

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ / MATERIALS SCIENCE AND CHEMICAL TECHNOLOGIES

УДК 678:537.31:620.172

EDN: YJJNMM

<https://doi.org/10.31242/2618-9712-2026-31-3-505-514>



Оригинальная статья

Свойства и структура композитов на основе полиэтилена, модифицированного техническим углеродом, с высокодисперсными компонентами

Екатерина Андреевна Дроздова, Евгений Анатольевич Рогачев,
Олег Витальевич Крпотин✉

Омский государственный технический университет, пр. Мира, 11, г. Омск, 644050, Российская Федерация
✉ kropotin@mail.ru

Аннотация

Востребованность электропроводящих полимерных композиционных материалов в современной промышленности (машиностроение, энергетика, приборостроение, авиастроение) обусловлена их уникальными физико-химическими свойствами и возможностью гибкой настройки функциональных характеристик. Необходимые для конкретного изделия уровни электропроводности и механических свойств достигаются путем варьирования видов полимера и наполнителя, а также параметров технологического процесса изготовления материалов и дисперсности компонентов. Один из наиболее востребованных наполнителей при разработке таких композитов – технический углерод. Появление на рынке сверхэлектропроводных марок технического углерода открывает новые возможности для регулирования эксплуатационных характеристик электропроводящих композитов при сравнительно небольшом содержании наполнителя. В работе исследовано влияние сверхэлектропроводного технического углерода на структуру и свойства электропроводящих композитов на основе полиэтилена высокой плотности при использовании высокодисперсных компонентов. Механические испытания образцов проводили на разрывной машине, их электрическое сопротивление измеряли с помощью милли-тераомметра. Морфологию поверхности холодного скола образцов исследовали на растровом электронном микроскопе, рентгеноструктурный анализ проводили с использованием рентгеновского дифрактометра. Установлено, что использование высокодисперсных компонентов приводит к уменьшению в 2,7 раза удельного сопротивления композита вблизи порога перколяции и к увеличению в 1,1–3 раза удельного сопротивления в высоконаполненных композитах относительно композитов, в которых использованы низкодисперсные компоненты. Использование высокодисперсных компонентов обеспечивает существенное (в 4–50 раз) увеличение относительного удлинения при разрыве, что обусловлено формированием более стабильной ячеистой структуры матрицы и повышением равномерности распределения наполнителя. Показано, что применение высокодисперсных форм компонентов исследованных композитов эффективно для создания электропроводящих материалов при повышенных требованиях к их прочностным характеристикам. Разработанные материалы могут использоваться для антистатической защиты, в самовосстанавливающихся предохранителях, саморегулирующихся нагревателях и других устройствах и системах.

Ключевые слова: электропроводящие полимерные композиты, полиэтилен высокой плотности, сверхэлектропроводный технический углерод, высокодисперсный наполнитель, высокодисперсный полимер

Финансирование. Исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования России Омскому государственному техническому университету (проект № FSGF-2024-0003, тема «Функциональные полимерные композиционные материалы с углеродными наполнителями»).

Благодарности. Авторы выражают благодарность компаниям ООО «Омсктехуглерод» и ПАО «СИБУР» за предоставление образцов для проведения исследований.

Для цитирования: Дроздова Е.А., Рогачев Е.А., Кропотин О.В. Свойства и структура композитов на основе полиэтилена, модифицированного техническим углеродом, с высокодисперсными компонентами. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2026;31(3):505–514. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2026-31-3-505-514> EDN: YJNNMM

Original article

Properties and structure of composites based on polyethylene modified with carbon black with highly dispersed components

Ekaterina A. Drozdova, Evgenii A. Rogachev, Oleg V. Kropotin✉

Omsk State Technical University, Mira Ave., 11, Omsk, Russian Federation, 644050
✉kropotin@mail.ru

Abstract

The growing demand for conductive polymer composite materials in modern industries – such as mechanical engineering, energy, instrument making, and aircraft manufacturing – stems from their unique physical and chemical properties and the ability to flexibly adjust their functional characteristics. The required levels of electrical conductivity and mechanical properties for a specific product are achieved by varying the polymer and filler types, processing parameters, and component dispersion. Carbon black remains one of the most widely used fillers in the development of such composites. The recent availability of superconducting carbon black grades offers new opportunities for regulating the performance of conductive composites at a relatively low filler content. This study investigates the effect of superconductive carbon black on the structure and properties of conductive composites based on high-density polyethylene containing highly dispersed components. Mechanical testing was conducted using a tensile testing machine, while electrical resistance was measured with a milliohmmeter. The morphology of cold-cleavage surfaces was examined via scanning electron microscope, and X-ray diffraction analysis was performed using an X-ray diffractometer. The results reveal that the use of highly dispersed components reduces resistivity near the percolation threshold by a factor of 2.7, whereas in highly filled systems, resistivity increases by a factor of 1.1 to 3 compared to composites with low-dispersed components. More notably, the application of highly dispersed components provides a significant (4–50 fold) increase in relative elongation at break. This improvement is attributed to the formation of a more stable cellular matrix structure and an increase in the uniformity of the filler distribution. These findings indicate that highly dispersed components are effective for producing electrically conductive materials with increased strength requirements. The developed materials can be used for antistatic protection, self-resetting fuses, self-regulating heaters, and other related devices and systems.

Keywords: conductive polymer composites, high-density polyethylene, superconductive carbon black, highly dispersed filler, highly dispersed polymer

Funding. This research was conducted under the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation to Omsk State Technical University (Project No. FSGF-2024-0003, “Functional polymer composite materials with carbon fillers”).

