

УДК 620.9:538.9

## ПОЛИМЕРЫ С УГЛЕРОДНЫМИ НАПОЛНИТЕЛЯМИ ДЛЯ МОЩНЫХ РЕЗИСТОРОВ

Минакова Наталья Николаевна<sup>1</sup>,  
minakova@asu.ru

Ушаков Василий Яковлевич<sup>2</sup>,  
vyush@tpu.ru

<sup>1</sup> Алтайский государственный университет,  
Россия, 656049, Барнаул, пр. Ленина, 61.

<sup>2</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

*Широкое использование резисторов в электроэнергетике, электротехнике, мощной импульсной энергетике (Pulsed Power) делает актуальным отработку рецептуры и технологии производства резистивных материалов и изделий на их основе, которые отвечали бы высоким требованиям не только по эксплуатационным характеристикам, но и по минимизации материало- и энергоёмкости, технологичности и, в итоге, по максимально возможному снижению стоимости.*

**Цель работы:** дальнейшее совершенствование развиваемого авторами метода подбора рецептуры резистивного полимерного композиционного материала, учитывающей, с одной стороны, воздействие различных эксплуатационных факторов, а с другой – не удорожающей исходные материалы и технологию производства из них готовых изделий. Используемые для этих целей на протяжении многих десятилетий высокоомные металлы и композиционные материалы на керамической основе изготавливаются из дорогих материалов по сложной технологии. Два–три десятилетия назад внимание ученых и технологов привлекли полимерные материалы с электропроводящими наполнителями. Опыт показал, что по совокупности свойств электротехнические изделия из таких материалов пригодны для применения как резисторы, антистатические, экранирующие и заземляющие устройства, обогреватели и др. Их широкомасштабное производство и применение сдерживаются сложностью подбора компонентов композиционного материала, обеспечивающего требуемые потребительские свойства.

**Методы исследования:** текстурный и фрактальный анализ с использованием специально разработанных фрактальных пакетов; непосредственное измерение объемного сопротивления – важнейшего параметра для большинства изделий; электронная микроскопия; рентгеноструктурный и термический анализы; регрессионный и корреляционный анализы.

**Результаты.** Предложено использовать текстурную картину изображения макроструктуры с последующим сопоставлением материалов с известными и неизвестными свойствами. Апробация предложенного метода на реальных композитных материалах показала достаточно высокую достоверность получаемых с его помощью результатов.

### Ключевые слова:

Материалоемкость, энергоёмкость, текстурный анализ, фрактальный анализ, геометрические параметры структуры, наполненные полимеры, электропроводность, эксплуатационные факторы.

### Введение

Многолетний опыт показал перспективность применения полимерных композиционных материалов, в частности каучуков с углеродными наполнителями, как резистивных, антистатических, самонагревающихся, экранирующих материалов [1, 2]. Они в достаточной мере удовлетворяют таким требованиям, как высокие потребительские качества, технологичность (низкая энерго- и ресурсоёмкость), относительная дешевизна всех компонентов материала.

Очень важно, что каучуки общего назначения в качестве полимерной основы в резистивных композиционных материалах отличаются дешевизной, доступностью исходных компонентов, стойкостью к внешним средам, в том числе агрессивным.

Технология изготовления наполненных техническим углеродом резистивных эластомерных композитов включает стандартные для шинной и резинотехнической промышленности этапы: смешение, профилирование изделия, вулканизацию. Резистивные свойства регулируются рабочей корректировкой рецептур (в первую очередь, удельное

содержание и свойства наполнителя) и параметров технологического процесса. Эластичность позволяет перерабатывать материал в изделия практически любой, в том числе сложной формы, что минимизирует отходы при изготовлении изделий. Возможность подгонки геометрических параметров изделия под требования потребителя с помощью механической обработки упрощает крепеж в конструкции и уменьшает затраты времени при монтаже.

Значительно ограничивает масштабы использования резистивных эластомерных композиционных материалов сложность обеспечения требуемой величины удельного объемного электрического сопротивления с минимальными отклонениями от номинальной величины.

