

Синтез и переработка полимеров и композитов на их основе
Synthesis and processing of polymers and polymeric composites

УДК 691.175.2

<https://doi.org/10.32362/2410-6593-2026-21-2-226-236>

EDN DQUAQT



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Особенности изменения электрического сопротивления смесей кристаллизующихся полимеров с техническим углеродом при нагревании

А.В. Марков¹, А.Е. Зверев^{1,✉}, Е.В. Калугина^{1,2}, В.А. Марков³

¹ МИРЭА – Российский технологический университет (Институт тонких химических технологий им. М.И. Ломоносова), Москва, 119454 Россия

² ООО «Группа ПОЛИПЛАСТИК», Москва, 119530 Россия

³ ООО «БЭЛЛ ИНТЕГРАТОР ИННОВАЦИИ», Москва, 115088 Россия

✉ Автор для переписки, e-mail: azmonst@gmail.com

Аннотация

Цели. Исследовать эффекты положительного и отрицательного температурных коэффициентов (ПТК и ОТК соответственно) саженаполненных электропроводных полимерных композиционных материалов на основе полиэтилена высокой плотности марки 277-73 и полипропилена марки 01050, где в качестве наполнителя использовали технический углерод специальной электропроводной марки Omcarb C-140 (УМ-76).

Методы. Для исследования электрических характеристик композиций были отпрессованы пластины с запрессованными на концах контактными электродами из обезжиренной латунной сетки, моделирующие полимерные нагреватели. Электрическое сопротивление образцов оценивали с помощью омметра DT9208A (РЕСАНТА, Латвия). Испытания при повышенных температурах проводили в термощкафу СНОЛ 3.5 (НПФ ТерМИКС, Россия) со скоростью нагревания ~3°C/мин. Степень кристалличности образцов при нагревании оценивали методом дифференциальной сканирующей калориметрии на приборе DSC 204F1 Phoenix (NETZSCH, Германия) со скоростью нагревания 3°C/мин.

Результаты. Показано, что механизмы ПТК и ОТК в смесевых полимерных композициях носят комплексный характер и не связаны только с тепловым расширением и плавлением полимера. Изменение электрического сопротивления саженаполненных полимерных композиций происходит из-за наличия дефектных кристаллических участков. На ранних стадиях начала плавления полимера токопроводящие каналы разрушаются за счет появления расширяющихся аморфных «микрокапель» его расплава. Для саженаполненной электропроводной смесевой композиции полиэтилена и полипропилена величина и характер изменения пика ПТК зависят от температуры начала плавления наиболее низкоплавкой фазы полиэтилена. При этом гетерогенность смесей кристаллизующихся полимеров с техническим углеродом повышает термическую устойчивость материала за счет расширения зоны ПТК в область плавления более высокоплавкой фазы полипропилена. Для электропроводных композиций двух полимеров с различной температурой плавления и технического углерода показано, что низкоплавкий полимер задает температуру «саморегулирования» и характер ПТК, в то время как высокоплавкий полимер смещает скачок электрической проводимости материала в область повышенных температур.

Выводы. Установлено, что энергии активации смесевых саженаполненных композиций полиэтилена с полипропиленом мало зависят от способов смешения и составляют 44 ± 3 кДж/моль. Полученные величины совпадают со значениями энергии активации процесса вязкого течения расплава. Установлено, что способ совмещения компонентов смесей саженаполненных композиций на основе кристаллизующихся полимеров мало влияет на эффект ПТК. Установлено, что использование саженаполненных полимерных композиций со смесевой матрицей полиэтилена и полипропилена позволяет регулировать интенсивность эффектов ПТК и ОТК.

Ключевые слова

электропроводные полимерные композиционные материалы, положительный и отрицательный температурные коэффициенты, полиэтилен, полипропилен, технический углерод, степень кристалличности, удельное электрическое сопротивление

Поступила: 07.11.2024
Доработана: 27.11.2025
Принята в печать: 12.02.2026

Для цитирования

Марков А.В., Зверев А.Е., Калугина Е.В., Марков В.А. Особенности изменения электрического сопротивления смесей кристаллизующихся полимеров с техническим углеродом при нагревании. *Тонкие химические технологии*. 2026;21(2):226–236. <https://doi.org/10.32362/2410-6593-2026-21-2-226-236>

RESEARCH ARTICLE

Features of changes in the electrical resistance of mixtures of crystallizing polymers with carbon black upon heating

Anatoly V. Markov¹, Alexander E. Zverev^{1,✉}, Elena V. Kalugina^{1,2}, Vasily A. Markov³

¹ MIREA – Russian Technological University (M.V. Lomonosov Institute of Fine Chemical Technologies), Moscow, 119454 Russia

² POLYPLASTIC Group, Moscow, 119530 Russia

³ BELL INNOVATION INTEGRATOR, Moscow, 115088 Russia

✉ Corresponding author, e-mail: azmonst@gmail.com

Abstract

Objectives. The effects of positive and negative temperature coefficients (PTC and NTC, respectively) in carbon black-filled conductive polymer composites based on high-density polyethylene grade 277-73 and polypropylene grade 01050 were investigated. Carbon black electrically conducting grade OMCARB C-140 (UM-76) was used as the filler.

Methods. To study the electrical characteristics of the compositions, plates were pressed with brass contact electrodes at the plate ends to simulate polymer heaters. The electrical resistance of the samples was evaluated using an ohmmeter DT9208A (RESANTA, Latvia). Tests at elevated temperatures were carried out in an SNOL 3.5 heat chamber (NPF TherMIX, Russia) with a heating rate of ~3°C/min. The crystallinity of the samples during heating was assessed by differential scanning calorimetry on a DSC 204F1 Phoenix device (NETZSCH, Germany) with a heating rate of 3°C/min.

Results. The complex PTC and NTC mechanisms in mixed polymer compositions are not solely related to thermal expansion and melting of the polymer. While changes in the electrical resistance of carbon-filled polymer composites are associated with the presence of crystalline regions with defects, the destruction of the conductive channels occurs at the earliest stages of polymer melting due to the formation of expanding amorphous “microdroplets” of the hot melt. For a carbon-filled, electrically conductive mixture of polyethylene and polypropylene, the magnitude and nature of the change in the peak temperature of the PTC depends on the melting onset temperature of the lowest-melting phase of polyethylene. At the same time, the heterogeneity of the mixtures of crystallizing polymers with technical carbon increases the thermal stability of the material by expanding the PTC zone into the melting region of the higher-melting phase of polypropylene. When comparing electrically conductive compositions of polymers with different melting points and carbon black, the low-melting polymer determines the temperature of self-regulation and the nature of PTC, while the high-melting polymer shifts the jump in electrical conductivity to the region of elevated temperatures.

Conclusions. The activation energies of carbon-filled mixtures of polyethylene and polypropylene, which are weakly dependent on the mixing method, are approximately 44 ± 3 kJ/mol. The obtained values are consistent with the activation energy values for the viscous melt flow process. The method of mixing the components in mixtures of carbon-filled compositions based on crystallizing polymers was found to have little effect on PTC. The use of carbon-filled polymer compositions with a mixed matrix of polyethylene and polypropylene allows for the regulation of the intensity of PTC and NTC.