Acknowledgements. The authors express their gratitude to Omsktekhuglerod LLC and SIBUR PJSC for providing the samples used in this research.

For citation: Drozdova E.A., Rogachev E.A., Kropotin O.V. Properties and structure of composites based on polyethylene modified with carbon black with highly dispersed components. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2026;31(3):505–514. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2026-31-3-505-514> EDN: YJNNMM

Введение

Электропроводящие полимерные композиционные материалы (ЭПКМ) применяются в различных отраслях промышленности благодаря уникальному сочетанию физических и химических свойств, высокой надежности, доступности компонентов и возможности гибкой настройки функциональных характеристик. Данные материа-

лы востребованы при изготовлении сенсоров, саморегулирующихся нагревателей, самовосстанавливающихся предохранителей, элементов электростатической защиты и других устройств и изделий, эксплуатирующихся в том числе в условиях Севера и Арктики [1–6]. Широкий спектр областей применения ЭПКМ обеспечивается возможностью формирования необ-

ходимого для конкретного изделия уровня электропроводности путем варьирования видов полимера и наполнителя, а также параметров технологического процесса изготовления материалов [7–9]. В то же время при разработке и выборе ЭПКМ для определенного устройства значимыми являются не только электрофизические, но также механические свойства материалов [10]. Поэтому задача разработки ЭПКМ и их выбора для конкретного практического применения носит комплексный характер.

Одним из наиболее распространенных электропроводных наполнителей для ЭПКМ является технический углерод (ТУ). Он отличается доступностью, относительно невысокой стоимостью, возможностью широко варьировать его физико-химические характеристики в процессе получения материала и при последующем модифицировании [11]. Применение ТУ в ЭПКМ позволяет эффективно управлять электрофизическими и механическими свойствами композитов. Переход полимерных композитов из класса диэлектриков в класс проводников носит перколяционный характер и часто происходит при высокой концентрации наполнителя 15 мас.% и более [12–14], что негативно сказывается на перерабатываемости и прочностных характеристиках изготавливаемых материалов. Снизить степень наполнения ЭПКМ позволяет использование в качестве наполнителя высокоструктурных марок ТУ [15], к которым относятся сверхэлектропроводные марки [7], при условии обеспечения необходимой для этого степени диспергирования наполнителя в композите.

Одним из способов повышения диспергируемости наполнителя в полимерной матрице и, как следствие, управления электрофизическими свойствами ЭПКМ является изменение дисперсности исходных компонентов в процессе создания композитов. Несмотря на большое количество публикаций, посвященных разработке и исследованию электропроводных композитов, указанный способ управления их свойствами исследован недостаточно. В работе [7] показано, что измельчение ТУ в процессе механоактивации приводит к уменьшению удельного сопротивления ЭПКМ. Комплексное влияние размеров частиц и показателей структурности различных марок ТУ на электрофизические свойства ЭПКМ исследовано в работах [8, 9], однако закономерности влияния дисперсности отдельных марок ТУ как независимого фактора не исследованы. Следует отметить,

что влияние дисперсности полимера на электрофизические свойства ЭПКМ практически не изучено, а данные о результатах подобных исследований в открытых источниках отсутствуют. Можно предположить, что кратное уменьшение размеров частиц исходных компонентов увеличит площадь поверхности межфазного взаимодействия и повысит степень диспергирования наполнителя в композиционной смеси. Это должно способствовать снижению удельного сопротивления и увеличению значений прочностных характеристик ЭПКМ по сравнению с композитами, изготовленными из низкодисперсных компонентов. Вышеизложенное определяет актуальность исследований влияния дисперсности компонентов ЭПКМ на их структуру и функциональные свойства.

В качестве высокодисперсной формы ТУ может быть использована «пылящая» форма поставки или измельченный гранулированный ТУ (стандартная форма поставки ТУ – гранулированная форма). В качестве высокодисперсной формы полимера возможно использование ПЭВП в виде порошка, получаемого на выходе из реактора полимеризации до подачи в секцию окончательной обработки – гранулирования на экструдере.

Ранее нами было исследовано влияние сверхэлектропроводного технического углерода СН1000 на структуру и свойства композиционных материалов на основе полиэтилена высокой плотности HD 03490 PE (ПЭВП), изготовленных с использованием низкодисперсных форм исходных компонентов [16]. Целью настоящего исследования является установление закономерностей влияния сверхэлектропроводного ТУ С1000 на структуру и функциональные свойства ПКМ на основе ПЭВП HD 03490 PE при использовании высокодисперсных компонентов. Это позволит в совокупности с ранее полученными результатами осуществлять рациональный выбор дисперсности исходных компонентов при разработке и отборе ЭПКМ для конкретных практических применений.

Материалы и методы исследования

В работе исследовались ЭПКМ на основе ПЭВП марки HD 03490 PE, произведенного ПАО «СИБУР», и сверхэлектропроводного ТУ марки OMCARB СН1000 производства ООО «Омск Карбон Групп». Показатель текучести расплава (ПТР) для HD 03490 PE равен 0,30 г/10 мин (190 °C / 5,0 кг). Удельное электрическое

сопротивление СН1000 в 3,6–4 раза меньше, чем для базовых марок электропроводного ТУ СН85 и С140 соответственно [17]. Стандартная форма поставки ТУ – гранулированный продукт с размером гранул 2–4 мм, в рамках настоящего исследования предварительно высушенный ТУ измельчали в ножевой мельнице DM-6 в течение 2 минут. После измельчения размер частиц ТУ составил 0,1–10 мкм. Компанией ПАО «СИБУР» был предоставлен ПЭВП в виде мелкодисперсного порошка с размером частиц 12–13 мкм. Для проведения исследований были изготовлены двухкомпонентные ЭПКМ с содержанием ТУ 4–16 мас.% с шагом 2 мас.%.