Электропроводящая структура формируется смешением исходных ингредиентов. Ее свойства определяются количественным и качественным составом композита. Стохастичность многокомпонентных систем и многоуровневая перестройка границ раздела в технологическом процессе не позволяют создать теоретически обоснованную расчетную модель, которая позволяла бы рассчиты-

вать электрофизические характеристики создаваемого материала по характеристикам ингредиентов и технологического процесса [3, 4]. Параметры, используемые в расчетных формулах, сложно определить экспериментально. Применяемые модели пространственно-ориентированных структур полимеров позволяют понять механизмы электропроводности, но не позволяют учесть физико-химические процессы, интенсивность которых зависит от эксплуатационных факторов [5]. До настоящего времени фактически единственным методом остается эмпирический подбор материала методом проб и ошибок. Он требует значительных временных, людских, приборных и других ресурсов, в первую очередь, на выполнение экспериментов, моделирующих эксплуатационные воздействия при длительных режимах работы электротехнических изделий.

Контроль величины и стабильности электропроводности наполненных полимеров в процессе эксплуатации требует разработки специального инструментария [6]. Приближение к решению обозначенных выше проблем отражено в статье.

#### Объекты и методы исследования

Объектами исследования выбраны наполненные техническим углеродом каучуки, обеспечивающие, как показано в [7–12], высокие эксплуатационные характеристики при правильном подборе материалов. Основная часть экспериментов проводилась на резисторах – образцах диаметром 0,03 м, высотой 0,05 м. Величина удельного объемного электрического сопротивления ( $\rho_v$ ) определялась при изменении концентрации технического углерода от 30 весовых частей до 80 (на 100 весовых частей каучука).

Применялся технический углерод, получаемый при термоокислительном разложении жидкого углеводородного сырья, следующих марок: П-514 – печной, среднеактивный, со средним показателем дисперсности и средним показателем структурности; П-234 – печной, активный, с высоким показателем дисперсности и средним показателем структурности; П-366Э – печной, электропроводящий с высоким значением дисперсности и структурности. Поверхность технического углерода модифицировалась различными способами (таблица).

В качестве матрицы использовался бутилкаучук БК-2055, бутадиен-метилстирольный каучук СКМС-30АРК, нитрильный каучук СКН-40. Бутадиенметилстирольный каучук выбран как аморфный, бутилкаучук – как высококристаллический, нитрильный – как стойкий к воздействию трансформаторного масла.

Применены следующие методы исследования: текстурный и фрактальный анализ с использованием специально разработанных фрактальных пакетов; измерение величины объемного сопротивления с помощью цифрового мультиметра; электронная микроскопия; рентгеноструктурный и

термический анализ; регрессионный и корреляционный анализы [7–10].

**Таблица.** Способы модификации поверхности дисперсного наполнителя

**Table.** Methods of modifying the spatter filler surface

Способы обработки поверхности технического углерода Methods of treating the carbon black surface	Обозначение на рис. 2 Designations in Fig. 2
Окисление при 400 °С Oxidation at 400 °C	1
Нанесение полициклических ароматических углеводородов (ПАУ)+ термообработка в инертной среде Deposition of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) + Heat treatment in inert atmosphere	2
Без модификации Without modification	3
Обработка ацетоном Treatment with acetone	4
Нанесение полиэтиленгликольадипinata Deposition of polyethylene glycol adipinate	5

Термический анализ проводился на дериватографе SYSTEM PAULIK-EPDEY (MOM BUDAPEST) Q-1000. Скорость линейного повышения температуры составляла 10 град/мин. Испытания проводились на воздухе. Навеска равнялась 50 мг.

По рентгеновским дифрактограммам, снятым при температуре 20 °С (дифрактометр с Ni-монохроматором, использовалось CuK-альфа излучение), определялась степень кристалличности ( $S_k$ ), значение которой рассчитывалось на основе метода Германа–Вейдингера (в интервале брегговских углов  $2\theta=2-40^\circ$ ). За величину  $S_k$  принимали частное от деления пика рентгенограммы на ширину базиса [7, 12].

