
**СИНТЕЗ И ПЕРЕРАБОТКА ПОЛИМЕРОВ
И КОМПОЗИТОВ НА ИХ ОСНОВЕ**

**SYNTHESIS AND PROCESSING OF POLYMERS
AND POLYMERIC COMPOSITES**

ISSN 2410-6593 (Print), ISSN 2686-7575 (Online)

<https://doi.org/10.32362/2410-6593-2021-16-4-345-351>



УДК 678.5.046

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

**Влияние релаксационных процессов при деформировании
на электрическое сопротивление полипропиленовых
композитов с техническим углеродом**

А.В. Марков[@], К.С. Тарасова, В.А. Марков

*МИРЭА – Российский технологический университет (Институт тонких химических технологий
им. М.В. Ломоносова), Москва, 119571 Россия*

[@]Автор для переписки, e-mail: markovan@bk.ru

Аннотация

Цели. Работа посвящена изучению влияния деформации изгиба при повышенных температурах на изменение электрического сопротивления электропроводящих полипропиленовых композитов, наполненных техническим углеродом.

Методы. Исследовались полипропиленовые композиты с техническим углеродом УМ-76. Образцы изгибались и выдерживались при заданном прогибе в интервале 20–155 °С.

Результаты. При деформировании образцов наблюдался обратимый рост электрического сопротивления. Последующая выдержка образцов в деформированном состоянии сопровождалась экспоненциальным падением их электрического сопротивления. Были рассчитаны средние времена и энергия активации электрической релаксации деформированных полипропиленовых композитов (30–32 кДж/моль), а также проведено их сравнение с аналогичными характеристиками полиэтиленовых композитов (около 14–16 кДж/моль).

Выводы. При механическом деформировании электропроводящих полипропиленовых композитов с техническим углеродом, в том числе при повышенных температурах, характер релаксации электрического сопротивления аналогичен характеру релаксации механического напряжения. Средние времена и энергия активации электрической релаксации деформированных полипропиленовых композитов сопоставимы с аналогичными показателями для механической релаксации. Это указывает на общий механизм этих процессов.

Ключевые слова: электропроводящий полипропилен, технический углерод, электрическое сопротивление, деформация, релаксация, эффект ПТК

Для цитирования: Марков А.В., Тарасова К.С., Марков В.А. Влияние релаксационных процессов при деформировании на электрическое сопротивление полипропиленовых композитов с техническим углеродом. *Тонкие химические технологии*. 2021;16(4):345–351. <https://doi.org/10.32362/2410-6593-2021-16-4-345-351>

RESEARCH ARTICLE

Effect of relaxation processes during deformation on electrical resistivity of carbon black polypropylene composites

Anatoly V. Markov[@], Katerina S. Tarasova, Vasily A. Markov

MIREA – Russian Technological University (M.V. Lomonosov Institute of Fine Chemical Technologies), Moscow, 119571 Russia

[@]Corresponding author, e-mail: markovan@bk.ru

Abstract

Objectives. To study the relationship between bending deformation and the change in the electrical resistance of carbon black polypropylene composites.

Methods. Conductive polypropylene composites filled with carbon black UM-76 were investigated. The samples were deformed and kept under constant bending at temperatures of 20–155 °C.

Results. The deformation of the samples led to a reversible increase in their electrical resistance, while subsequent holding of the samples in the deformed state was accompanied by an exponential drop in their electrical resistance. The average times and activation energies of the electrical relaxation of the deformed polypropylene composites were calculated (30–32 kJ/mol) and compared with similar characteristics of polyethylene composites (15–16 kJ/mol).

Conclusions. The electrical resistance relaxation of deformed carbon black polypropylene composites at elevated temperatures is similar to their stress relaxation. The average times and activation energies of the electrical relaxation of deformed polypropylene composites are comparable with similar data on their mechanical relaxation. It was found that these electrical and mechanical phenomena are based on the same underlying physical processes.