Дегидратацию исходных компонентов проводили в течение 2 ч: ПЭВП – в сушильном шкафу при температуре 80 °С и СН1000 – в муфельной печи при температуре 125 °С. После дегидратации материалов двухкомпонентную композиционную смесь гомогенизировали в ножевой мельнице DM-6 в течение 2 минут. С целью повышения однородности распределения ТУ в полимерной матрице гранулят ЭПКМ получали методом двойного экструдирования на экструдере SCAMEX RHEOSCAM Micro-extruder при температурах нагревательных зон (170 ± 20) °С. Аналогично экструдировали порошок ПЭВП для обеспечения одинаковых условий изготовления всех исследованных материалов. Образцы ПЭВП и ЭПКМ изготавливали в термопрессе Joos LAP 40, используя пресс-формы с размером ячеек 147'147'2 мм, температура прессования 190 °С.

Механические испытания образцов проводили на разрывной машине Zwick/Roell в соответствии с ГОСТ 11262-2017. Морфологию поверхности холодного скола ПЭВП и ЭПКМ исследовали на растровом электронном микроскопе Jeol JCM-5700 (РЭМ) в режиме высокого вакуума. Рентгено-

структурный анализ ПЭВП и ЭПКМ проводили с использованием рентгеновского дифрактометра Shimadzu Maxima XRD-7000. Для определения среднего размера кристаллитов (областей когерентного рассеяния) использовалась формула Шеррера, степень кристалличности рассчитывалась как отношение интегральной интенсивности кристаллических пиков для полиэтилена, соответствующих рефлексам (110) и (200), к суммарной интегральной интенсивности кристаллического пика и аморфного гало в интервале углов $2\theta = (12-25,5)^\circ$ [18, 19]. Удельное объемное электрическое сопротивление ЭПКМ измеряли с помощью милли-тераомметра Milli TO-3.

Результаты и их обсуждение

Значения удельного сопротивления ЭПКМ системы ПЭВП + ТУ представлены в табл. 1. При содержании ТУ $\varphi < 6$ мас.% ток через образец не регистрируется, материалы относятся к классу диэлектриков. При содержании $\varphi = 6$ мас.% ЭПКМ можно охарактеризовать как полупроводник.

Порог перколяции для исследуемых ЭПКМ составляет ~8 мас.%. Сравнение приведенных в табл. 1 данных с результатами, полученными нами ранее [16] для исследуемой системы с низкодисперсными формами компонентов, показало следующее: использование высокодисперсных форм компонентов приводит по сравнению с ЭПКМ, в которых использованы низкодисперсные формы, к появлению электропроводности в ЭПКМ уже при 6 мас.%, а также к снижению значения удельного сопротивления в 2,7 раза для композита, содержащего 8 мас.% ТУ. Однако, при последующем увеличении концентрации СН1000 в системе с высокодисперсными компонентами происходит повышение удельного сопротивления в интервале концентраций ТУ 10–12 мас.% в 2,3–3 раза, а в интервале концентраций 14–16 мас.% – в 1,1–1,2 раза. Таким образом, с целью снижения удельного сопротивления ЭПКМ в исследованной системе использование высокодисперсных форм компонентов оправдано при содержании ТУ 6–8 мас.%, но неэффективно при содержании ТУ 10–16 мас.%.

Композиты с содержанием 6 и 8 мас.% ТУ можно классифицировать как антистатические материалы, а композиты, содержащие 10–16 мас.% ТУ, – как проводники, которые используются в самовосстанавливающихся предохранителях, саморегулирующихся нагревателях и других устройствах и системах [3]. Анализ данных, полученных

Таблица 1
Удельное сопротивление композитов

Table 1
Specific resistance of composites

Содержание ТУ φ , мас.%	Удельное сопротивление ρ , Ом×м
6	$(1,01 \pm 0,08) \times 10^9$
8	18000 ± 350
10	$240,0 \pm 0,8$
12	$11,7 \pm 0,4$
14	$1,40 \pm 0,012$
16	$0,40 \pm 0,002$

нами и представленных в работах других авторов, свидетельствует о том, что повышение дисперсности компонентов не является универсальным способом снижения удельного сопротивления ЭПКМ. Эффективность его применения зависит от используемой технологии изготовления композитов, марок ПЭВП и ТУ и может проявляться в небольших интервалах концентраций наполнителя.

Незначительное увеличение удельного сопротивления исследуемой системы ЭПКМ с различной дисперсностью компонентов при содержании ТУ 14–16 мас.% и существенное снижение удельного сопротивления при содержании ТУ 6–8 мас.% (см. табл. 1) обуславливают целесообразность исследования влияния повышения дисперсности компонентов на механические характеристики композитов, поскольку, как отмечалось выше, данные характеристики также определяют эффективность использования ЭПКМ в конкретных устройствах и системах.