Была выдвинута следующая гипотеза. Оценку электропроводности наполненного полимера, в том числе и при эксплуатационных воздействиях, можно выполнить сопоставлением фрактальных параметров изображений макроструктуры анализируемого материала и материала с известными свойствами. Эффективность использования фрактального параметра подтверждена в [11] при оценке электропроводности наполненного полимера с модификацией поверхности технического углерода, которая сформирована в процессе технологического цикла.

Поставленная цель потребовала решения следующих задач:

- апробировать структурный параметр, рассчитанный по изображению макроструктуры (предложен в [11]), для традиционных способов регулирования электропроводности наполненных полимеров – маркой полимера, концентрацией и маркой электропроводящего наполнителя;
- проверить пригодность параметра при основных эксплуатационных воздействиях на материал;

- выявить значимый геометрический параметр, реагирующий на физико-химические процессы, формирующие величину удельного объемного электрического сопротивления, а также и его устойчивость к основным эксплуатационным воздействиям.

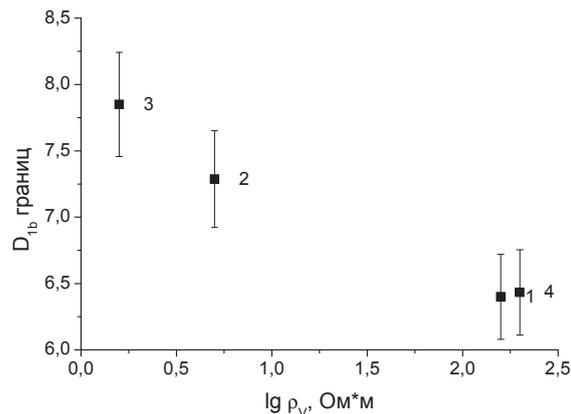
На изображениях в градациях серого с помощью текстурного признака, отражающего автокорреляцию гистограммы совместного распределения яркости второго порядка и характеризующего взаимосвязь двух соседних точек изображения, выделялись границы «наполнитель–полимер» для учета границ небольших градаций серого. Количественное описание определенных таким образом контуров межфазных границ выполнялось с помощью фрактальных размерностей Реньи [11, 12].

В [11] показано, что при постоянном шаге покрывающей квадратной сетки  $\varepsilon$  для разных материалов значение числителя дроби монотонно изменяется в соответствии с величиной объемного электрического сопротивления. Графики зависимости  $p; \ln p$ , от  $\ln \varepsilon$  очень хорошо аппроксимируются линейной зависимостью. При этом коэффициент угла наклона прямой – информационная размерность  $D_1$ . Значение вертикального смещения прямой является усредненной по всему изображению энтропией фрактального множества. Значение вертикального смещения прямой на этой зависимости обозначено нами как  $D_{1b}$ .

Измерения параметров изображений макроструктуры и обработка полученных результатов автоматизированы [11]. Максимальный размер изображения, который может быть обработан, определяется производительностью компьютера. Возможна пакетная обработка графических файлов в градациях серого цвета (256 цветов, 8 бит). Предусмотрена предварительная обработка изображений (фильтрация, корректировка яркости и контрастности). Возможен выбор элементов структуры, параметры которых требуется измерить (агрегаты наполнителя, полимерная матрица, контуры межфазных границ). Применялся метод сетки. Накладываемые масштабы выбирались автоматически с помощью специально разработанной программы ЭВМ [10]. Диапазон ограничивался размером пикселя и размером изображения. Вычислялись канонические мультифрактальные спектры. Учтено, что существуют структуры, для которых можно вычислить только псевдоспектры, позволяющие характеризовать локальные области (при малых значениях шкал разбиения) [13].

#### Результаты исследования

Установлена корреляционная связь между величиной  $\rho_v$  и параметром  $D_{1b}$ . Наблюдается следующая закономерность – при увеличении  $\rho_v$  параметр  $D_{1b}$  уменьшается. На рис. 1 в качестве примера представлена взаимосвязь между указанными параметрами для материалов, отличающихся видом каучука и электропроводящего наполнителя.