Keywords: conductive polypropylene composites, carbon black, electrical resistivity, deformation, relaxation, PTC effect

For citation: Markov A.V., Tarasova K.S., Markov V.A. Effect of relaxation processes during deformation on electrical resistivity of carbon black polypropylene composites. *Tonk. Khim. Tekhnol. = Fine Chem. Technol.* 2021;16(4):345–351 (Russ., Eng.). <https://doi.org/10.32362/2410-6593-2021-16-4-345-351>

ВВЕДЕНИЕ

На основе электропроводящих полимерных композитов, содержащих технический углерод (ТУ), изготавливают саморегулирующиеся нагревательные кабели, терморегулирующие нагревательные элементы и термостатирующие устройства, а также самоотключающиеся электрические

предохранители [1]. Способность данных материалов изменять электрическое сопротивление при механическом деформировании [2] открывает новые возможности применения таких композитов, например, в качестве датчиков внутренних механических напряжений и индикаторов повреждений [3]. Вне зависимости от форм и размеров электропроводящих наполнителей, изменение электропроводности

композитов при макроскопическом деформировании обычно объясняют изменением расстояний между токопроводящими частицами [4]. Изменение электрического сопротивления при деформировании электропроводящих композитов связано с процессами перестройки системы электропроводящих каналов: разрушением существующих электропроводящих каналов либо возникновением новых каналов [5, 6]. Преобладание того или иного процесса и, как следствие, повышение или снижение электрического сопротивления зависит от природы полимерной матрицы и содержания электропроводного наполнителя [7, 8]. На образование электропроводящих каналов при деформировании композита также влияют ориентационные явления в полимерной матрице. Этот эффект, в частности, проявляется в анизотропии электрических свойств при растяжении электропроводящего композита в связи с возникновением анизотропии структуры композита при деформировании макромолекул полимера [7]. У полимерных электропроводящих композитов, наполненных ТУ, механические и электрические характеристики меняются взаимосвязано. Это открывает возможность на основании данных об изменении электропроводности изучать релаксационные явления в материале, недоступные для исследования другими методами [9]. У электропроводящих полимерных композитов при циклическом деформировании наблюдается гистерезис электрического сопротивления подобно гистерезису механического напряжения [4]. Наиболее высокая чувствительность электрического сопротивления к изменению температуры (положительный температурный коэффициент (ПТК)) и деформации растяжения наблюдается при содержании электропроводного наполнителя, соответствующему области порога протекания (перколяции) [10–12]. Именно при таком содержании наполнителя электропроводящий полимерный композиционный материал пригоден для использования в терморегулирующих нагревательных элементах. Вместе с тем наличие отрицательного температурного коэффициента (ОТК) является нежелательным эффектом, так как может привести к выходу из строя полимерного композиционного нагревателя. Данный эффект может быть устранен путем радиационного или химического сшивания полимерной матрицы электропроводящего композита либо за счет использования в качестве полимерной матрицы смеси полиэтилена (ПЭ) с более теплостойким полимером, например, полипропиленом (ПП) [13, 14]. Стоит отметить, что влияние различных видов деформирования, таких как растяжение, сжатие, сдвиг, на электрическое сопротивление электропроводящих полимерных композитов в настоящее время подробно изучается

[6, 15, 16]. При этом в научной и технической литературе практически отсутствуют данные о влиянии на электрическое сопротивление изгибающей деформации, особенно значимой для саморегулирующихся нагревательных кабелей, при изготовлении которых используются указанные композиционные материалы. Именно такой вид деформации является основным для нагревательных кабелей.

Цель настоящей работы – изучение связи деформирования и величины электрического сопротивления полипропиленовых композитов с ТУ.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Исследовались полипропиленовые композиты (ПП марки PPG 1120-16, ООО «Ставролен», Буденновск, Россия, ТУ 2211-008-50236110-2006) с оптимальным для нагревательных элементов содержанием электропроводящего технического углерода УМ-76 (ОАО «Завод технического углерода», Омск, Россия, ТУ 38-10001-94) – 20 мас. % (11.7 об. %).