Зависимости механических характеристик исследованных ЭПКМ от содержания наполнителя ϕ во всем исследованном концентрационном диапазоне приведены на рис. 1. Численные значения механических характеристик для ПЭВП и ЭПКМ, содержащих 8, 10, 12 мас.% ТУ, ранее были представлены в работе [20]. На рис. 1, *в* дополнительно представлены характерные диаграммы растяжения образцов. Как следует из представленных данных, характер изменений модуля упругости E (см. рис. 1, *а*) и прочности при разрыве σ_{pp} (см. рис. 1, *б*) исследованных композитов качественно совпадает с аналогичными характеристиками ЭПКМ, полученных с применением низкодисперсных форм компонентов, а соответствующие значения этих характеристик незначительно различаются и в большинстве случаев равны в пределах погрешности [16]. Основным фактором, обеспечивающим повышение модуля упругости полимерных композитов, как известно, является их армирование высокомолекулярным наполнителем, что и проявляется в исследованных ЭПКМ.

Зависимость относительного удлинения при разрыве ϵ_{pp} ЭПКМ от содержания ТУ (см. рис. 1, *в*) существенно отличается от аналогичной зависимости для материалов этой же системы, полученных с применением низкодисперсных форм компонентов [16]. В интервале концентраций наполнителя 4–16 мас.% наблюдается положитель-

ный экстремум, соответствующий примерно 10 мас.% ТУ, что, возможно, связано с трансформацией структуры ЭПКМ при увеличении содержания наполнителя. Значения относительного удлинения при разрыве исследованных ЭПКМ (см. рис. 1, *в*) при содержании ТУ 4–16 мас.% в 4–50 раз больше, чем для композитов этой же системы, полученных с применением низкодисперсных форм компонентов [16], в том числе при содержании наполнителя 8, 14 и 16 мас.% значения относительного удлинения (см. табл. 1) больше аналогичных в 20, 19 и 15 раз соответственно. Таким образом, в композитах HD 03490 PE + CH1000 с высокодисперсными компонентами по сравнению с композитами, изготовленными из низкодисперсных компонентов, существенное увеличение электропроводности при содержании ТУ 8 мас.% и незначительное уменьшение электропроводности при содержании ТУ 14–16 мас.% сопровождается кратным увеличением относительного удлинения при разрыве. Выявленная закономерность может быть критически важной при выборе ЭПКМ для конкретных практических применений.

Диаграмма растяжения для ненаполненного ПЭВП (см. рис. 1, *в*) характерна для пластичных полимеров. После участка, соответствующего пределу текучести, образуется шейка и протекает вынужденно-эластическая деформация материала. Затем происходит деформационное упрочнение образца, сопровождающееся ростом напряжения (стандартного усилия), вплоть до разрушения. Вид диаграмм для наполненного ПЭВП также характерен для пластических полимеров, однако, в отличие от диаграммы для ненаполненного ПЭВП, в композитах ПЭВП + ТУ деформационное упрочнение образца не происходит. Можно сделать вывод о том, что после области деформаций, соответствующей пределу текучести, преобладает вынужденно-эластическая деформация вплоть до разрушения образца. Предел текучести для ПЭВП и композитов, содержащих 4–14 мас.% ТУ, соответствует области деформаций 10–15 %. Для композита ПЭВП + 16 мас.% ТУ предел текучести соответствует диапазону деформаций 8–9 %, деформация образца становится необратимой при его меньшем удлинении. Характер диаграмм растяжения в высоконаполненных ЭПКМ (см. рис. 1, *в*) существенно отличается от характера диаграмм для композитов,

