



Научная статья
2.6.17 – Материаловедение (технические науки)
УДК 544.022.5:67.03

doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2024.03.033

 EDN: CZOHYD

ЗАВИСИМОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ОТ ПАРАМЕТРОВ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ И ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕХНИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА

Олег Витальевич Кропотин¹, Евгений Анатольевич Рогачев²,
Екатерина Андреевна Дроздова³, Анастасия Александровна Каленчук⁴,
Евгений Григорьевич Глуховеря⁵

^{1, 2, 4, 5} Омский государственный технический университет, Омск, Россия

¹ kropotin@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6620-9945>

² evg.rogachev@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2622-7492>

⁴ sia.k98@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6221-2135>

⁵ jon31_1992@yahoo.com, <https://orcid.org/0009-0001-5864-7419>

³ ООО «ОМСКТЕХУГЛЕРОД», Омск, Россия

³ Ea_ntk@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8099-5148>

Аннотация. Электропроводные полимерные композиционные материалы (ПКМ) с углеродными наполнителями получили широкое распространение в качестве материалов электротехнического и радиотехнического назначения. Важнейшей целевой характеристикой таких материалов является их электропроводность, которая зависит от комплекса факторов. Наиболее значимым фактором, определяющим электропроводность полимерного композиционного материала, является электропроводность наполнителя, которая во многом зависит от его структуры. Одним из наиболее распространенных наполнителей, применяемых при создании электропроводных ПКМ, является технический углерод. В работе проведен сравнительный анализ удельного электрического сопротивления и параметров, характеризующих структуру, для различных марок электропроводного технического углерода производства «Омск Карбон Групп». Проведено комплексное исследование технического углерода: проведен рентгеноструктурный анализ и электронная микроскопия, измерены удельное электрическое сопротивление, показатель абсорбции масла, площадь поверхности по многоточечной адсорбции азота, внешняя площадь поверхности по азоту. Рассчитаны следующие структурные параметры: доля площади поверхности пор ТУ диаметром менее 2 нм, коэффициент шероховатости поверхности ТУ, доля краевых углеродных атомов графеновых слоев ТУ. Установлена корреляционная связь изменений удельного электрического сопротивления ТУ и его физико-химических характеристик: показатель абсорбции масла (ДБФ), площадь поверхности по многоточечной адсорбции азота (NSA), внешняя площадь поверхности по азоту (STSA), средний размер кристаллитов вдоль графеновых слоев. Показано, что зависимость удельного электрического сопротивления от структурных параметров удовлетворительно описывается линейными регрессионными уравнениями. Полученные результаты могут быть использованы для выбора электропроводного технического углерода при создании композиционных материалов электротехнического и радиотехнического назначения.

Ключевые слова: электропроводный технический углерод, рентгеноструктурный анализ технического углерода, кристаллическая структура технического углерода, средний размер кристаллитов технического углерода, физико-химические характеристики технического углерода, структурность технического углерода, удельная поверхность технического углерода, удельное электрическое сопротивление технического углерода.

Благодарности: Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект № FSGF-2024-0003.

Для цитирования: Зависимость электрического сопротивления от параметров кристаллической структуры и физико-химических характеристик технического углерода / О. В. Кропотин [и др.]. // Ползуновский вестник. 2024. № 3. С. 228 – 233. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2024.03.033, EDN: <https://elibrary.ru/CZOHYD>.

DEPENDENCE OF ELECTRICAL RESISTANCE ON PARAMETERS OF THE CRYSTAL STRUCTURE AND PHYSICO-CHEMICAL CHARACTERISTICS OF CARBON BLACK

Oleg V. Kropotin ¹, Evgenii A. Rogachev ², Ekaterina A. Drozdova ³,
Anastasiia A. Kalenchuk ⁴, Evgeny G. Glukhoverya ⁵

