Г. И., Караваев М. Ю. [и др.] Исследование электропроводного технического углерода серии «OMCARB». Часть 1. Физико-химические свойства.

Оценка качества диспергирования в натуральном каучуке // Каучук и резина. 2014. № 1. С. 40–42. EDN: SAXJBN.

15. Ухарцева И. Ю., Цветкова Е. А., Гольдаде В. А. Полимерные упаковочные материалы для пищевой промышленности: классификация, функции и требования (обзор) // Пластические массы. 2019. № 9–10. С. 56–64. DOI: 10.35164/0554-2901-2019-9-10-56-64. EDN: VWKDVH.

16. Brito S. da C., Pereira V. A. C., Prado A. C. F. [et al.] Antimicrobial potential of linear low-density polyethylene food packaging with Ag nanoparticles in different carriers (Silica and Hydroxyapatite) // Journal of Microbiological Methods. 2024. Vol. 217–218. DOI: 10.1016/j.mimet.2023.106873.

17. Pang H., Xu L., Yan D.-X. [et al.] Conductive polymer composites with segregated structures // Progress in Polymer Science. 2014. Vol. 39 (11). P. 1908–1933. DOI: 10.1016/j.progpolymsci.2014.07.007.

18. Машков Ю. К. [и др.] Композиционные материалы на основе политетрафторэтилена. Структурная модификация: моногр. Москва: Машиностроение. 2005. 240 с. ISBN 5-217-03288-X.

РОГАЧЕВ Евгений Анатольевич, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Физика» Омского государственного технического университета (ОмГТУ), г. Омск.

SPIN-код: 1373-4622

AuthorID (РИНЦ): 670217

ORCID: 0000-0003-2622-7492

AuthorID (SCOPUS): 56503848300

ResearcherID: AAS-1459-2020

Адрес для переписки: evg.rogachev@yandex.ru

КАЛЕНЧУК Анастасия Александровна, ассистент кафедры «Физика» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 1088-8851

AuthorID (РИНЦ): 1174971

ORCID: 0000-0002-6221-2135

ResearcherID: AEL4759-2022

Адрес для переписки: sia.k98@mail.ru

Для цитирования

Рогачев Е. А., Каленчук А. А. Разработка электропроводного полимерного композита на основе линейного полиэтилена низкой плотности, модифицированного высокоструктурным техническим углеродом // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2024. Т. 8, № 3. С. 128–134. DOI: 10.25206/2588-0373-2024-8-3-128-134.

Статья поступила в редакцию 26.06.2024 г.

© Е. А. Рогачев, А. А. Каленчук

DEVELOPMENT OF AN ELECTRICALLY CONDUCTIVE POLYMER COMPOSITE BASED ON LINEAR LOW-DENSITY POLYETHYLENE MODIFIED WITH HIGH-STRUCTURAL CARBON BLACK

E. A. Rogachev, A. A. Kalenchuk

Omsk State Technical University,
Russia, Omsk, Mira Ave., 11, 644050

The developed polymer composites based on low-density linear polyethylene modified with OMCARB CH85 technical carbon have been experimentally investigated. A comprehensive analysis of the composites' properties has demonstrated that the use of this filler type results in a percolation transition at a 25 % mass fraction of filler, leading to an decrease in resistivity. Samples with lower concentrations exhibit electrical resistance values corresponding to those of semiconductors. When the filler concentration reaches 20 %, the maximum material stiffness is observed, and the character of stretching transitions from ductile to brittle. Electron microscopic examination of the samples reveals a mesh microstructure of the polymer matrix with embedded carbon black particles acting as crystallization nuclei. As a result, the mechanical properties and electrical conductivity of the composite are enhanced.

Keywords: electrically conductive carbon black, linear low-density polyethylene, polymer composites, polymers composites structure, the mechanical properties of polymer composites, the manufacture of polymer composites, electron microscopy of polymers.