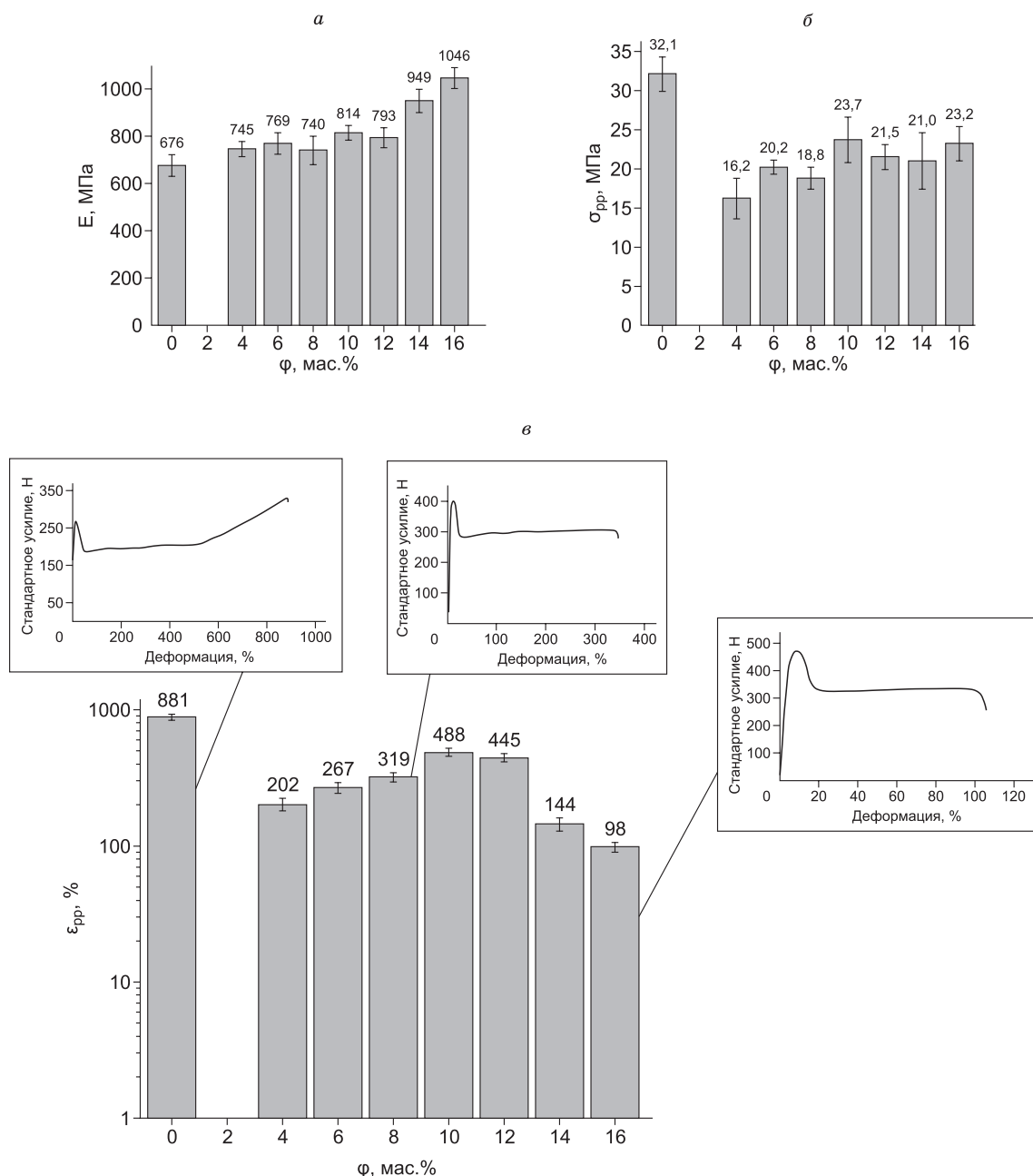


Рис. 1. Результаты исследования механических свойств композитов: модуль упругости (а), прочность при разрыве (б), относительное удлинение при разрыве (в) ненаполненного ПЭВП и композитов при различном содержании ТУ

Fig. 1. Results of the study of the mechanical properties of composites: modulus of elasticity (а), tensile strength (б), relative elongation at break (в) of unfilled HDPE and composites with different CB content

изготовленных из низкодисперсных компонентов, в которых квазихрупкое разрушение образцов происходит без образования шейки [16].

Результаты рентгеноструктурного анализа ЭПКМ представлены в табл. 2. При увеличении содержания наполнителя степень кристалличности матрицы остается примерно одинаковой, в то время как средний размер кристаллитов

увеличивается при введении в матрицу 4 мас.% ТУ, а затем постепенно уменьшается. Можно предположить, что частицы ТУ выполняют роль искусственных зародышей структурообразования и их присутствие в матрице как наполнителя с высокой теплопроводностью изменяет температурное поле в композите в процессе спекания. Эти процессы преобладают при малом содержа-

нии ТУ в ЭПКМ. При повышении содержания ТУ в композите происходит трансформация надмолекулярной структуры матрицы под влиянием агломерации частиц наполнителя и разрыхления матрицы. Это приводит к измельчению надмолекулярной структуры матрицы: размеры кристаллитов уменьшаются, а постоянство значений степени кристалличности свидетельствует о том, что кристаллическая фаза формируется из большего количества кристаллитов.

Результаты электронной микроскопии исследованных образцов представлены на рис. 2. Как следует из результатов анализа РЭМ-изображений, композит ПЭВП + 4 мас.% ТУ характеризуется однородной ячеистой структурой, аналогичной структуре ненаполненного ПЭВП. Агломераты и отдельные частицы ТУ преимущественно изолированы друг от друга границами ячеек. При дальнейшем увеличении содержания ТУ происходит постепенное разрушение границ ячеек в исходной ячеистой структуре ПЭВП. Наряду с участками матрицы, сохраняющими ячеистую структуру, формируются неструктурированные визуально разрыхленные области.

В неструктурированных областях матрицы и на участках с деградирующей ячеистой структурой наполнитель образует цепочки из частиц ТУ, контактирующих между собой. Наиболее интенсивно эти процессы протекают при содержании наполнителя 12 мас.% и более. В то же время эти процессы протекают менее интенсивно, чем в композитах рассматриваемой системы, изготовленных из низкодисперсных компонентов [16]. В системе ЭПКМ, изготовленных из высокодисперсных компонентов, ячеистая структура матрицы стабильнее, наполнитель распределяется более равномерно. Если вблизи порога перколяции (8 мас.% ТУ) эти эффекты способствуют формированию слабопроводящей сети из частиц наполнителя, то при увеличении содержания наполнителя они препятствуют увеличению электропроводящих цепочек, что повышает значения удельного сопротивления по сравнению с ЭПКМ, изготовленными из низкодисперсных компонентов. В то же время стабильность структуры ЭПКМ, более равномерное распределение ТУ и, соответственно, более эффективное армирование композитов частицами наполнителя способствуют повышению прочностных характеристик, что проявляется в существенном увеличении значений относительного удлинения при разрыве и в характере диаграмм растяжения для высоконаполненных ЭПКМ.