**Рис. 1.** Зависимость удельного объемного электрического сопротивления материалов  $\rho_v$  от параметра  $D_{1b}$ . 1 – бутилкаучук БК-2055, технический углерод П-514; 2 – БК-2055, П-234; 3 – БК-2055, П-366Э; 4 – нитрильный каучук СКН-40, П-234. Концентрация технического углерода – 80 весовых частей

**Fig. 1.** Dependence of specific volume electrical resistance of materials  $\rho_v$  on the parameter  $D_{1b}$ . 1 is the butyl rubber BK-2055, technical carbon P-514; 2 is the BK-2055, P-234; 3 is the BK-2055, P-366E; 4 is the nitrile rubber SKN-40, P-234. The concentration of carbon black is 80 parts by weight

Проанализирована электропроводность при эксплуатационных воздействиях наполненных полимеров, отличающихся концентрацией наполнителя, видом полимера и электропроводящего наполнителя. Дополнительно изучены материалы на основе бутилкаучука БК-2055, наполненные техническим углеродом марки П-234 с модифицированной поверхностью: окисление при 400 °С; нанесение полициклических ароматических углеводородов (ПАУ) + термообработка в инертной среде; обработка ацетоном; нанесение полиэтиленгликолядипината [10]. Концентрация наполнителя составляла 80 весовых частей на 100 весовых частей полимера.

При сопоставлении экспериментальных данных по стабильности свойств с результатами численных экспериментов по измерению параметров изображений структуры было обращено внимание на то, что параметры  $f_{40}$  и  $D_{1b}$ , вычисленные для областей межфазных границ, реагируют на электропроводность при эксплуатационных воздействиях. Параметр  $D_{1b}$ , согласно выполненным в [11] исследованиям, характеризует разветвленность структуры наполнителя в полимере,  $f_{40}$  – однородность распределения фрактального множества в пространстве [13].

Зависимость значений параметров  $D_{1b}$  и  $f_{40}$  агрегатов частиц, контура межфазных границ при изменении  $\rho_v$  в процессе набухания представлена на рис. 2.

Анализ изменения параметров по результатам сравнения микрофотографий неизученного и изученного материалов, рассчитанных для контура межфазных границ, позволил установить, что у материала с техническим углеродом разветвленной структуры (при возрастании  $D_{1b}$ ) имеет место

увеличение стабильности электропроводности. Можно полагать, что для технического углерода разветвленной структуры по сравнению с низкоструктурным наполнителем характерно увеличенное количество зацеплений между частицами и усиленное взаимодействие между ними. Согласно модели диффузионно-ограниченной агрегации дисперсного наполнителя, при интенсификации взаимодействия между частицами формируются разветвленные агрегаты [14, 15]. Образуется прочный каркас, который противостоит конформационным превращениям в полимере при воздействии дестабилизирующих факторов. Параметр спектра фрактальной размерности ( $f_{40}$ ), который, согласно исследованиям [8], чувствителен к распределению электропроводящего наполнителя в полимере, меньше реагирует на увеличение разветвленности структуры. При изучении набухания в длительном режиме испытаний (1 год) было выявлено нарушение монотонной связи между  $f_{40}$  и  $D_{1b}$ . Можно полагать, что при длительной эксплуатации электротехнического изделия в формировании изменений структуры подключаются процессы, которые требуют дополнительного анализа и описания. Параметр  $D_{1b}$  изменяется монотонно – при уменьшении стабильности электропроводности материалов  $D_{1b}$  уменьшается.