^{1, 2, 4, 5} Omsk State Technical University, Omsk, Russia

¹ kropotin@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6620-9945>

² evg.rogachev@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2622-7492>

⁴ sia.k98@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6221-2135>

⁵ jon31_1992@yahoo.com, <https://orcid.org/0009-0001-5864-7419>

³ Omsk Carbon Group, Omsk, Russia

³ Ea_ntk@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8099-5148>

Abstract. Electrically conductive polymer composite materials (PCM) with carbon fillers have become widely used as materials for electrical and radio engineering purposes. The most important target characteristic of such materials is their electrical conductivity, which depends on the complex of factors. The most significant factor determining the electrical conductivity of a polymer composite material is the electrical conductivity of the filler, which largely depends on its structure. One of the most common fillers used in the creation of electrically conductive PCMs is carbon black. The paper presents a comparative analysis of the electrical resistivity and parameters characterizing the structure for various grades of conductive carbon black produced by Omsk Carbon Group. A comprehensive study of carbon black was carried out: X-ray diffraction analysis and electron microscopy were carried out, electrical resistivity, oil absorption index, surface area for multipoint nitrogen adsorption, external surface area for nitrogen were measured. The following structural parameters were calculated: the fraction of the surface area of CB pores with a diameter of less than 2 nm, the coefficient of surface roughness of CB, the fraction of the marginal carbon atoms of CB graphene layers. A correlation has been established between changes in the electrical resistivity of CB and its physico-chemical characteristics: the oil absorption index (DBP), the surface area for multipoint nitrogen adsorption (NSA), the external surface area for nitrogen (STSA), the average size of crystallites along graphene layers. It is shown that the dependence of the electrical resistivity on the structural parameters is satisfactorily described by linear regression equations. The obtained results can be used to select electrically conductive carbon black when creating composite materials for electrical and radio engineering purposes.

Keywords: electrically conductive carbon black, X-ray structural analysis of carbon black, crystal structure of carbon black, average size of carbon black crystallites, physico-chemical characteristics of carbon black, carbon black structurality, specific surface area of carbon black, specific electrical resistance of carbon black.

Acknowledgments: The study was financially supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation, Project No. FSGF-2024-0003.

For citation: Kropotin, O.V., Rogachev, E.A., Drozdova, E.A., Kalenchuk, A.A. & Glukhoverya, E.G. (2024). Dependence of electrical resistance on the parameters of the crystal structure and physico-chemical characteristics of carbon black. *Polzunovskiy vestnik*. (3), 228-233. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2024.03.033. EDN: <https://elibrary.ru/CZOHYD>.

ВВЕДЕНИЕ

Технический углерод (ТУ) широко применяется в качестве электропроводного наполнителя при создании композиционных материалов (композитов), в том числе электротехнического и радиотехнического назначения. [1 - 6]. Рациональный выбор марки ТУ при проектировании композита осуществляется с учетом физико-химических свойств и структуры наполнителя, которые определяют эксплуатационные характеристики композита и, прежде всего, его электропроводность. В качестве значимых характеристик ТУ, которые определяют его собственную электропроводность и электрофизические свойства ком-

позита, обычно рассматривают степень структурированности (структурность) ТУ, размеры и степень упорядоченности кристаллитов; свойства поверхности ТУ [1, 2, 7 - 11]. Указанные параметры, в свою очередь, определяются условиями получения и хранения ТУ. Выявление и комплексный анализ взаимосвязи электропроводности ТУ и его структурных параметров имеют важное значение при разработке электропроводных полимерных композитов и создании новых высокоэффективных марок ТУ.

Целью данного исследования является установление взаимосвязи между удельным электрическим сопротивлением и структурными параметрами электропроводных марок ТУ производства «Омск Карбон Групп».

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В работе исследовались электропроводные марки ТУ серии OMCARB производства «Омск Карбон Групп»: С140, СН85, СН600 и экспериментальная марка (условное обозначение СНХ), находящаяся в стадии разработки. Исследуемые марки ТУ характеризуются различными значениями общей площади поверхности по многоточечной адсорбции азота, поэтому их сравнение позволит выявить наиболее значимые структурные факторы, определяющие электропроводность ТУ.

Удельное сопротивление ТУ измеряли в соответствии с ТУ 38 11574-86.

Растровую электронную микроскопию проводили с применением микроскопа JCM-5700.