Таблица 2

Результаты рентгеноструктурного анализа композитов

Table 2

Results of X-ray structural analysis of the composites

Содержание ТУ ф, мас.%	Степень кристалличности, %	Средний размер кристаллитов, нм
0	67	18,7
4	67	20,7
6	67	19,6
8	68	19,6
10	67	19,7
12	66	19,7
14	66	19,2
16	66	19,2

Заключение

Проведенные исследования показали, что использование высокодисперсных компонентов в ЭПКМ на основе ПЭВП, модифицированного сверхэлектропроводным ТУ, обеспечивает возникновение электропроводности уже при содержании СН1000 6 мас.%, уменьшение в 2,7 раза удельного сопротивления при содержании ТУ 8 мас.% и увеличение в 1,1–3 раза удельного сопротивления при содержании ТУ 10–16 мас.% относительно использования низкодисперсных компонентов. При незначительном (в 1,1–1,2 раза) повышении удельного сопротивления высоконаполненных ЭПКМ (14–16 мас.% ТУ) использование высокодисперсных компонентов обеспечивает существенное (в 15–19 раз) увеличение значений относительного удлинения при разрыве, что обусловлено формированием более стабильной надмолекулярной ячеистой структуры и повышением равномерности распределения наполнителя. Относительное удлинение при разрыве композита, содержащего 8 мас.% ТУ, увеличивается в 20 раз. Применение высокодисперсных форм ПЭВП и сверхэлектропроводного ТУ эффективно для создания ЭПКМ при повышенных требованиях к их прочностным характеристикам.

Список литературы / References

1. Kanoun O., Bouhamed A., Ramalingame R., et al. Review on Conductive Polymer/CNTs Nanocomposites based flexible and stretchable strain and pressure sensors. *Sensors*. 2021;21(2):341–370. <https://doi.org/10.3390/s21020341>. – EDN: SJRGPY
2. Liu Y., Zhang H., Porwal H., et al. Pyroresistivity in conductive polymer composites: a perspective on recent advances and new applications. *Polymer International*. 2019;68(3):299–305. <https://doi.org/10.1002/pi.5735>

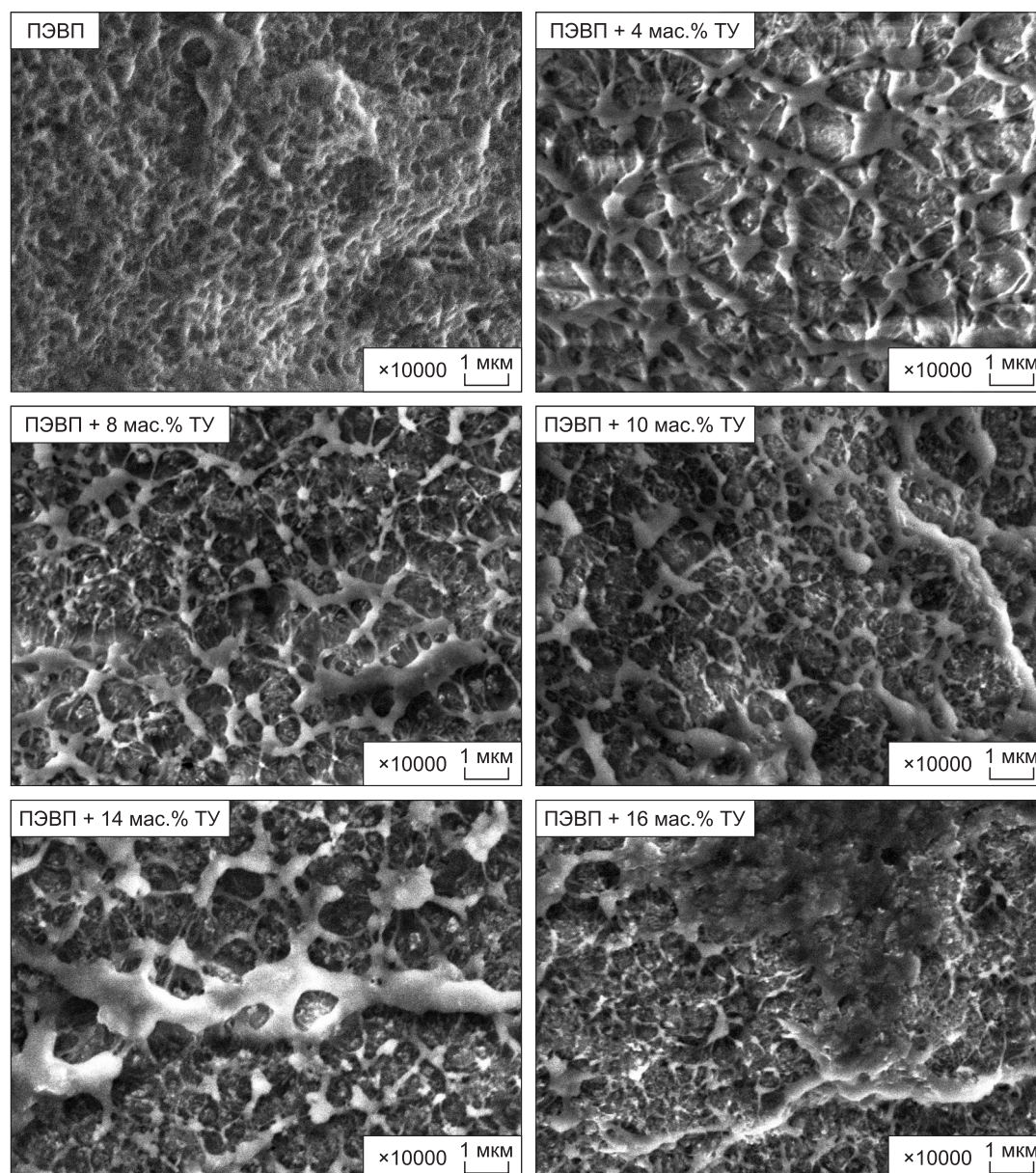


Рис. 2. РЭМ-изображения холодных сколов композитов

Fig. 2. SEM images of cold chips of the composites

3. Pang H., Xu L., Yan D.-X., Li Z.-M. Conductive polymer composites with segregated structures. *Progress in Polymer Science*. 2014;39(11):1908–1933. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2014.07.007>. – EDN: UUCMEB