Композиции готовили на пластографе Brabender, *Brabender GmbH* (Duisburg, Германия) при 200 °С, как в [17]. Изготовление образцов проводили путем прессования при 200 ± 2 °С с припрессовкой контактов из латунной сетки Л-80 (ГОСТ 6613-86¹), как описано в [17]. Электрическое сопротивление образцов измеряли омметром DT9208A.

Исследования влияния деформации изгиба проводили от 20 до 155 °С в термощкафу СНОЛ 3.5, ООО «ТерМИКС» (Россия), как описано в [18]. При этом образец деформировался с постоянной скоростью движения инжектора 5 мм/с на фиксированную глубину прогиба до деформации $0.11 \pm 0.01\%$ (при больших деформациях образцы ломались при температурах менее 100 °С).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для исследуемых материалов характерен резкий рост электрического сопротивления, обусловленный перестройкой кристаллической структуры полимера в температурной области плавления и интенсивным разрушением токопроводящих каналов, образованных частицами ТУ [17]. Интервал температур в области пика на зависимости электрического сопротивления от температуры испытания практически совпадает с температурным интервалом плавления полипропилена. На рис. 1 показано, как температура образцов влияет на изменение электрического сопротивления, исследованного ПП композита.

Эффект отключающего «барьерного» сопротив-

¹ ГОСТ 6613-86. Межгосударственный стандарт. Сетки проволочные тканевые с квадратными ячейками. Технические условия. М.: Стандартинформ, 2006 [GOST 6613-86. Square meshed woven wire cloths. Specifications. Moscow: Standartinform, 2006.]

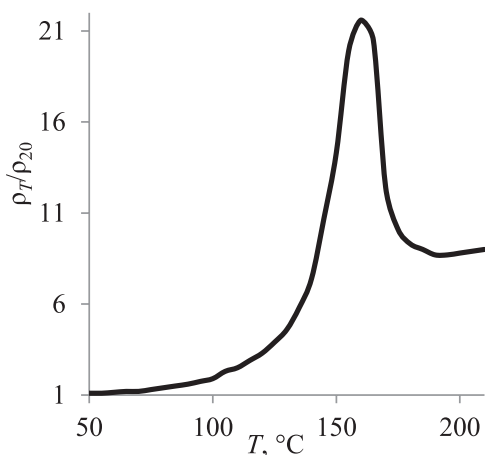


Рис. 1. Зависимость относительного электрического объемного сопротивления (ρ_T/ρ_{20}) полипропиленовых образцов от температуры.

Fig. 1. Dependence of the relative electric volume resistance (ρ_T/ρ_{20}) of the polypropylene samples on temperature.

ления (положительного температурного коэффициента) сохраняется и у деформированных образцов.

На рис. 2 приведены кинетические зависимости изменения электрического сопротивления образцов при различных температурах.

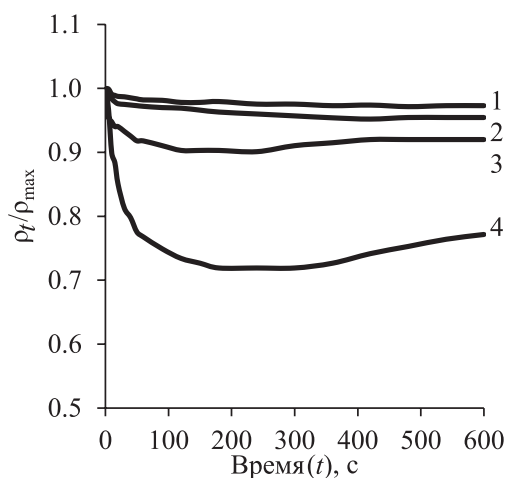


Рис. 2. Изменение относительного (ρ_t/ρ_{\max}) удельного объемного электрического сопротивления во время, и после изгиба ($f=0.11$) при различных температурах, °С: 1 – 90, 2 – 125, 3 – 140, 4 – 155.

Fig. 2. Change in the relative (ρ_t/ρ_{\max}) specific volume electric resistivity during and after bending ($f=0.11$) at various temperatures: (1) 90 °С, (2) 125 °С, (3) 140 °С, (4) 155 °С.