Рентгеноструктурный анализ проводили с использованием дифрактометра Shimadzu Maxima – X XRD-7000 (CuK α излучение с длиной волны 0,154 нм). Межплоскостное расстояние d_{002} определяли по формуле Вульфа-Брэгга. Средние размеры областей когерентного рассеяния (ОКР), которые интерпретируются как средние размеры кристаллитов в направлении, перпендикулярном графеновым слоям (L_c), и вдоль графеновых слоев (L_a), определяли по формулам [12]:

$$L_c = \frac{0.89\lambda}{(\beta \cdot \cos \theta)},$$

$$L_a = \frac{1.84\lambda}{(\beta \cdot \cos \theta)},$$

где λ - длина волны излучения; β – уширение дифракционного максимума, рассчитанного как ширина пика на полувысоте, с поправкой на аппаратное уширение (в качестве эталона использо-

вали кремний); θ - брэгговский угол. Для определения L_c использовали рефлекс 002, при расчете L_a – рефлекс 10/ [9].

Степень кристалличности X ТУ рассчитывали, как отношение индекса кристалличности исследуемого образца к индексу кристалличности эталона (кремний) [13]:

$$X = \frac{CI}{CI_e} \times 100\%,$$

где CI – индекс кристалличности ТУ, CI_e – индекс кристалличности кремния, использованного в качестве эталона.

Индекс кристалличности CI рассчитывали как отношение интеграла модуля производной интенсивности по углу 2θ к интегралу интенсивности по углу 2θ [13]:

$$CI = \frac{\int_{2\theta=a}^b | \frac{dI}{d2\theta} | d2\theta}{\int_{2\theta=a}^b I d2\theta},$$

где $a...b$ – диапазон сканирования по углу 2θ , I – интенсивность.

На дифрактограммах всех марок ТУ присутствуют рефлекс 002 с максимумом $2\theta \approx 24,8^\circ$ и рефлекс 10/ с максимумом $2\theta \approx 43,8^\circ$. Рефлексы с максимумами 2θ , равными примерно $37,8^\circ$; $44,1^\circ$; $64,4^\circ$, соответствуют оксидам ванадия [14], присутствие которых в ТУ обусловлено особенностями технологического процесса. Рефлексы оксидов ванадия на дифрактограммах перед проведением анализа удалялись, профиль восстанавливали кубическим сплайном. В качестве примера на рисунке 1 приведены исходная дифрактограмма ТУ С140 и дифрактограмма после удаления пиков оксида ванадия.

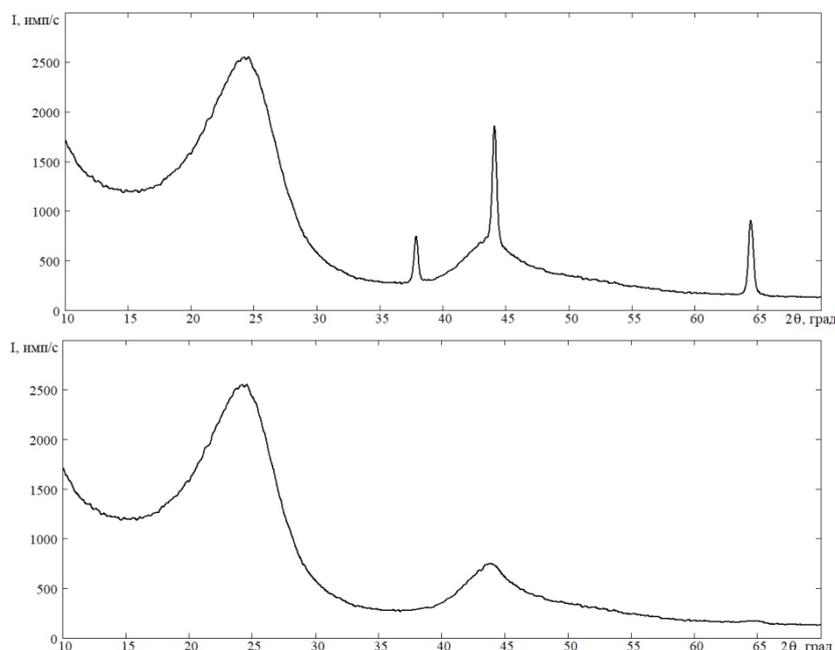


Рисунок 1 – Дифрактограммы ТУ С140: исходная (а); после удаления пиков оксидов ванадия (б)

Figure 1 – Diffractograms of carbon black C 140: initial (a); after removal of vanadium oxide peaks (b)

ЗАВИСИМОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ОТ ПАРАМЕТРОВ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ И ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕХНИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА

Абсорбцию масла (ДБФ) определяли в соответствии с ASTM D 2414, площадь поверхности по многоточечной адсорбции азота (NSA) и внешнюю площадь поверхности по азоту (STSA) определяли в соответствии с ASTM D 6556.