4. Chen L., Zhang J. Designs of conductive polymer composites with exceptional reproducibility of positive temperature coefficient effect: A review. *Journal of Applied Polymer Science*. 2021;138(3):49677. <https://doi.org/10.1002/app.49677>. – EDN: UCLXRY

5. Setnescu R., Lungulescu E.-M., Marinescu V.E. Polymer composites with self-regulating temperature behavior: Properties and characterization. *Materials*. 2023;16(1):157. <https://doi.org/10.3390/ma16010157>. – EDN: YIYFPG

6. Петухова Е.С., Федоров А.Л., Аргунова А.Г. Исследование климатической стойкости полиэтиленовых элект-

тропроводящих материалов для топливных канистр в условиях севера и Арктики. *Материаловедение*. 2023;(2):12–17. <https://doi.org/10.31044/1684-579X-2023-0-2-12-17>. – EDN: VZRIAH

Petukhova E.S., Fedorov A.L., Argunova A.G. Study of climatic stability of polyethylene based electrically conductive materials for fuel canisters in conditions of the north and Arctic. *Inorganic Materials: Applied Research*. 2023;14(4):1109–1113. <https://doi.org/10.1134/s2075113323040263>. – EDN: COBHCI

7. Аллахвердиева Х.В., Кахраманов Н.Т., Гасанова А.А., Косева Н.С. Роль механоактивации наночастиц теухглерода в формировании сегрегированной структуры и свойств полимерных электропроводящих нанокомпозитов. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2025;68(6):126–133. <https://doi.org/10.6060/ivkkt.20256806.7190>. – EDN: YXSOZK

Allahverdiyeva Kh.V., Kakhramanov N.T., Hasanova A.A., Koseva N.S. The role of mechanoactivation of carbon black nano-particles in the formation of segregated structure and properties of polymeric conductive nanocomposites. *Chem-ChemTech*. 2025;68(6):126–133. (In Russ.) <https://doi.org/10.6060/ivkkt.20256806.7190>. – EDN: YXSOZK

8. Liang J.-Z., Yang Q.-Q. Effects of carbon black content and size on conductive properties of filled high-density polyethylene composites. *Advances in Polymer Technology*. 2018;37(6):2238–2245. <https://doi.org/10.1002/adv.21882>. – EDN: OTLHKX

9. Luo S.J., Wong C.P. Study on effect of carbon black on behavior of conductive polymer composites with positive temperature coefficient. *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*. 2000;23(1):151–156. <https://doi.org/10.1109/6144.833054>.

10. Kropotin O.V., Rogachev E.A., Kalenchuk A.A. Influence of carbon black on the elastic modulus of composite materials based on linear low density polyethylene at various structural levels. *Mechanics of Composite Materials*. 2025;61(1):67–78. <https://doi.org/10.1007/s11029-025-10262-1>. – EDN: RDQDGI

11. Раздьяконова Г.И., Лихолобов В.А., Кохановская О.А. *Технологии модификации технического углерода*. Омск: ОмГТУ; 2017. 160 с. – EDN: YMEHYN

Razdyakonova G. I., Likholobov V. A., Kokhanovskaya O. A. *Technologies for the modification of industrial carbon black*. Omsk: OmSTU; 2017. 160 p. (In Russ.). – EDN: YMEHYN

12. Rogachev E.A., Danshina V.V., Kropotin O.V., et al. Calendar ageing of electrically conductive carbon black: changes in physicochemical properties and possibilities for further use. *Azerbaijan Chemical Journal*. 2025;(3):90–104. <https://doi.org/10.32737/0005-2531-2025-3-90-104>. – EDN: EDN: MIBUCB

13. 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):6–9. <https://doi.org/10.35164/0554-2901-2021-3-4-6-9>. – EDN: QFMBRB

Ragushina M.D., Evseeva K.A., Kalugina E.V., Ushakova O.B. Polymer composite materials with electrically conductive and antistatic properties. *Plasticheskie massy*. 2021;(3-4):6–9. (In Russ.) <https://doi.org/10.35164/0554-2901-2021-3-4-6-9>. – EDN: QFMBRB

14. Марков А.В., Марков В.А., Чижев А.С. Влияние характеристик полиэтилена на термоэлектрические свойства полиэтиленовых композитов с техническим углеродом. *Пластические массы*. 2021;(5-6):18–23. <https://doi.org/10.35164/0554-2901-2021-5-6-18-23>. – EDN: PWWNJX

Markov A.V., Markov V.A., Chizhov A.S. The influence of the characteristics of polyethylene on thermoelectric properties of their composites with black carbon. *Plasticheskie Massy*. 2021;(5-6):18–23. (In Russ.) <https://doi.org/10.35164/0554-2901-2021-5-6-18-23>. – EDN: PWWNJX

15. Аллавердиева Х.В., Кахраманов Н.Т., Дадашева Э.В. Электропроводящие нанокompозиты на основе полиэтилен-