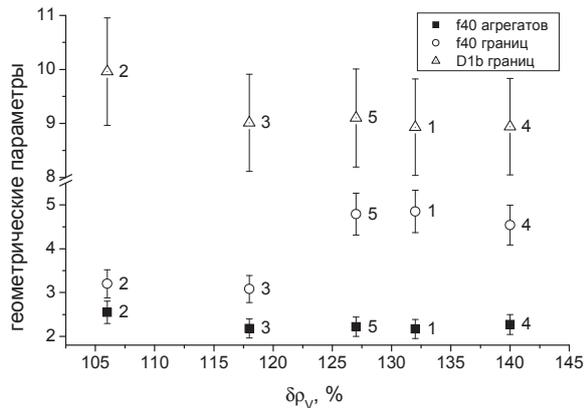


Рис. 2. Зависимость стабильности материалов (таблица) от значения геометрических параметров. Время набухания 8760 часов

Fig. 2. Dependence of stability of the materials (Table) on the value of geometric parameters. Swelling time is 8760 hours

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что параметр  $D_{1b}$  корректно реагирует на изменение сопротивления при всех исследованных эксплуатационных воздействиях. Известно, что дестабилизирующему воздействию главным образом подвергается связующее [16, 17]. Поэтому параметр  $D_{1b}$  сопоставлялся для материалов, отличающихся только видом каучука. Полученные результаты представлены на рис. 3.

Многочисленными экспериментами, выполненными различными исследователями, подтверждено, что кристаллические каучуки более стойки к основным эксплуатационным факторам (напри-

мер, к повышенной температуре), чем аморфные [18–21]. Эта известная закономерность подтверждена и при использовании анализируемого параметра  $D_{1b}$ .

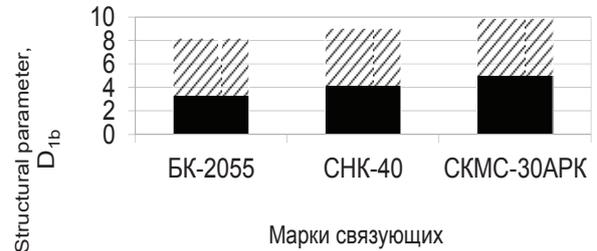


Рис. 3. Структурный параметр  $D_{1b}$  для полимерных наполнителей разных марок

Fig. 3. Structural parameter  $D_{1b}$  for polymeric fillers of different grades

В качестве структурных параметров, по изменению которых можно судить о характере межфазных взаимодействий и стойкости к эксплуатационным воздействиям, были выбраны максимальная скорость окисления  $v$  и степень кристалличности (Ск) [12, 18]. Использованы указанные выше модификации поверхности технического углерода, увеличивающие и уменьшающие стабильность электропроводности к эксплуатационным воздействиям по сравнению с наполненным полимером, содержащим немодифицированный технический углерод. Выполнен регрессионный анализ между указанными структурными параметрами и геометрическим параметром  $D_{1b}$ . Оказалось, что большую значимость имеет степень кристалличности. Корреляционный анализ подтвердил влияние степени кристалличности материалов, физико-химические процессы которых изменялись за счет использования технического углерода с модификаций поверхности (рис. 4).

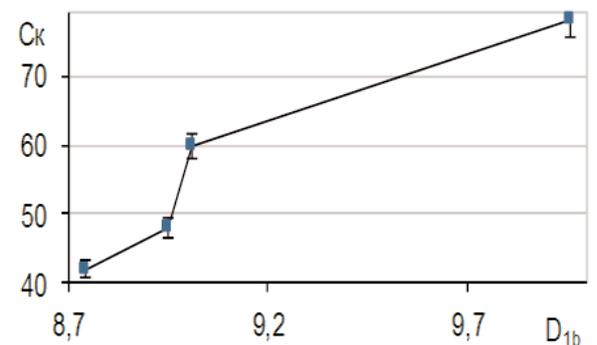


Рис. 4. Зависимость степени кристалличности от структурного параметра  $D_{1b}$

Fig. 4. Dependence of crystallinity degree on the structural parameter  $D_{1b}$

Анализ результатов выполненных исследований позволяет предположительно судить о характере межфазных процессов в наполненных полимерах. Модификация, включающая термообработку в инертной среде, формирует плотную структу-

ру. Это замедляет релаксационные процессы в полимере. Усиливается агломерирование технического углерода. Регулярно упакованные молекулы мало подвержены внешним (эксплуатационным) воздействиям. При уплотнении межфазного слоя возрастает стойкость к деформации, температуре, агрессивной среде. При таких структурных изменениях параметр  $D_{1b}$  увеличивается. Модификация ацетоном разрывает структуру в объеме, размывая межфазные слои. Происходят процессы деагломерации наполнителя. Под действием тепловых флуктуаций ускоряется процесс разрыва связей, что снижает стабильность электропроводности при эксплуатационных воздействиях. Сравнение параметров  $D_{1b}$  при такой модификации с аналогичными параметрами для немодифицированного технического углерода показывает, что  $D_{1b}$  уменьшается.