References

1. Huang X., Sun B., Yu C. [et al.]. Highly conductive polymer nanocomposites for emerging high voltage power cable shields: experiment, simulation and applications // *High Voltage*. 2020. Vol. 5. P. 387–396. DOI: 10.1049/hve.2020.0101. (In Engl.).
2. Chen X., Zheng Y., Han X. [et al.]. Low-dimensional Thermoelectric Materials. // *Flexible Thermoelectric Polymers and Systems*. 2022. P. 210. DOI: 10.1002/9781119550723.ch7. (In Engl.).
3. Hoefler M., Bandaru P. R. Determination and enhancement of the capacitance contributions in carbon nanotube based electrode systems // *Applied Physics Letters*. Vol. 95 (18). DOI: 10.1063/1.3258353. (In Engl.).
4. Golovakhin V., Litvinova V. I., Manakhov A. [et al.]. Conductive polymer-multi-walled carbon nanotube composites for gas sensors and supercapacitors // *Materials Today Communications*. 2024. Vol. 39. 109163. DOI: 10.1016/j.mtcomm.2024.109163. (In Engl.).
5. Ragushina M. D., Evseyeva K. A., Kalugina E. V., Ushakova O. B. Polimernyye kompozitsionnyye materialy s antistaticheskimi i elektroprovodyashchimi svoystvami [Polymer composite materials with electrically conductive and antistatic properties] // *Plasticheskiye massy. Plasticheskie Massy*. 2021. No. 3–4. DOI: 10.35164/0554-2901-2021-3-4-6-9. EDN: QFMBRB. (In Russ.).
6. Tsobkallo E. S., Moskalyuk O. A., Stepashkina A. S. Funktsional'nyye kompozitsionnyye polimernyye materialy elektrotekhnicheskogo naznacheniya [Functional composite polymer materials for electrical purposes] // *Izvestiya Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo instituta (tekhnicheskogo universiteta). Bulletin of the Saint Petersburg State Institute of Technology (Technical University)*. 2020. No. 52. P. 28–35. DOI: 10.36807/1998-9849-2020-52-78-28-35. EDN: ZRBXWB. (In Russ.).
7. Naumova L. N., Vataman V. Yu., Sushchenko N. A. [et al.]. Razrabotka komponentnogo sostava poroshkovoy kraski s antistaticheskimi svoystvami na osnove poliefirnoy smoly [Development of the component composition of powder paint with antistatic properties based on polyester resin] // *Vestnik Syktyvkarskogo universiteta. Seriya 2. Biologiya. Geologiya. Khimiya. Ekologiya. Syktyvkar University Bulletin. Series 2. Biology, Geology, Chemistry, Ecology*. 2023. No. 2 (26). P. 54–69. DOI: 10.34130/2306-6229-2023-2-54. EDN: EDLTQL. (In Russ.).
8. Myakin S. V., Chekuryayev A. G., Golubeva A. I. [et al.]. Elektricheskiye svoystva polimernykh kompozitov na osnove titanata bariya, modifitsirovannogo grafenom [Electrical properties of polymer composites based on barium titanate modified by graphene] // *Izvestiya Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo instituta (tekhnicheskogo universiteta). Bulletin of the Saint Petersburg State Institute of Technology (Technical University)*. 2019. No. 49 (75). P. 65–68. EDN: ILTQBG. (In Russ.).
9. Badrul F., Abdul H., Mohd S. [et. al.]. Preliminary investigation on the correlation between mechanical properties and conductivity of low-density polyethylene/carbon black (LDPE/CB) conductive polymer composite (CPC) // *Journal of Physics Conference Series*. 2022. Vol. 2169 (1). 012020. DOI: 10.1088/1742-6596/2169/1/012020. (In Engl.).
10. Azizi S., David E., Fréchet M. F. [et al.]. Electrical and thermal phenomena in low-density polyethylene/carbon black composites near the percolation threshold // *Journal of Applied Polymer Science*. 2019. Vol. 136. DOI: 10.1002/app.47043. (In Engl.).
11. Ou X., Ye G., Jiang J. [et al.]. Improving electrical and mechanical properties of cement composites by combined addition of carbon black and carbon nanotubes and steel fibers // *Construction and Building Materials*. 2024. Vol. 438. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.136931. (In Engl.).
12. Moiseyevskaya G. V., Razd'yakonova G. I., Petin A. A. [et. al.]. Innovatsionnyye napravleniya rasshireniya assortimenta tekhnicheskogo ugleroda v Rossii [Innovative trends in expanding carbon black types in Russia] // *Khimiya v interesakh ustoychivogo razvitiya. Chemistry for Sustainable Development*. 2017. Vol. 25, no. 1. P. 49–56. DOI: 10.15372/KhUR20170107. EDN: XWRWIH. (In Russ.).