на высокой плотности и различных типов углеродсодержащих наполнителей. *Пластические массы*. 2023;(5-6):53–56. <https://doi.org/10.35164/0554-2901-2023-5-6-53-56>. – EDN: BQZOEC

Allahverdiyeva KH.V., Kakhramanov N.T., Dadasheva E.V. Electrically conductive nanocomposites based on high density polyethylene and different types of carbon-containing fillers. *Plasticheskie massy*. 2023;(5-6):53–56. (In Russ.) <https://doi.org/10.35164/0554-2901-2023-5-6-53-56>. – EDN: BQZOEC

16. Дроздова Е.А., Рогачев Е.А., Кропотин О.В. Влияние сверхэлектропроводного технического углерода на структуру и свойства композиционных материалов на основе полиэтилена высокой плотности. *Вопросы материаловедения*. 2025;4(124):166–175. <https://doi.org/10.22349/1994-6716-2025-124-4-166-175>. – EDN: TFBURD

Drozdova E.A., Rogachev E.A., Kropotin O.V. Influence of superconducting carbon black on the structure and properties of composite materials based on high-density polyethylene. *Voprosy materialovedeniya*. 2025;4(124):166–175. (In Russ.) <https://doi.org/10.22349/1994-6716-2025-124-4-166-175>. – EDN: TFBURD

17. Кропотин О.В., Рогачев Е.А., Дроздова Е.А. и др. Зависимость электрического сопротивления от параметров кристаллической структуры и физико-химических характеристик технического углерода. *Ползуновский вестник*. 2024;(3):228–233. <https://doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2024.03.033>. – EDN: CZOHYD

Kropotin O.V., Rogachev E.A., Drozdova E.A., et al. Dependence of electrical resistance on parameters of the crystal structure and physico-chemical characteristics of carbon black. *Polzunovskiy vestnik*. 2024;(3):228–233. (In Russ.) <https://doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2024.03.033>. – EDN: CZOHYD

18. Мартынов М.А. *Рентгенография полимеров: метод. Пособие для пром. лаб.* Л.: Химия; 1972. 94 с.

Martynov M.A. *X-ray diffraction of polymers: method. Manual for industrial laboratories*. Leningrad: Khimiya; 1972. 94 p. (In Russ.)

19. Перепечко И.И. *Введение в физику полимеров*. М.: Химия; 1978. 312 с.

Perepechko I.I. *Introduction to Polymer Physics*. Moscow: Khimiya Publ.; 1978. 312 p. (In Russ.)

20. Дроздова Е.А., Рогачев Е.А., Кропотин О.В. Влияние дисперсности компонентов на свойства полиэтиленовых композитов для саморегулирующихся нагревателей, модифицированных техническим углеродом. *Композиты и наноструктуры*. 2026;18(2):153–164. <https://doi.org/10.36236/1999-7590-2026-18-2-153-164>. – EDN: FYLVND

Drozdova E.A., Rogachev E.A., Kropotin O.V. Influence of component dispersion on the properties of polyethylene composites for self-regulating heaters modified with carbon black. *Composites and Nanostructures*. 2026;18(2): 153–164. (In Russ.) <https://doi.org/10.36236/1999-7590-2026-18-2-153-164>. – EDN: FYLVND

Об авторах

ДРОЗДОВА Екатерина Андреевна, аспирант кафедры «Физика», Омский государственный технический университет, <https://orcid.org/0000-0001-8099-5148>, SPIN: 5357-2358, e-mail: ea_ntk@mail.ru

РОГАЧЕВ Евгений Анатольевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Физика», Омский государственный технический университет, <https://orcid.org/0000-0003-2622-7492>, SPIN: 1373-4622, e-mail: earogachev@omgtu.ru

КРОПОТИН Олег Витальевич, доктор технических наук, заведующий кафедрой «Физика», Омский государственный технический университет, <https://orcid.org/0000-0002-6620-9945>, SPIN: 4218-4900, e-mail: kropotin@mail.ru

Вклад авторов

Дроздова Е.А. – проведение исследований, проведение статистического анализа, визуализация, создание черновика рукописи; **Рогачев Е.А.** – разработка концепции, методология, проведение исследований; **Кропотин О.В.** – редактирование рукописи, руководство исследованием, администрирование проекта, получение финансирования

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

About the authors

DROZDOVA, Ekaterina Andreevna, Postgraduate Student, Department of Physics, Omsk State Technical University, <https://orcid.org/0000-0001-8099-5148>, SPIN: 5357-2358, e-mail: ea_ntk@mail.ru

ROGACHEV, Evgenii Anatolievich, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Physics, Omsk State Technical University, <https://orcid.org/0000-0003-2622-7492>, SPIN: 1373-4622, e-mail: earogachev@omgtu.ru

KROPOTIN, Oleg Vitalievich, Dr. Sci. (Eng.), Head of the Department of Physics, Omsk State Technical University, <https://orcid.org/0000-0002-6620-9945>, SPIN: 4218-4900, e-mail: kropotin@mail.ru

Authors' contribution

Drozдова Е.А. – investigation, formal analysis, visualization, writing – original draft; **Rogachev Е.А.** – conceptualization, methodology, investigation; **Kropotin О.В.** – writing – review & editing, supervision, project administration, funding acquisition

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию / Submitted 28.03.2026

Поступила после рецензирования / Revised 30.07.2026

Принята к публикации / Accepted 18.08.2026