#### Заключение

Выполненные исследования показали, что есть возможность «конструировать» резистивные на-

полненные полимерные материалы для конкретной области применения по электропроводности с учетом ее допустимого изменения при эксплуатационных воздействиях с помощью определения фрактальных параметров текстурной картины изображений макроструктуры. При сравнении микрофотографий материала, совокупность электрофизических характеристик которого экспериментально определена, и материала, характеристики которого еще неизвестны, по параметру  $D_{1b}$  можно оценить величину и стабильность удельного объемного электрического сопротивления при воздействии основных эксплуатационных факторов. Показано, что используемый геометрический параметр способен отражать результат физико-химических процессов в выбранных объектах исследования. Корректность оценки экспериментально подтверждена для наполненных полимеров при различных способах регулирования электропроводности: маркой полимера, концентрацией и маркой электропроводящего наполнителя, модификацией поверхности наполнителя.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Polymer/carbon based composites as electromagnetic interference (EMI) shielding materials / J. Thomassina, C. Jérômea, T. Pardonb, C. Baillyb, I. Huynenb, C. Detrembleura // *Materials Science and Engineering: R: Reports*. – July 2013. – V. 74. – Iss. 7. – P. 211–232.
2. Гуль В.Е., Шенфилд Л.З. Электропроводящие полимерные композиты. – М.: Химия, 1984. – 226 с.
3. Anaraki N.I., Poursalehi R. Shielding Effectiveness of Polymeric Nanocomposites Filled with Iron/Wüstite Nanoparticles // *Procedia Materials Science*. – 2015. – V. 11. – P. 700–705.
4. Conductive polymer composites with segregated structures / H. Pang, L. Xu, D. Yan, Z. Li // *Progress in Polymer Science*. – November 2014. – V. 39. – Iss. 11. – P. 1908–1933.
5. Minakova N.N., Ushakov V.Ya. Stochastic and deterministic modeling of spatially oriented structures in dispersion-filled polymers // *Polymer Science – Series A*. – 2000. – V. 40 (9). – P. 1025–1029.
6. Abramenko E.A., Minakova N.N., Ushakov V.Ya. Investigation of the properties of polyethylene with nanodimensional fillers by special processing of macrostructure images // *Russian Physics Journal*. – 2008. – V. 51 (7). – P. 701–705.
7. Уэндландт У. Термические методы анализа. – М.: Мир, 1978. – 526 с.
8. Bortnikov A.Yu., Minakova N. Structure analysis of electrically conductive polymers filled with agglomerated components // *Russian Physics Journal*. – 2006. – V. 49 (11). – P. 1165–1170.
9. Кроновер Р.М. Фракталы и хаос в динамических системах. Основы теории. – М.: Постмаркет, 2000. – 352 с.
10. Божокин С.В., Паршин Д.А. Фракталы и мультифракталы. – Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001. – 128 с.
11. Crystallization and higher-order structure of multicomponent polymeric systems / H. Takeshita et al. // *Polymer*. – 2013. – № 18 (54). – P. 4776–4789.
12. Bortnikov A.Yu., Minakova N.N., Abramenko E.A., Structural parameter for assessing the control of the properties of carbon-black-filled polymers // *International Polymer Science and Technology*. – 2011. – V. 38 (6). – P. 55–59.
13. Федер Е. Фракталы. – М.: Мир, 1991. – 254 с.
14. DeCost B.L., Holm E.A. A computer vision approach for automated analysis and classification of microstructural image data // *Computational Materials Science*. – December 2015. – V. 110. – P. 126–133.
15. Janke W. Computer Simulation Studies of Polymer Adsorption and Aggregation – from Flexible to Stiff // *Physics Procedia*. – 2015. – V. (68). – P. 69–79.
16. Липатов Ю.С. Физико-химические основы наполнения полимеров. – М.: Химия, 1977. – 260 с.
17. Аскадский А.А., Хохлов А.Р. Введение в физико-химию полимеров: монография. – М.: Научный мир, 2009. – 384 с.
18. Gamlitskii Yu.A., Bass Yu.P. On the description of the phenomenon of filled elastomer strengthening // *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. – 2003. – V. 76. – № 3. – P. 591–596.
19. Yihu Song, Qiang Zheng. A Guide for Hydrodynamic Reinforcement Effect in Nanoparticle-filled Polymers // *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*. – 2016. – V. 41. – P. 318–346.
20. Бухина М.Ф. Кристаллизация каучуков и резин. – М.: Химия, 1973. – 240 с.
21. Принципы создания композиционных полимерных материалов: монография / А.А. Берлин, С.А. Вольфсон, В.Г. Опшмян, Н.С. Ениколопов. – М.: Химия, 1990. – 238 с.