13. Shadrinov N. V., Antoyev K. P. Elektroprovodyashchaya rezina s efektom polozhitel'nogo temperaturnogo koeffitsiyenta soprotivleniya iz shinnogo regenerata [Conductive rubber with the effect of positive temperature resistance from the tire regenerate] // Perspektivnyye materialy. *Perspektivnyye Materialy*. 2021. No. 3. P. 21 – 29. DOI: 10.30791/1028-978X-2021-3-21-29. EDN: XBTTUT. (In Russ.).

14. Moiseyevskaya G. V., Razd'yakonova G. I., Karavayev M. Yu. [et al.] Issledovaniye elektroprovodnogo tekhnicheskogo ugleroda serii «OMCARB». Chast' 1. Fiziko-khimicheskiye svoystva. Otsenka kachestva dispergirovaniya v natural'nom kauchuke [The study of conductive carbon black series «OMCARB». Part 1. Physico-chemical properties. Evaluation of the quality of dispersion in natural rubber] // *Kauchuk i rezina. Kauchuk i Rezina*. 2014. No. 1. P. 40–42. (In Russ.).

15. Ukhartseva I. Yu., Tsvetkova E. A., Gol'dade V. A. Polimernyye upakovochnyye materialy dlya pishchevoy promyshlennosti: klassifikatsiya, funktsii i trebovaniya (obzor) [Polymer packaging materials for foodstuffs: classification, functions and requirements] // *Plasticheskiye massy. Plasticheskie Massy*. 2019. No. 9–10. P. 56–64. DOI: 10.35164/0554-2901-2019-9-10-56-64. EDN: VWKDVH. (In Russ.).

16. Brito S. da C., Pereira V. A. C., Prado A. C. F. [et al.] Antimicrobial potential of linear low-density polyethylene food packaging with Ag nanoparticles in different carriers (Silica and Hydroxyapatite) // *Journal of Microbiological Methods*. 2024. Vol. 217–218. DOI: 10.1016/j.mimet.2023.106873. (In Engl.).

17. Pang H., Xu L., Yan D.-X. [et al.] Conductive polymer composites with segregated structures // *Progress in Polymer Science*. 2014. Vol. 39 (11). P. 1908–1933. DOI: 10.1016/j.progpolymsci.2014.07.007. (In Engl.).

18. Mashkov Yu. K. [et al.] Kompozitsionnyye materialy na osnove politetraforetilena. Strukturnaya modifikatsiya [Composite materials based on polytetrafluoroethylene. Structural

modification]. Moscow, 2005. 240 p. ISBN 5-217-03288-X. (In Russ.).

ROGACHEV Evgeniy Anatolyevich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Physics Department, Omsk State Technical University (OmSTU), Omsk.

SPIN-code: 1373-4622

AuthorID (RSCI): 670217

ORCID: 0000-0003-2622-7492

AuthorID (SCOPUS): 56503848300

ResearcherID: AAS-1459-2020

Correspondence address: evg.rogachev@yandex.ru

KALENCHUK Anastasiya Aleksandrovna, Assistant of Physics Department, OmSTU, Omsk.

SPIN-code: 1088-8851

AuthorID (RSCI): 1174971

ORCID: 0000-0002-6221-2135

ResearcherID: AEL4759-2022

Correspondence address: sia.k98@mail.ru

For citations

Rogachev E. A., Kalenchuk A. A. Development of an electrically conductive polymer composite based on linear low-density polyethylene modified with high-structural carbon black // *Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering*. 2024. Vol. 8, no. 3. P. 128–134. DOI: 10.25206/2588-0373-2024-8-3-128-134.

Received June 26, 2024.

© E. A. Rogachev, A. A. Kalenchuk