Keywords

conductive polymer composites, positive and negative temperature coefficients, polyethylene, polypropylene, carbon black, degree of crystallinity, specific electrical resistance

Submitted: 07.11.2024
Revised: 27.11.2025
Accepted: 12.02.2026

For citation

Markov A.V., Zverev A.E., Kalugina E.V., Markov V.A. Features of changes in the electrical resistance of mixtures of crystallizing polymers with carbon black upon heating. *Tonk. Khim. Tekhnol. = Fine Chem. Technol.* 2026;21(2):226–236. <https://doi.org/10.32362/2410-6593-2026-21-2-226-236>

ВВЕДЕНИЕ

Эффекты аномально высокого положительного и отрицательного температурных коэффициентов (ПТК и ОТК соответственно) в полимерных композиционных материалах (ПКМ) начали изучать с середины XX века [1–3], однако до сих пор исследователи не пришли к единому мнению о причинах возникновения подобных явлений. В то же время существует множество патентов с применением саженаполненных электропроводных полимерных композиционных материалов (ЭПКМ) с эффектами ПТК и/или ОТК в качестве различных нагревательных и термостабилизирующих устройств, терморегулирующих нагревательных элементов, саморегулирующихся кабелей и др. [4–16]. Обилие патентов и научных публикаций говорит о перспективности промышленного применения подобных материалов и требует проведения новых исследований в области ЭПКМ с целью понимания механизма возникновения эффектов ПТК и ОТК.

Типичным наполнителем для получения ЭПКМ является технический углерод (ТУ). Выбор специальных марок ТУ в качестве электропроводного наполнителя в ЭПКМ связан с особенностью структуры ТУ, в агрегатах которого проводимость достигает 2.4 См/см [17]. При этом электропроводность полимерных композиций ТУ осуществляется за счет образования в объеме матрицы структуры токопроводящих каналов, по которым протекают электрические заряды [18–21]. Ток электронов через сопряженные между собой углеродные частицы и их агрегаты может осуществляться по механизму электронной проводимости [18, 22]. Помимо этого, в полимерных композитах, наполненных ТУ, возможно туннелирование электронов через тонкие прослойки диэлектрика (полимерной матрицы) на расстояниях ~5–10 нм [18, 22, 23].

Стоит отметить, что в случае кристаллизующихся полимеров, сферолиты которых состоят из плотных кристаллитов и аморфных областей между ними, наблюдается локальная агломерация ТУ [24]. Так показано, что в полиэтилене (ПЭ) в процессе роста сферолитов углеродные частицы концентрируются между кристаллитами [24–27]. В свою очередь, это позволяет достичь более высоких значений электрической проводимости по сравнению с ПКМ на основе аморфных полимеров [28].

Заметная электрическая проводимость полимерных композитов достигается при определенном содержании ТУ, которое называется порогом перколяции, а соответствующее ему содержание, при котором происходит переход ЭПКМ от диэлектрика к полупроводнику и далее к проводнику, носит название перколяционного перехода [29]. При дальнейшем увеличении содержания ТУ в ЭПКМ рост электрической проводимости замедляется в связи с формированием в объеме полимерного композита устойчивого электропроводящего кластера с преимущественно контактной проводимостью. Этот кластер наиболее стабилен и устойчив к внешнему воздействию, но при меньших содержаниях ТУ до его появления система токопроводящих каналов проявляет неустойчивость, реагируя на термическое и деформационное воздействие резким ростом электрического сопротивления. Именно с этим связано явление ПТК в исследованных нами полимерных композитах с ТУ.

В смесевых полимерных композициях электрические характеристики зависят от распределения электропроводного наполнителя между фазами полимеров. Авторы [30] исследовали композиции ПЭ высокой плотности (ПЭВП) с полипропиленом (ПП), наполненные ТУ с диаметром первичных частиц 27 нм. Было установлено, что ТУ концентрируется в матрице более низкоплавкого ПЭ [30]. Концентрирование электропроводного наполнителя на границе раздела фаз двух полимеров может повышать электропроводность ЭПКМ [30, 31]. На примере смесей ПЭ с ПП показано, что несмотря на то, что углерод концентрируется в фазе ПЭ, порог перколяции композиции остается практически неизменным по сравнению с наполненным ПЭ [30, 32]. Распределяясь по границе раздела фаз, ТУ образует электропроводящие каналы при меньшем содержании наполнителя [30, 31].

Анализ научно-технической информации указывает на ускоренный ежегодный рост в последнее десятилетие числа публикаций и новых разработок в этой области. Однако доля в них публикаций, раскрывающих механизм явления ПТК в смесях полимеров, сравнительно невелика. Данная работа посвящена исследованию особенностей механизма проявления явления ПТК в смесях кристаллизующихся полимеров (ПЭ и ПП), приготовленных различными способами.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Объектами исследования являлись ПЭВП 277-73 Ставролен (ГОСТ 16338-85¹) и ПП 01050 Бален (ТУ 2211-074-05766563-2015²). В качестве электропроводного наполнителя использовали ТУ марки Omcarb С-140 (УМ-76) (ООО «Карбон», Россия, ТУ 38-10001-94). Приготовление смесевых композиций проводили при тех же условиях, что и в работе [33], но использовали несколько способов совмещения ТУ с ПЭ и ПП. Суммарное содержание ТУ во всех композитах составило 20 мас. % (11.7 об. %). Совмещение компонентов проводили, как и ранее [33], но в два этапа: сначала готовили двухкомпонентные смеси ПЭ/ТУ, ПП/ТУ или ПЭ/ПП, а затем осуществляли введение третьего компонента (ПЭ, ПП или ТУ) или совмещение двух смесей. Таким образом, были получены различные смесевые композиты (ПЭ/ТУ)/ПП, (ПП/ТУ)/ПЭ, (ПЭ/ПП)/ТУ и (ПП/ТУ)/(ПЭ/ТУ) с соотношениями ПЭ и ПП равным 1 к 1.

Образцы для исследования длиной $L = 120 \pm 2$ мм, шириной $b = 10 \pm 0.5$ мм и толщиной $\delta = 1.0 \pm 0.05$ мм с запрессованными на концах контактными электродами из латунной сетки Л-80 (ГОСТ 6613-86³) прессовали при 180°C в течение 3 мин и охлаждали в прессе до 50°C. Это способствовало стабилизации кристаллической структуры образцов и предотвращало появление «каландрового» эффекта.

Электрическое сопротивление образцов измеряли с помощью омметра DT9208A (РЕСАНТА, Латвия). Испытания при повышенных температурах проводили в термощкафу СНОЛ 3.5 (НПФ ТермИКС, Россия) со скоростью нагревания $\sim 3^\circ\text{C}/\text{мин}$. Температурный коэффициент электрического сопротивления α (1/°C) рассчитывали по формуле (1):

$$\alpha = \frac{\Delta\rho}{\rho_0\Delta T}, \quad (1)$$

где ρ — измеренное удельное объемное электрическое сопротивление (Ом·см); $\Delta\rho$ — изменение удельного объемного электрического сопротивления (Ом·см) при изменении температуры ΔT (°C); ρ_0 — удельное объемное электрическое сопротивление образцов (Ом·см) при нормальных условиях: ПЭ/ТУ = 32.5 Ом·см и ПП/ТУ = 11.5 Ом·см.