Полученные временные зависимости изменения удельного электрического сопротивления подобны хорошо изученным зависимостям релаксации механического напряжения [19]. На рис. 2 видно, что при деформировании образца наблюдается скачок

его электрического сопротивления от значения электрического сопротивления ρ_T (сопротивление недеформированного образца при температуре испытания) до максимального значения ρ_{\max} , соответствующего заданной деформации (ρ_0 при времени термообработки $t=0$). Далее, при неизменном значении деформации изгиба, удельное электрическое сопротивление при всех температурах экспоненциально снижалось в течение 4–5 мин. На рис. 2 времена релаксации ограничены 10 мин при больших временах и температурах от 140 °С и выше, приближающихся к температурам плавления полипропиленовой матрицы, сопротивление начинало расти (кривые 3 и 4).

Оказалось, что величина максимального сопротивления при одинаковой относительной деформации в момент деформирования, как и в [20], мало зависит от температуры до 140 °С, так как в вынужденно-высокоэластическом состоянии полимера влияние деформирования при низких температурах на структуру деформированного полипропилена мало зависит от этих температур. Заметное увеличение наблюдается лишь при температурах, близких к температуре плавления полипропилена. Этот эффект аналогичен эффекту увеличения электрического сопротивления недеформированных образцов при температурах начала плавления полимера на рис. 1 и, вероятно, имеет ту же природу [20]. Как было предположено в [20], релаксационное снижение электрического сопротивления при более высоких температурах связано с восстановлением токопроводящих каналов, образованных частицами технического углерода, причем, чем выше температура образца, тем больше это снижение электрического сопротивления [20]. Термообработка деформированного полипропиленового композита в изометрических условиях тоже приводит к восстановлению системы токопроводящих каналов [20]. Как и ранее, можно говорить об аналогии этого релаксационного явления с явлением снижения высоты «барьерного» пика электрического сопротивления при нагревании недеформированных образцов при высоких температурах на рис. 1. При деформировании при более высоких температурах, близких к температуре плавления полипропилена, указанное выше разрушение токопроводящих каналов, образованных частицами технического углерода, проходит более интенсивно. Это может быть связано с перекристаллизацией полипропиленовой матрицы композита [17].

Для изучения механизма релаксации электрического сопротивления, также как в случае релаксации механического напряжения, можно использовать такое понятие, как среднее время релаксации. Для расчета времен релаксации мы использовали уравнение (1) [9]:

$$\ln \frac{\rho_t - \rho_{\min}}{\rho_{\max} - \rho_{\min}} = \frac{t}{\tau} \quad (1)$$

где ρ_t , ρ_{\max} и ρ_{\min} – текущее в момент времени t , максимальное в начале процесса релаксации и минимальное (равновесное) значения удельных объемных электрических сопротивлений (Ом·м) соответственно, τ – среднее время релаксации (с). Используя эти соотношения, можно рассчитать средние времена релаксации электрического сопротивления при исследованных температурах². Полученные времена релаксации позволили рассчитать энергии активации электрической релаксации, по аналогии с энергией активации механической релаксации [19]:

$$\ln \tau = \ln \tau_0 + \frac{U_{\text{эл}}}{RT}, \quad (2)$$

где τ – усредненное время релаксации (с) при температуре T (К), τ_0 – постоянная с размерностью времени (с), R – универсальная газовая постоянная, равная 8.31 Дж/(моль·К), $U_{\text{эл}}$ – коэффициент, независимый от температуры (Дж/моль). Величина U зависит от среднего размера кинетической единицы (молекулы или части молекулы), которая участвует в тепловом движении (релаксационном процессе), как и в случае полиэтиленовых композитов [18]. Известно [19], что энергия активации вязкого течения $U_{\text{вт}}$ (движения сегментов при сдвиге расплава) для полипропилена и полиэтилена составляют 45–50 кДж/моль и 30–35 кДж/моль соответственно. Времена релаксации τ в широком температурном интервале линейно зависят от обратной температуры ($1/T$, К) на рис. 3.