Поступила 05.12.2017 г.

#### Информация об авторах

**Минакова Н.Н.**, доктор физико-математических наук, профессор кафедры прикладной физики, электроники и информационной безопасности Алтайского государственного университета.

**Ушаков В.Я.**, доктор технических наук, заслуженный деятель науки и техники РФ, профессор Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 620.9:538.9

## POLYMERS WITH CARBON FILLERS FOR POWERFUL RESISTORS

Natalia N. Minakova<sup>1</sup>,

minakova@asu.ru

Vasily Ya. Ushakov<sup>2</sup>,

vyush@tpu.ru

<sup>1</sup> Altai State University,  
61, Lenin Avenue, Barnaul, 656049, Russia.<sup>2</sup> National Research Tomsk Polytechnic University,  
30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia.

Wide use of resistors in electric power industry, electrical engineering, powerful-pulsed power engineering (Pulsed Power) makes the development of the recipe and technology for producing resistive materials and products based on them very relevant. These products would meet high requirements not only for performance characteristics, but also for minimizing material and energy consumption, processibility and, as a result, the maximum possible reduction in value.

**The main aim** of the study is further improvement of the method developed by the authors for selecting resistive polymeric composite material. This method takes into account, on the one hand, the effect of various operating factors on the material, and, on the other hand, it does not increase the cost of raw materials and technique of manufacturing finished products from them. High-resistance metals and composite materials on a ceramic base, used for these purposes for many decades, are made from expensive materials using sophisticated technology. Some decades ago, the polymeric materials with electrically conductive fillers attracted the attention of scientists and technologists. Experience has shown that for a combination of properties, electrical products made of such materials are suitable for use as resistors, antistatic, shielding, and grounding devices, heaters, etc. Their large-scale production and use are restrained by the complexity of selecting components of the composite material that provides the required consumer properties.

**The methods:** textural and fractal analysis using specially designed fractal packets; direct measurement of bulk resistance – the most important parameter for most products; electron microscopy; X-ray diffraction and thermal analyzes; regression and correlation analyzes.

**The results.** The authors proposed the use of macrostructure textural pattern with subsequent comparison of materials with the known and unknown properties. Approbation of the proposed method on real composite materials showed rather high reliability of the results obtained with its help.

**Key words:**

Material consumption, energy intensity, texture analysis, fractal analysis, geometric parameters of structure, filled polymers, electrical conductivity, and operational factors.