Изменение степени кристалличности полимеров при нагревании исследовали методом дифференциальной сканирующей калориметрии на приборе DSC 204F1 Phoenix (NETZSCH, Германия) со скоростью нагревания 3°C/мин. Степень кристалличности D (%) рассчитывали, используя уравнение (2):

$$D = 100 \frac{\Delta H_{\text{пл}}}{\Delta H_{\text{кр}}}, \quad (2)$$

где $\Delta H_{\text{пл}}$ — энтальпия плавления кристаллической фазы образца, рассчитанная с учетом массовой доли ТУ (кДж/моль); $\Delta H_{\text{кр}}$ — энтальпия плавления кристаллической фазы полимера (кДж/моль). Значения D при нормальных условиях: ПЭ/ТУ — 70.5%, ПП/ТУ — 48.5%.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 приведены зависимости удельных объемных электрических сопротивлений исходных ПЭ и ПП композиций с ТУ при нагревании. Характер изменения этих зависимостей аналогичен и соответствует описанному во введении. Наличие пиков на кривых обеспечивает саморегулирование мощности нагревателей при повышении внешней температуры. Механизм этого явления подробно описан нами ранее [33]. Разница в протекании процессов

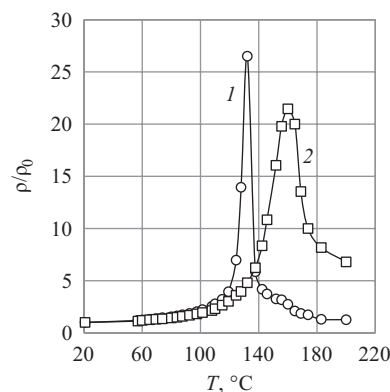


Рис. 1. Изменение приведенных величин удельных объемных электрических сопротивлений (ρ/ρ_0) композиций (1) ПЭ/ТУ и (2) ПП/ТУ при нагревании [33]

Fig. 1. Change in the specific volume electrical resistances (ρ/ρ_0) for compositions of (1) polyethylene (PE) / carbon black (CB) and (2) polypropylene (PP) / CB when heated [33]

¹ ГОСТ 16338-85. Межгосударственный стандарт. Полиэтилен низкого давления. Технические условия. М.: Стандартинформ; 2005. [GOST 16338-85. Interstate Standard. Low-pressure polyethylene. Specifications. Moscow: Standartinform; 2005 (in Russ.).]

² <https://polimermsk.ru/image/catalog/product/passport/TU%202211-074-05766563-2015.pdf>. Дата обращения 21.01.2026. / Accessed January 21, 2026 (in Russ.).

³ ГОСТ 6613-86. Межгосударственный стандарт. Сетки проволочные тканые с квадратными ячейками. Технические условия. М.: Стандартинформ; 2006. [GOST 6613-86. Interstate Standard. Square meshed woven wire cloths. Specifications. Moscow: Standartinform; 2005 (in Russ.).]

кристаллизации приводит к смещению пика ПТК ПП относительно пика ПЭ в область более высоких температур, а также расширению температурной области ОТК ПП.

Явление ОТК (снижение электрического сопротивления) может вызвать резкое увеличение мощности нагревателя и выход его из строя, и даже возгорание. В настоящее время его устраняют радиационным или химическим сшиванием полимера [28].

Для большей наглядности этих особенностей и понимания механизма явления ПТК на рис. 2 приведены графики зависимостей приведенной степени кристалличности D/D_0 (1) и приведенной электрической проводимости σ/σ_0 (2) ПЭ (а) и ПП (б) композиций с ТУ при нагревании. Следует отметить, что нагревание образцов ЭПКМ проводилось с постоянной скоростью нагревания $\sim 3^\circ\text{C}/\text{мин}$. Это позволяет считать данные кинетическими, т.к. изменения времени и температуры пропорциональны. Характер изменения этих зависимостей у ПЭ- и ПП-композиций также схож, но при этом показатели электрической проводимости снижаются с ростом температуры. У ПП ЭПКМ вследствие более высокой температуры плавления эта зависимость смещена в область более высоких температур. Это указывает на связь ПТК с процессом снижения степени кристалличности, идущим параллельно с уменьшением их электрической проводимости до начала действия эффекта ОТК.

При исследованных температурах для степени кристалличности характерно наличие периода медленного ее снижения, после которого наступает ускоряющееся ее снижение до полной

аморфизации полимера. В отличие от степени кристалличности, электрическая проводимость ЭПКМ начинает заметно снижаться уже при значительно меньших температурах. Это медленное снижение электрической проводимости ЭПКМ можно частично связать с тепловым расширением при нагревании полимеров, связанным с интенсификацией молекулярного теплового движения. Но и далее, при приближении к температурам начала плавления кристаллических образований, появившихся на завершающихся стадиях кристаллизации полимеров при низких температурах, это падение заметно опережает процесс снижения степени кристалличности. В отличие от степени кристалличности, которая на рис. 2 снижается до нуля, стадия ПТК ускоренного падения электрической проводимости ЭПКМ переходит в стадию ОТК, в которой электрическая проводимость начинает постепенно расти.

Приведенные выше результаты исследования влияния нагревания на свойства ЭПКМ подтверждают выводы [28] о том, что механизмы ПТК и ОТК не связаны только с тепловым расширением и плавлением ЭПКМ. Для уточнения описанных особенностей изменения электрического сопротивления в смесевых ЭПКМ были определены энергии активации описанных процессов в температурной зоне ПТК. На рис. 3 приведены зависимости изменения величин температурных коэффициентов электрического сопротивления α от температуры в координатах, соответствующих уравнению Аррениуса (температурная область ПТК смесевых композиций выделена пунктиром).