Расчетные значения «электрических» энергий активации исследованных процессов U составляют: $U_{\text{ПП}} = 30\text{--}32$ кДж/моль и $U_{\text{ПЭ}} = 15\text{--}16$ кДж/моль. Отметим, что у полипропилена величина «механической» энергии активации U уменьшается с $U_{\text{вт}} \sim 45$ кДж/моль в вязко-текучем состоянии до $U_{\text{вз}} \sim 32$ кДж/моль при температурах ниже температур начала плавления полипропилена при его переходе в вынужденно-высокоэластическое состояние [19]. У линейного полиэтилена высокой плотности соответствующее снижение происходит с $U_{\text{вт}} \sim 30$ кДж/моль до $U_{\text{вз}} \sim 17$ кДж/моль [18, 19]. В нашем случае температурный коэффициент

² Марков В.А. Электропроводящие полимерные композиты с повышенным положительным температурным коэффициентом электрического сопротивления для саморегулирующихся нагревателей: дис. канд. техн. наук. М.: МИТХТ им. М.В. Ломоносова; 2014. 120 с. [Markov V.A. Electrically conductive polymer composites with an increased positive temperature coefficient of electrical resistance for self-regulating heaters. Cand. Thesis. Moscow: M.V. Lomonosov MITHT; 2014. 120 p. (in Russ.).]

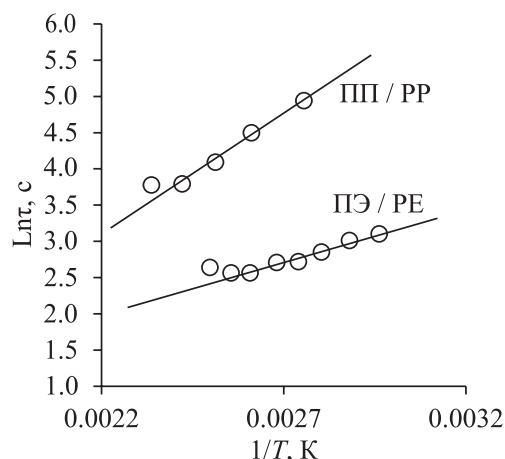


Рис. 3. Зависимость времени релаксации электрического сопротивления полиэтилена (ПЭ) [20] и полипропилена (ПП) от температуры испытания.

Fig. 3. Dependence of the relaxation time of the electrical resistance of polyethylene (PE) [20] and polypropylene (PP) on the test temperature.

$U_{\text{эл}}$ для электрической релаксации полипропилена и, как было показано нами ранее, для полиэтилена высокой плотности [20], в твердом состоянии практически совпадает с указанными выше величинами. Полученные нами результаты указывает на прямую связь электрической релаксации с механической релаксацией, обусловленной сегментальной подвижностью полимеров.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследование показало, что при механическом деформировании электропроводящих полипропиленовых композитов с техническим углеродом, в том числе при повышенных температурах, характер релаксации электрического сопротивления аналогичен характеру релаксации механического напряжения. Величины времен и энергий активации электрической релаксации деформированных полипропиленовых композитов сопоставимы с аналогичными показателями для механической релаксации, что указывает на общую природу указанных процессов.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке государственной субсидии (базовая часть) № 496332017/54 от 01.02.2017 г.

Acknowledgments

This work was supported by the state subsidy (basic part) No. 496332017/54 dated 01.02.2017.

Вклад авторов

А.В. Марков – разработка концепции исследования, постановка эксперимента, обсуждение и анализ результатов, написание текста статьи;

К.С. Тарасова – изучение свойств образцов, обработка и анализ полученных данных, обсуждение результатов экспериментов;

В.А. Марков – изучение свойств образцов, сбор и обработка данных, обсуждение результатов эксперимента, оформление статьи.