Долю площади поверхности пор ТУ диаметром менее 2 нм (пористость) вычисляли по формуле [5]:

$$D = 100 \cdot \frac{NSA - STSA}{NSA}.$$

Коэффициент шероховатости поверхности ТУ вычисляли по формуле [8]:

$$K_{ш} = \frac{NSA}{STSA}.$$

Долю краевых углеродных атомов графеновых слоев ТУ вычисляли по формуле [8]:

$$D = 29,602 \cdot (L_a)^{-0,809}.$$

Линейный регрессионный анализ проводили с использованием пакета Mathcad.

Таблица 2 – Параметры, характеризующие поверхность ТУ

Table 2 – Parameters characterizing the surface of carbon black

| ТУ | ДБФ, см ³ /100 г | NSA, м ² /г | STSA, м ² /г | Д, % | K _ш | D, % |
|-------|-----------------------------|------------------------|-------------------------|------|----------------|------|
| CH85 | 141 | 71 | 66 | 6 | 1,1 | 10,0 |
| C140 | 135 | 307 | 137 | 55 | 2,2 | 9,4 |
| CH600 | 188 | 598 | 360 | 40 | 1,7 | 8,8 |
| CHX | 253 | 1006 | 647 | 36 | 1,5 | 8,0 |

В качестве параметров, определяющих высокую удельную электропроводность технического углерода, обычно выделяют высокие значения структурности (ДБФ) и удельной поверхности технического углерода (NSA).

Данные о влиянии пористости ТУ на электропроводность технического углерода и полимерных композитов, в которых он используется в качестве наполнителя, носят противоречивый характер [2, 5]. Так, в работе [2] пористость указывается как один из основных факторов, определяющих электропроводность ТУ, однако, направленность такого влияния, а также влияние размеров пор на электропроводность детально не рассматриваются. Можно согласиться с заключением авторов работы [5] о том, что поры размером порядка 1,3 – 2 нм приводят к нарушению непрерывности углеродных слоев, что снижает электропроводность ТУ. Поры большего размера участвуют в формировании разветвленной структуры частиц ТУ и обеспечивают увеличение числа контактов между частицами, что повышает электропроводность технического углерода [5]. Доля краевых углеродных атомов косвенно связана со средним размером кристаллитов в направлении L_a. Для определения этого и других параметров кристаллической структуры, которые влияют на электропроводность ТУ, проводили рентгеноструктурный анализ, результаты которого представлены в таблице 3 [15].

Электрическая проводимость кристаллита

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В таблице 1 представлены результаты измерения удельного электрического сопротивления ρ исследованных марок ТУ [15].

Таблица 1 – Удельное электрическое сопротивление ТУ

Table 1 – Electrical resistivity of carbon black

| ТУ | CH85 | C140 | CH600 | CHX |
|---------|--------|--------|--------|--------|
| ρ, Ом·м | 0,0029 | 0,0032 | 0,0015 | 0,0008 |

Как следует из данных, приведенных в таблице 1, близкие значения удельного сопротивления имеют марки CH85 и C140, для CH600 зафиксировано двукратное, а для CHX четырехкратное снижение значений ρ. Для установления взаимосвязи удельного сопротивления ТУ с его физико-химическими характеристиками, определяли параметры, значения которых представлены в таблице 2.

ТУ вдоль графеновых слоев и в перпендикулярном направлении существенно отличается [1, 2].

Таблица 3 – Результаты рентгеноструктурного анализа ТУ

Table 3 – Results of X-ray structural analysis of carbon black

| ТУ | d ₀₀₂ , нм | X, % | L _c , нм | L _a , нм |
|-------|-----------------------|------|---------------------|---------------------|
| CH85 | 0,363 | 1,5 | 1,4 | 3,8 |
| C140 | 0,363 | 1,4 | 1,3 | 4,1 |
| CH600 | 0,359 | 1,5 | 1,4 | 4,5 |
| CHX | 0,360 | 1,4 | 1,6 | 5,0 |