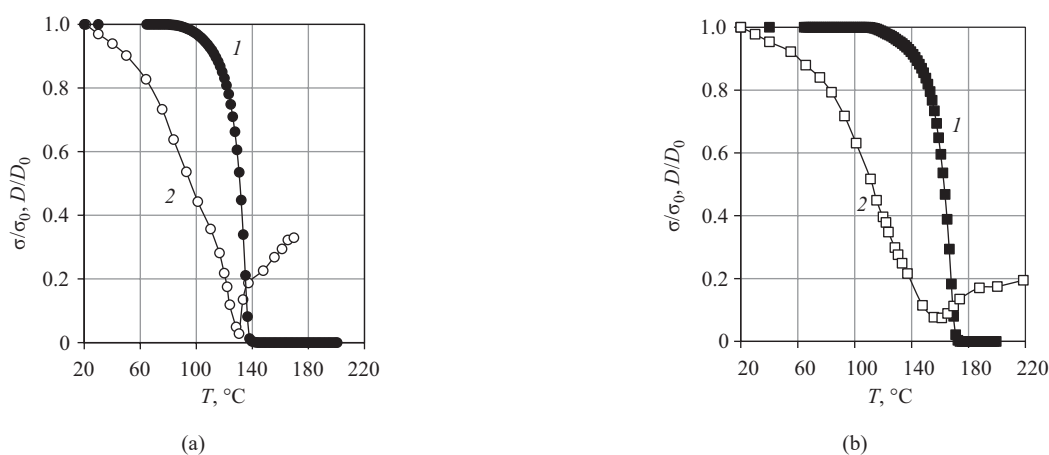


Рис. 2. Сравнение зависимостей приведенной степени кристалличности D/D_0 (1) и приведенной электрической проводимости σ/σ_0 (2) композиций (а) ПЭ/ТУ и (б) ПП/ТУ при нагревании

Fig. 2. Comparison of the dependence of the reduced degree of crystallinity D/D_0 (1) and reduced electrical conductivity σ/σ_0 (2) for (a) PE/CB and (b) PP/CB compositions when heated

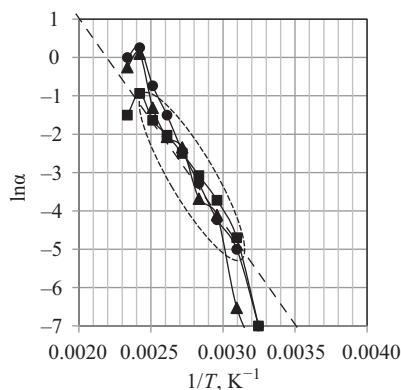


Рис. 3. Зависимость величин $\ln \alpha$ от обратной температуры ($1/T, K^{-1}$) ЭПКМ: (ПЭ/ТУ)/ПП (■), (ПП/ТУ)/ПЭ (▲) и (ПЭ/ПП/ТУ) (●)

Fig. 3. Dependence of $\ln \alpha$ on the reverse temperature ($1/T, K^{-1}$) for conductive polymer composites (CPCs): (PE/CB)/PP (■), (PP/CB)/PE (▲), and (PE/PP/CB) (●)

Оказалось, что рассчитанные энергии активации исследованных смесевых композиций мало зависят от способов смешения компонентов и составляют 44 ± 3 кДж/моль. Эти величины отличаются от энергий активаций их плавления, но совпадают со значениями энергии активации процесса вязкого течения расплавов ($E_{вт}$) и энергии разрушения токопроводящих каналов в зоне ПТК ($E_{эп}$) исследуемых ПЭВП и ПП [28]. Это позволяет говорить об их общем механизме.

Таким образом, скорость роста электрического сопротивления в смесях полимеров в температурной области ПТК зависит от наличия в полимерах дефектных кристаллических участков. Вследствие концентрирования частиц ТУ в наименее теплостойких межсферолитных областях кристаллизующихся полимеров и их смесей, разрушение токопроводящих каналов происходит на самых ранних стадиях начала плавления полимера за счет появления расширяющихся аморфных «микрокапель» его расплава.

Особенности влияния нагревания на изменение электрического сопротивления исследуемых ЭПКМ этим не ограничиваются. На рис. 4 приведены обобщенные результаты электрических испытаний, проведенных со всеми описанными выше образцами смесей. Здесь и далее пунктирными линиями выделены используемые для сравнения зависимости двухкомпонентных композитов (ПЭ/ТУ, ПП/ТУ); эти зависимости были подробно исследованы ранее [33]. Сплошные линии использованы для трехкомпонентных композитов: (ПЭ/ТУ)/ПП, (ПП/ТУ)/ПЭ, (ПЭ/ПП)/ТУ, (ПП/ТУ)/(ПЭ/ТУ).

Первое, на что можно обратить внимание, это совпадение всех линий смесевых композиций в температурной области ПТК с пунктирной линией ПЭ/ТУ,

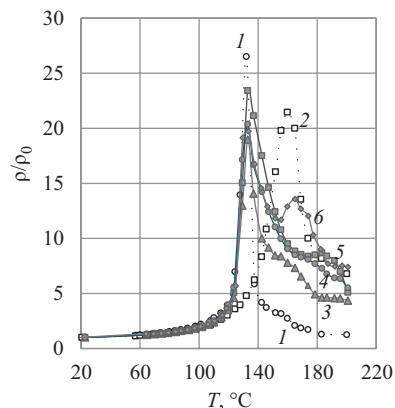


Рис. 4. Изменение приведенных величин удельных объемных электрических сопротивлений (ρ/ρ_0) при нагревании ЭПКМ: ПЭ/ТУ (1), ПП/ТУ (2), (ПЭ/ТУ)/ПП (3), ПП/ТУ/(ПЭ/ТУ) (4), (ПЭ/ПП)/ТУ (5) и (ПП/ТУ)/ПЭ (6)

Fig. 4. Change in the specific volume electrical resistances (ρ/ρ_0) when CPCs are heated: PE/CB (1), PP/CB (2), (PE/CB)/PP (3), PP/CB/(PE/CB) (4), (PE/PP)/CB (5), and (PP/CB)/PE (6)

а также появление дополнительных пиков различной высоты в температурной области ОТК смесевых композиций ПП/ТУ. Следует отметить, что в отличие от явления ПТК у полимерного нагревательного устройства явление ОТК является нежелательным. При высоких температурах эксплуатации нагревательных элементов из ЭПКМ падение сопротивления может вызвать резкий скачок мощности и разрушение нагревателя. Как упоминалось выше, в настоящее время для устранения эффекта ОТК полимерные нагреватели, изготовленные из ЭПКМ, подвергают радиационному или химическому сшиванию [28]. Это технологически сложный процесс, требующий специального оборудования и реактивов. Эта особенность изменения электрического сопротивления у смесевых ЭПКМ указывает на возможность снизить влияние ОТК. Однако на рис. 4 в температурных областях ОТК все линии расходятся и переплетаются, что затрудняет проведение анализа влияния состава смесевых композитов на изменение их удельных объемных электрических сопротивлений (ρ/ρ_0). Поэтому далее зависимости, приведенные на обобщенном рис. 4, будут разделены на три группы с учетом интенсивности влияния фазы ПП (нумерация линий сохранена на всех рисунках).

Наименьшее влияние на характер изменения удельного объемного электрического сопротивления ожидаемо наблюдается у композита (ПЭ/ТУ)/ПП, в котором ТУ первоначально смешивается с ПЭ, затем концентрированная композиция ПЭ/ТУ смешивается с ПП. Из-за повышенного содержания ТУ в фазе ПЭ высота пика ПТК уменьшается.

На рис. 5 представлены результаты исследования изменения электрического сопротивления при нагревании ЭПКМ (ПЭ/ТУ)/ПП.