Authors' contribution

А.В. Марков – design of the research concept, development of the experiment, discussion and analysis of the results, writing the text of the article;

К.С. Тарасова – studying the properties of samples, processing and analysis of the data obtained, discussion of the results;

V.A. Markov – studying the properties of samples, data collection and processing, discussion of the results, formatting the text of the article.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

- Zhang W., Dehghani-Sanij A.A., Blackburn R.S. Carbon based conductive polymer composites. *J. Mater. Sci.* 2007;42(10):3408–3418. <https://doi.org/10.1007/s10853-007-1688-5>
- Carmona F., Canet R., Delhaes P. Piezoresistivity of heterogeneous solids. *J. Appl. Phys.* 1987;61(7):2550–2558. <https://doi.org/10.1063/1.337932>
- Flandin L., Cavaillé J., Brechet Y., Dendievel R. Characterization of the damage in nanocomposite materials by a.c. electrical properties: experiment and simulation. *J. Mater. Sci.* 1999;34:1753–1759. <https://doi.org/10.1023/A:1004546806226>
- De Focatiis D.S.A., Hull D., Sánchez-Valencia A. Roles of prestrain and hysteresis on piezoresistance in conductive elastomers for strain sensor applications. *Plastics, Rubber and Composites.* 2012;41(7):301–309. <https://doi.org/10.1179/1743289812Y.0000000022>
- Chodák I., Podhradská S., Jarcusková J., Jurciová J. Changes in Electrical Conductivity During Mechanical Deformation of Carbon Black Filled Elastomeric Matrix. *Open Macromol. J.* 2010;4:32–36.
- Krüchel J., Starý Z., Schubert D.W. Oscillations of the electrical resistance induced by shear deformation in molten carbon black composites. *Polymer.* 2013;54(3):1106–1113. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2012.12.051>
- Vigueras-Santiago E., Hernández-López S., Camacho-López M.A., Lara-Sanjuan O. Electric anisotropy in high density polyethylene + carbon black composites induced by mechanical deformation. *J. Phys.: Conf. Ser.* 2009;167(1):012039. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/167/1/012039>
- Chen Y., Song Y., Zhou J., Zheng Q. Effect of uniaxial pressure on conduction behavior of carbon black filled poly(methyl vinyl siloxane) composites. *Chin. Sci. Bull.* 2005;50(2):101–107. <https://doi.org/10.1007/BF02897510>
- Aneli J.N., Zaikov G.E., Mukbaniani O.V. Electric Conductivity of Polymer Composites at Mechanical Relaxation. *Chem. Chem. Technol.* 2011;5(2):187–190. <https://doi.org/10.23939/chcht05.02.187>
- Knite M., Teteris V., Kiploka A. Polyisoprene-carbon black nanocomposites as tensile strain and pressure sensor materials. *Sensors and Actuators A: Physical.* 2004;110(1–3):142–149. Part of special issue: Selected Papers from: *The 16th European Conference on Solid-State Transducers.* Prague: 2002; 116–119. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2003.08.006>
- Starý Z., Krüchel J., Schubert D., Münstedt H. Behavior of Conductive Particle Networks in Polymer Melts under Deformation. *AIP Conf. Proc.* 2011;1375(1):232–239. <https://doi.org/10.1063/1.3604483>
- Hatami K., Grady B.P., Ulmer M.C. Sensor-Enabled Geosynthetics: Use of Conducting Carbon Networks as Geosynthetic Sensors. *J. Geotech. Geoenv. Eng.* 2009;135(7):863–874. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000062](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000062)
- Марков В.А., Кандырин Л.Б., Марков А.В. Сорочкина Е.А. Влияние силанольного сшивания на электрические характеристики и теплостойкость полиэтиленовых композитов с техническим углеродом. *Пластические массы.* 2013;(10):21–24.
[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-filled polyethylene composites. *Plasticheskie massy.* 2013;(10):21–24 (in Russ.).]
- Markov V.A., Markov A.V., Poldushov M.A., Abysov E.Y. 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>
- Rogers N., Khan F. Characterization of deformation induced changes to conductivity in an electrically triggered shape memory polymer. *Polym. Test.* 2013;32(1):71–77. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2012.10.001>
- Wang P., Ding T. Conductivity and piezoresistivity of conductive carbon black filled polymer composite. *J. App. Polym. Sci.* 2010;116(4):2035–2039. <https://doi.org/10.1002/app.31693>

17. Марков В.А., Кандырин Л.Б., Марков А.В. Влияние технологических добавок на электрические характеристики ПЭ композитов с техническим углеродом. *Вестник МИТХТ*. 2013;8(6):103–107.