Обычно, в качестве полуколичественной оценки этого отличия приводят данные о том, что в графите удельное сопротивление в направлении перпендикулярном к графеновым слоям примерно в 250 раз выше, чем в направлении вдоль графеновых слоев [1]. Следует ожидать, что в ТУ эта разница будет больше, так как в отличие от графита в кристаллите ТУ графеновые плоскости произвольно смещены по отношению к нормали. Вклад проводимости в направлении, перпендикулярном графеновым слоям, в общую проводимость кристаллита ТУ будет зависеть от межплоскостного расстояния, которое лежит в диапазоне 0,345 – 0,365 нм [1] и от размера кристаллита в направлении, перпендикулярном графеновым слоям. Вклад проводимости вдоль графеновых слоев в общую проводимость кристаллита ТУ будет зависеть от соответствующего размера кри-

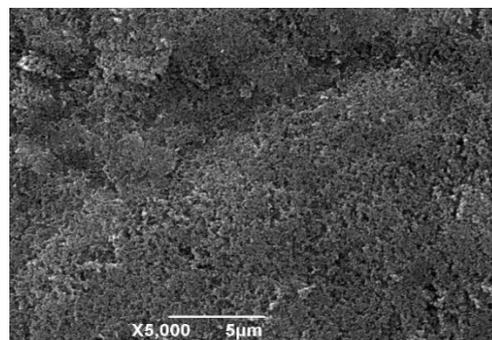
сталлита. Очевидно, что массовая доля кристаллических областей в ТУ (степень кристалличности) также влияет на электропроводность материала: чем выше степень кристалличности, тем больше упорядоченных областей участвуют в формировании электропроводности ТУ.

Исходя из вышеизложенного, можно сделать вывод, что измеренные и рассчитанные параметры кристаллической структуры и физико-химические характеристики ТУ, приведенные в таблицах 1 – 2, оказывают конкурирующее влияние на электропроводность материала. С одной стороны, повышению электропроводности способствуют уменьшение доли площади поверхности пор ТУ диаметром менее 2 нм, доли краевых углеродных атомов, межплоскостного расстояния. С другой стороны, повышению электропроводности способствуют повышение значения показателей ДБФ, NSA и STSA, коэффициента шероховатости, степени кристалличности, размеров кристаллитов.

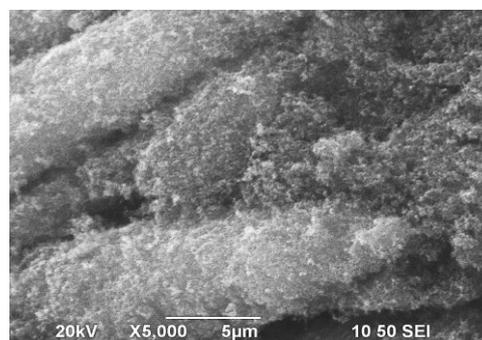
Как следует из результатов сопоставления данных, приведенных в таблицах 1 - 3, среди измеренных и рассчитанных параметров кристаллической структуры и физико-химических характеристик в исследованной группе марок ТУ закономерность в изменении удельного сопротивления качественно соответствует закономерностям в изменении следующих параметров: ДБФ, NSA, STSA, D. Значения параметров d_{002} и X одинаковы в пределах погрешности. Это свидетельствует о том, что различия в значениях удельного сопротивления не связаны с данными параметрами. Значения параметра L_c для исследованных марок отличаются незначительно, отличия значений L_a более существенные. Характер изменения значений показателя D для марок C140, CH600 и CHX качественно соответствует характеру изменения их удельного сопротивления. Влияние низкого значения этого показателя для марки CH85 на удельное сопротивление ТУ, вероятно, подавляется конкурирующим влиянием других факторов. Влияние параметра $K_{ш}$ на величину удельного сопротивления ТУ является неоднозначным – явная закономерность в совместном изменении $K_{ш}$ и ρ не обнаружена. В то же время, следует отметить, что различия в значениях коэффициента шероховатости для исследованных марок ТУ согласуются с различиями в оценке состояния поверхности на микроскопическом уровне, которые визуальнo наблюдаются на микрофотографиях, полученных с помощью электронного микроскопа. Для сравнения на рисунке 2 приведены микрофотографии поверхности марок ТУ с наименьшим значением показателя $K_{ш}$ (CH85) и наибольшим значением этого показателя (C140). Как следует из сравнения этих микрофотографий, поверхность C140 визуальнo более рыхлая, что косвенно может быть связано с повышенной шероховатостью поверхности на микроуровне.