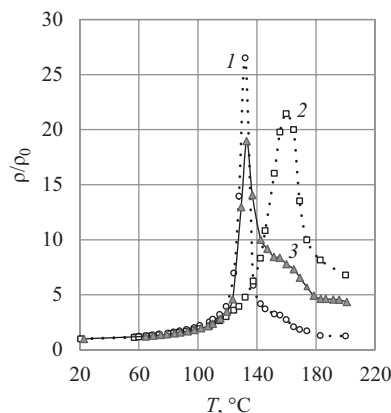


Рис. 5. Изменение приведенных величин удельных объемных электрических сопротивлений (ρ/ρ_0) при нагревании ЭПКМ: ПЭ/ТУ (1), ПП/ТУ (2) и (ПЭ/ТУ)/ПП (3)

Fig. 5. Change in the specific volume electrical resistances (ρ/ρ_0) when CPCs are heated: PE/CB (1), PP/CB (2), and (PE/CB)/PP (3)

Следует отметить, что при смешении расплавов с близкими содержаниями ПЭ и ПП формируются гетерофазные системы с двумя непрерывными микроволокнистыми фазами⁴ [34]. Концентрирование частиц ТУ в низкоплавкой фазе (ПЭ) смеси приводит к увеличению стабильности системы токопроводящих каналов в ее волокнах и, как следствие, к снижению высоты пика ПТК материала. Температурная зона ОТК этой смеси расширяется в область более высоких температур, частично захватывая зону ОТК смеси ПП/ТУ. Подобное появление в смесях «следов» ПП часто объясняют миграцией в его фазу частиц ТУ из фазы ПЭ [31, 32]. Это не исключено, однако причиной этого может быть описанное выше начало появления расширяющихся микроучастков ПП аморфного расплава. Тем не менее, этого повышения (ρ увеличилось примерно в 2 раза) недостаточно для полного устранения нежелательного явления ОТК у этой композиции.

На рис. 6 представлены результаты исследования изменения электрического сопротивления двух схожих по поведению при нагревании ЭПКМ: (ПЭ/ТУ)/(ПП/ТУ) и (ПЭ/ПП)/ТУ.

В этих композициях содержание ТУ в ПП увеличивается, «след» ПП в температурной зоне его ПТК становится более заметным и четким. Это означает, что данные ЭПКМ будут более устойчивы к перегреву.

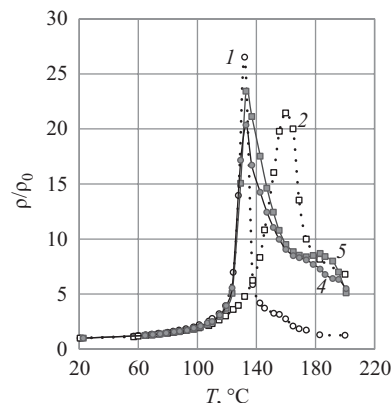


Рис. 6. Изменение приведенных величин удельных объемных электрических сопротивлений (ρ/ρ_0) при нагревании ЭПКМ: ПЭ/ТУ (1), ПП/ТУ (2), (ПЭ/ТУ)/(ПП/ТУ) (4) и (ПЭ/ПП)/ТУ (5)

Fig. 6. Change in the specific volume electrical resistances (ρ/ρ_0) when CPCs are heated: PE/CB (1), PP/CB (2), (PE/CB)/(PP/CB) (4), and (PE/PP)/CB (5)

С точки зрения стабильной работы ЭПКМ при повышенных температурах наилучшей является композиция (ПП/ТУ)/ПЭ (рис. 7). График изменения удельного объемного электрического сопротивления (ρ/ρ_0) при нагревании ЭПКМ фактически состоит из двух соседствующих пиков ПТК: пика ПЭ и пика ПП, которые охватывают широкую область температур — от 120 до 160°C. Это делает последний ЭПКМ наиболее устойчивым к перегреву.

Таким образом, способ совмещения компонентов смесей кристаллизующихся полимеров с ТУ

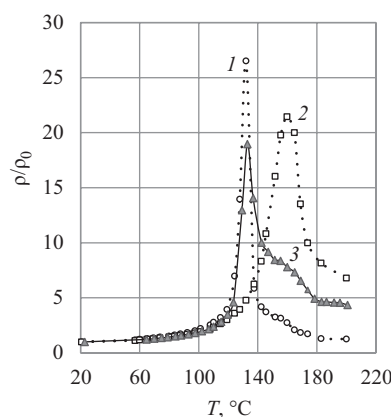


Рис. 7. Изменение приведенных величин удельных объемных электрических сопротивлений (ρ/ρ_0) при нагревании ЭПКМ: ПЭ/ТУ (1), ПП/ТУ (2) и (ПП/ТУ)/ПЭ (6)

Fig. 7. Change in the specific volume electrical resistances (ρ/ρ_0) when CPCs are heated: PE/CB (1), PP/CB (2), and (PP/CB)/PE (6)

⁴ Марков А.В. Технология ориентированных многокомпонентных полимерных пленок. Автореферат дис. д.т.н. М.: Московская государственная академия тонкой химической технологии им. М.В. Ломоносова; 2006. [Markov A.V. Technology of oriented multicomponent polymer films. Dr. Sci. Thesis (Eng.). Moscow: Lomonosov Moscow State Academy of Fine Chemical Technology; 2006 (in Russ.).]

мало влияет на положение пика ПТК. Величина и характер изменения пика ПТК смесей кристаллизующихся полимеров с ТУ определяется температурой начала плавления наиболее низкоплавкой фазы (ПЭ).

Гетерогенность смесей кристаллизующихся полимеров с ТУ повышает их термическую устойчивость за счет расширения зоны ПТК в область плавления более высокоплавкой фазы (ПП).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование ЭПКМ со смесевой полимерной матрицей, состоящей из двух полимеров с различными температурами плавления (например, ПЭ и ПП) позволяет регулировать интенсивность эффекта ПТК и ОТК. При этом низкоплавкий полимер (ПЭ) является компонентом ЭПКМ, который задает характер ПТК и температуру «саморегулирования» нагревателя, а более высокоплавкий полимер с более высоким ПТК и ОТК (ПП) смещает скачок электрической проводимости смесового ЭПКМ, нарушающий работу нагревателя, в область повышенных температур. Результаты работы позволили установить ряд явлений, происходящих в саженаполненных ЭПКМ с эффектами ПТК и ОТК. С целью дальнейших исследований необходимо рассмотреть ПКМ с эффектами ПТК и ОТК с точки зрения наполнителя, в частности геометрических параметров ТУ специальных марок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Frydman E. *Improvements in or Relating to Resistance Elements Having Positive Temperature/Resistance Characteristics*: United Kingdom Pat. GB 604695A. Current Assignee: Automatic Telephone and Electric Co. Ltd. Priority 16.11.1945; Publ. 08.07.1948.
2. Meyer J. Glass transition temperature as a guide to selection of polymers suitable for PTC materials. *Polym. Eng. Sci.* 1973;13(6):462–468. <https://doi.org/10.1002/pen.760130611>
3. Kohler F. *Resistance Element*: USA Pat. US 3243753. Priority 13.13.1962; Publ. 29.03.1966.
4. Марков В.А., Кандырин Л.Б., Марков А.В. Влияние деформирования на электрическое сопротивление композитов на основе полиэтилена и технического углерода. *Конструкции из композиционных материалов*. 2013;4:40–44. <https://www.elibrary.ru/rdhgqf>
5. Ильин А.П. *Пластиковый водогрейный котел*: пат. RU 2680099 С1 РФ. Заявка № 2016117137; заявл. 29.11.2013; опубл. 15.02.2019.