[Markov V.A., Kandyrin L.B., Markov A.V. The influence of technological additives on electrical properties of carbon black-filled polyethylene composites. *Fine Chemical Technologies*. 2013;8(6):103–107 (in Russ.).]

18. Марков В.А., Кандырин Л.Б., Марков А.В. Влияние деформирования на электрическое сопротивление композиционных материалов на основе ПЭ с техническим углеродом. *Конструкции из композиционных материалов*. 2013;4(132):40–44.

[Markov V.A., Kandyrin L.B., Markov A.V. Effect of strain on electrical resistivity of carbon black filled polyethylene composites. *Konstruktsii iz kompozitsionnykh materialov = Composite materials constructions*. 2013;4(132):40–44 (in Russ.).]

19. Гуль В.Е., Кулезнев В.Н. *Структура и механические свойства полимеров*. М.: Издательство «Лабиринт». 1994. 367 с.

[Gul' V.E., Kuleznev V.N. *Struktura i mekhanicheskie svoystva polimerov (The structure and mechanical properties of polymers)*. Moscow: Labirint; 1994. 367 p. (in Russ.).]

20. Markov V.A., Markov A.V., Tahseen A.Saki. Effect of relaxation processes during deformation on electrical resistivity of polyethylene composites filled with carbon black. *J. Polym. Res.* 2016;23(9):191. <https://doi.org/10.1007/s10965-016-1088-0>

Об авторах:

Марков Анатолий Викторович, д.т.н., профессор кафедры химии и технологии переработки пластмасс и полимерных композитов Института тонких химических технологий им. М.В. Ломоносова, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119571, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 86). E-mail: markovan@bk.ru. <https://orcid.org/0000-0001-7952-7419>

Тарасова Кристина Сергеевна, магистр кафедры химии и технологии переработки пластмасс и полимерных композитов Института тонких химических технологий им. М.В. Ломоносова, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119571, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 86). E-mail: shkarypa-kristina1992@ya.ru.

Марков Василий Анатольевич, аспирант кафедры химии и технологии переработки пластмасс и полимерных композитов, Института тонких химических технологий им. М.В. Ломоносова, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119571, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 86). E-mail: vasily@markov.biz. <https://orcid.org/0000-0002-5768-9107>

About the authors:

Anatoly V. Markov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department of Chemistry and Technology of Plastic Processing and Polymer Composites, M.V. Lomonosov Institute of Fine Chemical Technologies, MIREA – Russian Technological University (86, Vernadskogo pr., Moscow 119571, Russia). E-mail: markovan@bk.ru. <https://orcid.org/0000-0001-7952-7419>

Kristina S. Tarasova, Master, Department of Chemistry and Technology of Plastic Processing and Polymer Composites, M.V. Lomonosov Institute of Fine Chemical Technologies, MIREA – Russian Technological University (86, Vernadskogo pr., Moscow, 119571, Russia). E-mail: shkarypa-kristina1992@ya.ru.

Vasily A. Markov, Postgraduate Student, Department of Chemistry and Technology of Plastic Processing and Polymer Composites, M.V. Lomonosov Institute of Fine Chemical Technologies, MIREA – Russian Technological University (86, Vernadskogo pr., Moscow, 119571, Russia). E-mail: vasily@markov.biz. <https://orcid.org/0000-0002-5768-9107>

*Поступила: 06.05.2020; получена после доработки: 28.12.2020; принята к опубликованию: 02.08.2021.
The article was submitted: May 06, 2020; approved after reviewed: December 28, 2020; accepted for publication: August 02, 2021.*