Для количественной оценки связи отдельных структурных параметров, использованных в

работе, и удельного сопротивления для исследованной группы марок ТУ провели регрессионный анализ. В работе [5] подобный анализ проведен для параметра NSA, авторы использовали полиномиальную регрессию, коэффициент корреляции составил 0,87.



а)



б)

Рисунок 2 – Микрофотографии ТУ CH85 (а) и C140 (б), увеличение $\times 5000$ крат

Figure 2 – Micrographs of carbon black CH85 (a) and C 140 (b), magnification $\times 5000$ times

Результаты линейного регрессионного анализа «удельное электрическое сопротивление ρ (зависимая переменная) – структурный параметр x (независимая переменная)» представлены в таблице 4. В качестве примера на рисунке 3 приведена зависимость удельного электрического сопротивления ТУ от показателя ДБФ (наибольший коэффициент корреляции) для исследованной группы марок технического углерода.

Как следует из данных, приведенных в таблице 4, наиболее значимыми независимыми переменными ($R \geq 0,92$), определяющими удельное электрическое сопротивление исследованной группы марок ТУ, являются показатель абсорбции масла (ДБФ), площадь поверхности по многоточечной адсорбции азота (NSA), внешняя площадь поверхности по азоту (STSA), средний размер кристаллитов вдоль графеновых слоев L_a . Следует отметить, что для исследованной группы марок ТУ использование линейной регрессии для переменных ρ - NSA обеспечивает больший коэффициент корреляции ($R = 0,92$), чем использование полиномиальной регрессии ($R = 0,87$) для группы марок ТУ, исследованной в работе [5].

ПОЛЗУНОВСКИЙ ВЕСТНИК № 3 2024

ЗАВИСИМОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ОТ ПАРАМЕТРОВ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ И ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕХНИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА

Таблица 4 – Результаты регрессионного анализа
Table 4 – Regression analysis results

| Независимая переменная | ДФФ | NSA | STSA | L_c | L_a |
|------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| R | 0,97 | 0,92 | 0,95 | 0,86 | 0,93 |
| k | $-2,0 \cdot 10^{-5}$ | $-2,6 \cdot 10^{-6}$ | $-4,2 \cdot 10^{-6}$ | $-7,8 \cdot 10^{-3}$ | $-2,0 \cdot 10^{-3}$ |

R – коэффициент корреляции

k – коэффициент линейного регрессионного уравнения вида $\rho = x_0 + kx$, Ом·м/(единица измерения независимой переменной).

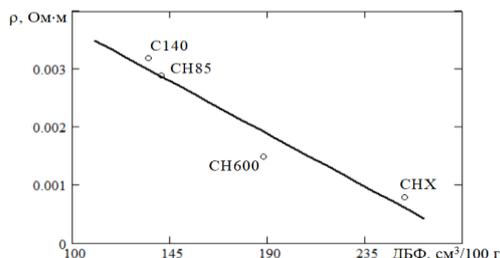


Рисунок 3 – Зависимость удельного электрического сопротивления ТУ от показателя ДБФ

Figure 3 – Dependence of the specific electrical resistance of carbon black on the DBP index