Благодарности

Работа выполнена в соответствии с научно-исследовательской инициативной темой 195-ИТХТ.

Acknowledgments

The study was carried out in accordance with research initiative topic 195-ITKhT.

Вклад авторов

А.В. Марков — концептуализация исследования, администрирование работы, обсуждение и анализ результатов, написание текста статьи.

А.Е. Зверев — постановка эксперимента, изучение свойств образцов, сбор аналитических данных, обработка, анализ и визуализация полученных результатов, написание текста статьи.

Е.В. Калугина — консультация, обсуждение и анализ полученных результатов.

В.А. Марков — разработка методологии экспериментальной части.

Authors' contributions

A.V. Markov — conceptualization of the study, administration of the study, discussion and analysis of the results, writing the text of the article.

A.E. Zverev — setting up the experiment, studying the properties of the samples, collecting analytical data, processing, analyzing and visualizing the results, writing the text of the article.

E.V. Kalugina — consultation, discussion and analysis of the results obtained.

V.A. Markov — development of the methodology for the experimental section.

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflicts of interest.*

REFERENCES

1. Frydman E. *Improvements in or Relating to Resistance Elements Having Positive Temperature/Resistance Characteristics*: United Kingdom Pat. GB 604695A. Current Assignee: Automatic Telephone and Electric Co. Ltd. Priority 16.11.1945; Publ. 08.07.1948.
2. Meyer J. Glass transition temperature as a guide to selection of polymers suitable for PTC materials. *Polym. Eng. Sci.* 1973;13(6):462–468. <https://doi.org/10.1002/pen.760130611>
3. Kohler F. *Resistance Element*: USA Pat. US 3243753. Priority 13.13.1962; Publ. 29.03.1966.
4. Markov V.A., Kandyrin L.B., Markov A.V. The effect of strain on electrical resistivity of carbon black filled polyethylene composites. *Konstruktsii iz kompozitsionnykh materialov = Composite Materials Constructions*. 2013;4:40–44 (in Russ.). <https://www.elibrary.ru/rdhgqf>
5. Ilyin A.P. *Plastic Hot Water Boiler*: RF Pat. RU 2680099 C1. Publ. 15.02.2019 (in Russ.).

6. Исии Т., Ясуи К., Теракадо С., Кохара К., Енеяма М. Гибкий нагревательный элемент с положительным температурным коэффициентом сопротивления и способ изготовления такого нагревательного элемента: пат. RU 2297112С2 РФ. Заявка № 2004137117/09; заявл. 16.06.2003; опубл. 10.04.2007.
7. Хайнеманн К., Бауэр Р.У., Вельцель Т., Шрёднер М., Шуберт Ф., Риде С. Электропроводящее формованное изделие с положительным температурным коэффициентом: пат. RU 2709631С9 РФ. Заявка № 2018141551; заявл. 22.06.2017; опубл. 04.06.2020.
8. Setnescu R., Lungulescu E.M. Novel PTC Composites for Temperature Sensors (and Related Applications). In: Sen J., Yi M., Niu F., Wu H. (Eds.). *Wireless Sensor Networks – Design, Applications and Challenges*. 2023. <https://doi.org/10.5772/intechopen.110358>
9. Ahn J.-H., Choi D.-S., Lee C.-Y. Resistances of carbon black and polymers in smart paints for temperature sensors. *J. Nanosci. Nanotechnol.* 2021;21(7):3716–3720. <https://doi.org/10.1166/jnn.2021.19209>
10. Huang Y., Ellingford C., Bowen C.R., et al. Tailoring the electrical and thermal conductivity of multi-component and multi-phase polymer composites. *Int. Mater. Rev.* 2020;65(3): 129–163. <https://doi.org/10.1080/09506608.2019.1582180>
11. Harussani M.M., Sapuan S.M., Nadeem G., et al. Recent applications of carbon-based composites in defence industry: A review. *Defence Technol.* 2022;18(8):1281–1300. <https://doi.org/10.1016/j.dt.2022.03.006>
12. Yun C.M., Tong C.T., Kuo H.C. *Conductive Composition Exhibiting PTC Behavior and Over-Current Protection Device Using the Same*: USA Pat. US 20060108566A1. Publ. 25.05.2006.
13. Wang S.C., Yang E.T. *Over-Current Protection Device*: USA Pat. US 2006089448. Publ. 27.04.2006.
14. Jeong M.W. *Composition Materials for Current Control Heating Resistor Having Elasticity and Method for Manufacturing PTC Having Elasticity*: South Korea Pat. KR 20050114005A. Publ. 05.12.2005.
15. Васильев В.А., Хошев А.В. Способ изготовления нано-микроразмерной системы датчика физических величин с заданным положительным температурным коэффициентом сопротивления резистивных элементов: пат. RU 2554083С1 РФ. Заявка № 2014116189/07; заявл. 22.04.2014; опубл. 27.06.2015.
16. Берлянд А.М., Эйidler Э.Д. Полимерная электропроводящая композиция: А.с. 89247 СССР. Заявка № 2911115/24-07; заявл. 14.04.1980; опубл. 23.12.1981.
17. Liu C.C., Walters A.B., Vannice M.A. Measurement of electrical properties of a carbon black. *Carbon.* 1995;33(12): 1699–1708. [https://doi.org/10.1016/0008-6223\(95\)00125-4](https://doi.org/10.1016/0008-6223(95)00125-4)
18. Гуль В.Е., Шенфиль Л.З. *Электропроводящие полимерные композиции*. М.: Химия; 1984, 240 с.
19. Khodabakhshi S., Fulvio P.F., Andreoli E. Carbon black reborn: Structure and chemistry for renewable energy harnessing. *Carbon.* 2020;162:604–649. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2020.02.058>
20. Aharoni S.M. Electrical resistivity of a composite of conducting particles in an insulating matrix. *J. Appl. Phys.* 1972;43(5):2463–2465. <https://doi.org/10.1063/1.1661529>
21. Bueche F. Electrical resistivity of conducting particles in an insulating matrix. *J. Appl. Phys.* 1972;43(11):4837–4838. <https://doi.org/10.1063/1.1661034>
22. Foulger S.H. Reduced percolation thresholds of immiscible conductive blends. *J. Polym. Sci. Part B: Polym. Phys.* 1999;37(15):1899–1910.
23. Sommers D.J. Carbon black for electrically conductive plastics. *Polymer-Plastics Technol. Eng.* 1984;23(1):83–89. <https://doi.org/10.1080/03602558408070043>
6. Ishii T., Yasui K., Terakado S., Kohara K., Eneyama M. *Flexible Heating Element with a Positive Temperature Coefficient of Resistance and a Method for Manufacturing Such a Heating Element*: RF Pat. RU 2297112C2. Publ. 10.04.2007 (in Russ.).
7. Heinemann K., Bauer R.U., Welzel T., Schrödner M., Schubert F., Riede S. *Electroconductive Molded Article With a Positive Temperature Coefficient*: RF Pat. RU 2709631C9. Publ. 04.06.2020 (in Russ.).
8. Setnescu R., Lungulescu E.M. Novel PTC Composites for Temperature Sensors (and Related Applications). In: Sen J., Yi M., Niu F., Wu H. (Eds.). *Wireless Sensor Networks – Design, Applications and Challenges*. 2023. <https://doi.org/10.5772/intechopen.110358>
9. Ahn J.-H., Choi D.-S., Lee C.-Y. Resistances of carbon black and polymers in smart paints for temperature sensors. *J. Nanosci. Nanotechnol.* 2021;21(7):3716–3720. <https://doi.org/10.1166/jnn.2021.19209>
10. Huang Y., Ellingford C., Bowen C.R., et al. Tailoring the electrical and thermal conductivity of multi-component and multi-phase polymer composites. *Int. Mater. Rev.* 2020;65(3): 129–163. <https://doi.org/10.1080/09506608.2019.1582180>
11. Harussani M.M., Sapuan S.M., Nadeem G., et al. Recent applications of carbon-based composites in defence industry: A review. *Defence Technol.* 2022;18(8):1281–1300. <https://doi.org/10.1016/j.dt.2022.03.006>
12. Yun C.M., Tong C.T., Kuo H.C. *Conductive Composition Exhibiting PTC Behavior and Over-Current Protection Device Using the Same*: USA Pat. US 20060108566A1. Publ. 25.05.2006.
13. Wang S.C., Yang E.T. *Over-Current Protection Device*: USA Pat. US 2006089448. Publ. 27.04.2006.
14. Jeong M.W. *Composition Materials for Current Control Heating Resistor Having Elasticity and Method for Manufacturing PTC Having Elasticity*: South Korea Pat. KR 20050114005A. Publ. 05.12.2005.
15. Васильев В.А., Хошев А.В. Способ изготовления нано-микроразмерной системы датчика физических величин с заданным положительным температурным коэффициентом сопротивления резистивных элементов: пат. RU 2554083С1 РФ. Заявка № 2014116189/07; заявл. 22.04.2014; опубл. 27.06.2015.
16. Берлянд А.М., Эйidler Э.Д. Полимерная электропроводящая композиция: А.с. 89247 СССР. Заявка № 2911115/24-07; заявл. 14.04.1980; опубл. 23.12.1981.
17. Liu C.C., Walters A.B., Vannice M.A. Measurement of electrical properties of a carbon black. *Carbon.* 1995;33(12): 1699–1708. [https://doi.org/10.1016/0008-6223\(95\)00125-4](https://doi.org/10.1016/0008-6223(95)00125-4)
18. Гуль В.Е., Шенфиль Л.З. *Электропроводящие полимерные композиции*. М.: Химия; 1984, 240 с.
19. Khodabakhshi S., Fulvio P.F., Andreoli E. Carbon black reborn: Structure and chemistry for renewable energy harnessing. *Carbon.* 2020;162:604–649. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2020.02.058>
20. Aharoni S.M. Electrical resistivity of a composite of conducting particles in an insulating matrix. *J. Appl. Phys.* 1972;43(5):2463–2465. <https://doi.org/10.1063/1.1661529>
21. Bueche F. Electrical resistivity of conducting particles in an insulating matrix. *J. Appl. Phys.* 1972;43(11):4837–4838. <https://doi.org/10.1063/1.1661034>
22. Foulger S.H. Reduced percolation thresholds of immiscible conductive blends. *J. Polym. Sci. Part B: Polym. Phys.* 1999;37(15):1899–1910.
23. Sommers D.J. Carbon black for electrically conductive plastics. *Polymer-Plastics Technol. Eng.* 1984;23(1):83–89. <https://doi.org/10.1080/03602558408070043>