## REFERENCES

1. Thomassina J.M., Jérômea C., Pardoeb T., Baillyb C., Huyenb I., Detrembleura C. Polymer/carbon based composites as electromagnetic interference (EMI) shielding materials. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, July 2013, vol. 74, Iss. 7, pp. 211–232.
2. Gul V.E., Shenfil L.Z. *Electroprovodyashchie polimernye kompozity* [Electrically Conducting Polymer Compositions]. Moscow, Khimiya Publ., 1984. 226 p.
3. Anaraki N.I., Poursalehi R. Shielding Effectiveness of Polymeric Nanocomposites Filled with Iron/Wüstite Nanoparticles. *Procedia Materials Science*, 2015, vol. 11, pp. 700–705.
4. Pang H., Xu L., Yan D., Li Z. Conductive polymer composites with segregated structures. *Progress in Polymer Science*, November 2014, vol. 39, Iss. 11, pp. 1908–1933.
5. Minakova N.N., Ushakov V.Ya. Stochastic and deterministic modeling of spatially oriented structures in dispersion-filled polymers. *Polymer Science – Series A*, 2000, vol. 40 (9), pp. 1025–1029.
6. Abramenko E.A., Minakova N.N., Ushakov V.Ya. Investigation of the properties of polyethylene with nanodimensional fillers by special processing of macrostructure images. *Russian Physics Journal*, 2008, vol. 51 (7), pp. 701–705.
7. Uendlandt U. *Thermal Methods of Analysis*. New York, John Wiley & Sons Inc., 1974. 524 p.
8. Bortnikov A.Yu., Minakova N. Structure analysis of electrically conductive polymers filled with agglomerated components. *Russian Physics Journal*, 2006, vol. 49 (11), pp. 1165–1170.
9. Kronover P.M. *Fraktaly i khaos v dinamicheskikh sistemakh. Osnovy teorii* [Fractals and chaos in dynamic systems. Fundamentals of the theory]. Moscow, Postmarket Publ., 2000. 352 p.
10. Bozhokin S.V., Parshin D.A. *Fraktaly i multifraktaly* [Fractals and multifractals]. Izhevsk, Regular and chaotic dynamics Publ., 2001. 128 p.
11. Takeshita H. Crystallization and higher-order structure of multi-component polymeric systems. *Polymer*, 2013, vol. 18 (54), pp. 4776–4789.
12. Bortnikov A.Yu., Minakova N.N., Abramenko E.A. Structural parameter for assessing the control of the properties of carbon-black-filled polymers. *International Polymer Science and Technology*, 2011, vol. 38 (6), pp. 55–59.
13. Feder E. *Fractals*. New York, Plenum Press, 1988. 283 p.
14. DeCost B.L., Holm E.A. A computer vision approach for automated analysis and classification of microstructural image data. *Computational Materials Science*, December 2015, vol. 110, pp. 126–133.
15. Janke W. Computer Simulation Studies of Polymer Adsorption and Aggregation – from Flexible to Stiff. *Physics Procedia*, 2015, vol. 68, pp. 69–79.
16. Lipatov Yu.S. *Fiziko-khemieskie osnovy napolneniya polimerov* [Physicochemical basis of polymer filling]. Moscow, Khimiya Publ., 1977. 260 p.
17. Askadsky A.A., Khokhlov A.R. *Vvedenie v fiziko-khimiya polimerov: monografiya* [Introduction to the physicochemistry of polymers: monograph]. Moscow, Nauchny mir Publ., 2009. 384 p.
18. Gamlitskii Yu.A., Bass Yu.P. On the description of the phenomenon of filled elastomer strengthening. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2003, vol. 76, no. 3, pp. 591–596.

19. Yihu Song, Qiang Zheng. A Guide for Hydrodynamic Reinforcement Effect in Nanoparticle-filled Polymers. *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, 2016, vol. 41, pp. 318–346.
20. Bukhina M.F. *Kristallizatsiya kauchuka i rezin* [Crystallization of Caoutchouc and Rubbers]. Moscow, Khimiya Publ., 1973. 198 p.
21. Berlin A.A., Volfson S.A., Oshmyan V.G., Enikolopov N.S. *Printsipy sozdaniya kompozitsionnykh polimernykh materialov: monografiya* [Principles of creating composite polymer materials: monography]. Moscow, Khimiya Publ., 1990. 238 p.

*Received: 5 December 2017.*

#### **Information about the authors**

**Natalia N. Minakova**, Dr. Sc., professor, Altai State University.

**Vasily Ya. Ushakov**, Dr. Sc., Honored Worker of Science of the Russian Federation, professor, National Research Tomsk Polytechnic University.