ВЫВОДЫ

Установлена зависимость удельного электрического сопротивления исследованной группы марок ТУ от структурных параметров углерода. Показана корреляция изменений удельного электрического сопротивления ТУ и от таких параметров кристаллической структуры и физико-химических характеристик, как показатель абсорбции масла (ДФФ), площадь поверхности по многоточечной адсорбции азота (NSA), внешняя площадь поверхности по азоту (STSA), средний размер кристаллитов вдоль графеновых слоев (L_a). Полученные результаты могут быть использованы при рациональном выборе марок ТУ в качестве наполнителей при разработке электропроводных полимерных композитов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гуль В.Е., Шенфиль Л.З. Электропроводящие полимерные композиции. Москва: Химия, 1984. 240 с.
2. Donnet J.-B., Carbon Black: Science and Technology, Second Edition 2nd Edition, Kindle Edition, 2017. 482 p.
3. Boosting electrical and piezoresistive properties of polymer nanocomposites via hybrid carbon fillers: A review / K. Ke [et al.]. // Carbon. 2021. Vol. 173. P. 1020-1040. DOI: 10.1016/j.carbon.2020.11.070.
4. Khodabakhshi S., Fulvio P. F., Andreoli E. Carbon black reborn: Structure and chemistry for renewable energy harnessing // Carbon. 2020. Vol. 162. P. 604-649. DOI: 10.1016/j.carbon.2020.02.058.
5. Инновационный дисперсный углерод. От идеи до технологии: монография / Г. И. Раздьяконова [и др.]. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2014. 312 с.
6. Шадрин Н. В., Антоев К. П. Электропроводящая резина с эффектом положительного температурного коэффициента сопротивления из шинного регенерата // Перспективные материалы. 2021. № 3. С. 21–29. DOI: 10.30791/1028-978X-2021-3-21-29.
7. Раздьяконова Г. И., Лихолобов В. А., Кохановская О. А. Технологии модификации технического углерода. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2017. 160 с.

8. Раздьяконова Г. И., Кохановская О. А., Лихолобов В. А. Само-разложение пероксида водорода на поверхности дисперсного углерода // Радиотехника. Наносистемы. Информационные технологии. 2015. Т. 7. № 2. С. 180–190. DOI: 10.17725/rensit.2015.07.180.

9. Lee S.-M., Lee, S.-H., Roh, J.-S. Analysis of activation process of carbon black based on structural parameters obtained by XRD analysis // Crystals. 2021. Vol. 11. № 153. DOI: 10.3390/CRYST11020153.

10. Минакова Н. Н. Оценка электрофизических характеристик, наполненных модифицированным техническим углеродом композиционных материалов с помощью метода локальных бинарных шаблонов // Ползуновский вестник. 2023. № 1. С. 230–236. DOI: 10.25712/ASTU.2072-8921.2023.01.029.

11. Fathi A., Hatami K., Grady B. P. Effect of carbon black structure on low-strain conductivity of polypropylene and low-density polyethylene composites // Polymer engineering and science. 2012. Vol. 52. № 3, P. 549–556. DOI: 10.1002/pen.22115.

12. Biscoe J., Warren B. E. An X-Ray Study of Carbon Black // Journal of Applied Physics. 1942. Vol. 13. P. 364–371. DOI: 10.1063/1.1714879.

13. Способ дифрактометрического определения степени кристалличности веществ / Д. Г. Чухчин [и др.]. // Кристаллография. 2016. Т. 61. № 3. С. 375–379. DOI: 10.7868/S0023476116030085.

14. Structure and phase composition of electrically conductive carbon black / O.V. Kropotin [et al.]. // Journal of Physics: Conference Series. 2022. 2182 012076. DOI: 10.1088/1742-6596/2182/1/012076.

15. Влияние параметров кристаллической структуры на удельное сопротивление электропроводного технического углерода / О. В. Кропотин [и др.]. // Материалы VIII Региональной научно-технической конференции «Ученые Омска – региону». Омск: ОмГТУ, 2023. С. 40–43.

Информация об авторах

О. В. Кропотин – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Физика», заведующий кафедрой «Физика» Омского государственного технического университета.

Е. А. Рогачев – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Физика» Омского государственного технического университета.

Е. А. Дроздова – руководитель проектов ООО «ОМСКТЕХУГЛЕРОД».

А. А. Каленчук – ассистент кафедры «Физика» Омского государственного технического университета.

Е. Г. Глуховева – ассистент кафедры «Физика» Омского государственного технического университета.

Information about the authors

O. V. Kropotin – Omsk State Technical University, professor of Physics Department, doctor of technical sciences, associate professor.

E. A. Rogachev – Omsk State Technical University, associate professor of Physics Department, candidate of technical sciences.

E. A. Drozdova – Omsk Carbon Group, project manager.

A. A. Kalenchuk – Omsk State Technical University, assistant of Physics Department.

E. G. Glukhovera – Omsk State Technical University, assistant of Physics Department.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 26 ноября 2023; одобрена после рецензирования 20 сентября 2024; принята к публикации 04 октября 2024.

The article was received by the editorial board on 26 Nov 2023; approved after editing on 20 Sep 2024; accepted for publication on 04 Oct 2024.