23. Sommers D.J. Carbon black for electrically conductive plastics. *Polymer-Plastics Technol. Eng.* 1984;23(1):83–89. <https://doi.org/10.1080/03602558408070043>
24. Beaucage G., Rane S., Schaefer D.W., et al. Morphology of polyethylene–carbon black composites. *J. Polym. Sci. Part B: Polym. Phys.* 1999;37(11):105–119.
25. Sircar A.K., Wells J.L. Electrothermal study of carbon loaded ethylene-vinylacetate copolymer. *Polym. Eng. Sci.* 1981;21(13):809–815. <https://doi.org/10.1002/pen.760211302>
26. Zhang M., Jia W., Chen X. Influences of crystallization histories on PTC/NTC effects of PVDF/CB composites. *J. Appl. Polym. Sci.* 1996;62(5):743–747. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-4628\(19961031\)62:5<743::AID-APP4>3.0.CO;2-W](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-4628(19961031)62:5<743::AID-APP4>3.0.CO;2-W)
27. Tang H., Chen X., Luo Y. Studies on the PTC/NTC effect of carbon black filled low density polyethylene composites. *Eur. Polym. J.* 1997;33(8):1383–1386. [https://doi.org/10.1016/S0014-3057\(96\)00221-2](https://doi.org/10.1016/S0014-3057(96)00221-2)
28. Марков В.А., Кандырин Л.Б., Марков А.В., Сорокина Е.А. Влияние силанольного сшивания на электрические характеристики и теплостойкость полиэтиленовых композитов с техническим углеродом. *Пласт. массы.* 2013;10: 21–24. <https://www.elibrary.ru/rtrtibr>
29. Marsden A.J., Papageorgiou D.G., Valles C., et al. Electrical percolation in graphene–polymer composites. *2D Mater.* 2018;5(3):2–19. <https://doi.org/10.1088/2053-1583/aac055>
30. Sumita M., Sakata K., Asai S., et al. Dispersion of fillers and the electrical conductivity of polymer blends filled with carbon black. *Polymer Bulletin.* 1991;25(2):265–271. <https://doi.org/10.1007/bf00310802>
31. Tchoudakov R., Breuer O., Narkis M. Conductive polymer blends with low carbon black loading: polypropylene/polyamide. *Polym. Eng. Sci.* 1996;36(10):1336–1346. <https://doi.org/10.1002/pen.10528>
32. Markov V.A., Markov A.V., Poldushev M.A., et al. The influence of the method used to prepare electrically conductive composites based on polyethylene, polypropylene, and carbon black on their properties at elevated temperatures. *Int. Polym. Sci. Technol.* 2016;43(3):T13–T18. <https://doi.org/10.1177/0307174x1604300303>
33. Марков А.В., Зверев А.Е., Марков В.А. Особенности изменения термического коэффициента электрического сопротивления при нагревании электропроводящих композиций кристаллизующихся полиолефинов с техническим углеродом. *Тонкие химические технологии.* 2024;19(5):429–440. <https://doi.org/10.32362/2410-6593-2024-19-5-429-440>
34. Марков А.В., Кулезнев В.Н. Формирование фазовой структуры и ее влияние на свойства ориентированных пленок из смесей полипропилена и полиэтилена. *Высоко-молек. соединения. Сер. А.* 2008;50(4):651–658. <https://elibrary.ru/ijkowv>
24. Beaucage G., Rane S., Schaefer D.W., et al. Morphology of polyethylene–carbon black composites. *J. Polym. Sci. Part B: Polym. Phys.* 1999;37(11):105–119.
25. Sircar A.K., Wells J.L. Electrothermal study of carbon loaded ethylene-vinylacetate copolymer. *Polym. Eng. Sci.* 1981;21(13):809–815. <https://doi.org/10.1002/pen.760211302>
26. Zhang M., Jia W., Chen X. Influences of crystallization histories on PTC/NTC effects of PVDF/CB composites. *J. Appl. Polym. Sci.* 1996;62(5):743–747. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-4628\(19961031\)62:5<743::AID-APP4>3.0.CO;2-W](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-4628(19961031)62:5<743::AID-APP4>3.0.CO;2-W)
27. Tang H., Chen X., Luo Y. Studies on the PTC/NTC effect of carbon black filled low density polyethylene composites. *Eur. Polym. J.* 1997;33(8):1383–1386. [https://doi.org/10.1016/S0014-3057\(96\)00221-2](https://doi.org/10.1016/S0014-3057(96)00221-2)
28. Markov V.A., Kandyrin L.B., Markov A.V., Sorokina E.A. Effect of silane-crosslinking on electrical properties and heat-resistance of carbon black polyethylene composites. *Plasticheskie massy.* 2013;10:21–24 (in Russ.). <https://www.elibrary.ru/rtrtibr>
29. Marsden A.J., Papageorgiou D.G., Valles C., et al. Electrical percolation in graphene–polymer composites. *2D Mater.* 2018;5(3):2–19. <https://doi.org/10.1088/2053-1583/aac055>
30. Sumita M., Sakata K., Asai S., et al. Dispersion of fillers and the electrical conductivity of polymer blends filled with carbon black. *Polymer Bulletin.* 1991;25(2):265–271. <https://doi.org/10.1007/bf00310802>
31. Tchoudakov R., Breuer O., Narkis M. Conductive polymer blends with low carbon black loading: polypropylene/polyamide. *Polym. Eng. Sci.* 1996;36(10):1336–1346. <https://doi.org/10.1002/pen.10528>
32. Markov V.A., Markov A.V., Poldushev M.A., et al. The influence of the method used to prepare electrically conductive composites based on polyethylene, polypropylene, and carbon black on their properties at elevated temperatures. *Int. Polym. Sci. Technol.* 2016;43(3):T13–T18. <https://doi.org/10.1177/0307174x1604300303>
33. Markov A.V., Zverev A.E., Markov V.A. Features of the change in the thermal coefficient of electrical resistance upon heating electrically conductive composites of crystallizable polyolefins with carbon black. *Tonk. Khim. Tekhnol. = Fine Chem. Technol.* 2024;19(5):429–440. <https://doi.org/10.32362/2410-6593-2024-19-5-429-440>
34. Markov A.V., Kuleznev V.N. Formation of the phase structure and its influence on the properties of oriented polypropylene-polyethylene blend films. *Polym. Sci. Ser. A.* 2008;50(4): 422–428. <https://doi.org/10.1134/S0965545X0804010X> [Original Russian Text: Markov A.V., Kuleznev V.N. Formation of the phase structure and its influence on the properties of oriented polypropylene-polyethylene blend films. *Vysokomolekulyarnye soedineniya. Ser. A.* 2008;50(4): 651–658 (in Russ.). <https://elibrary.ru/ijkowv>]

Об авторах

Марков Анатолий Викторович, д.т.н., профессор, кафедры химии и технологии переработки пластмасс и полимерных композитов, Институт тонких химических технологий им. М.В. Ломоносова, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: markovan@bk.ru. Scopus Author ID 57222377754, SPIN-код РИНЦ 1127-9590, <https://orcid.org/0000-0001-7952-7419>

Зверев Александр Евгеньевич, аспирант, кафедры химии и технологии переработки пластмасс и полимерных композитов, Институт тонких химических технологий им. М.В. Ломоносова, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: azmonst@gmail.com. Scopus Author ID 59394532100, ResearcherID ABJ-9575-2022, SPIN-код РИНЦ 3609-8535, <https://orcid.org/0009-0004-4418-5825>

Калугина Елена Владимировна, д.х.н., заместитель директора НИИ ООО «Группа ПОЛИПЛАСТИК» (119530, Россия, Москва, Очаковское шоссе, д. 18, стр. 3); профессор, кафедры химии и технологии переработки пластмасс и полимерных композитов, Институт тонких химических технологий им. М.В. Ломоносова, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: kalugina@polyplastic.ru. Scopus Author ID 6603064139, <https://orcid.org/0000-0002-1894-8604>

Марков Василий Анатольевич, к.т.н., ведущий инженер-программист, ООО «Белл Интегратор Инновации» (119192, Россия, Москва, Раменский бульвар, д. 1, Инновационный научно-технологический центр МГУ «Воробьевы горы», кластер «Ломоносов»). E-mail: markov.vasily@mail.ru. Scopus Author ID 57189505018, <https://orcid.org/0000-0002-5768-9107>

About the Authors

Anatoly V. Markov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department of Chemistry and Technology of Plastics and Polymer Composites Processing, M.V. Lomonosov Institute of Fine Chemical Technologies, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454, Russia). E-mail: markovan@bk.ru. Scopus Author ID 57222377754, RSCI SPIN-code 1127-9590, <https://orcid.org/0000-0001-7952-7419>

Alexander E. Zverev, Postgraduate Student, Department of Chemistry and Technology of Plastics and Polymer Composites Processing, M.V. Lomonosov Institute of Fine Chemical Technologies, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454, Russia). E-mail: azmonst@gmail.com. Scopus Author ID 59394532100, ResearcherID ABJ-9575-2022, RSCI SPIN-code 3609-8535, <https://orcid.org/0009-0004-4418-5825>

Elena V. Kalugina, Dr. Sci. (Chem.), Deputy Director, Research Institute, POLYPLASTIC Group (18/3, Ochakovskoe sh., Moscow, 119530, Russia); Professor, Department of Chemistry and Technology of Plastics and Polymer Composites Processing, M.V. Lomonosov Institute of Fine Chemical Technologies, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454, Russia). E-mail: kalugina@polyplastic.ru. Scopus Author ID 6603064139, <https://orcid.org/0000-0002-1894-8604>

Vasily A. Markov, Cand. Sci. (Eng.), Lead Software Engineer, Bell Integrator Innovations (1, Ramenskii bul., MSU Innovative Scientific and Technological Center “Vorob’evy Gory,” cluster “Lomonosov,” Moscow, 119192, Russia). E-mail: markov.vasily@mail.ru. Scopus Author ID 57189505018, <https://orcid.org/0000-0002-5768-9107>