

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ
TECHNICAL SCIENCESУДК 661.666:621.315
<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2020-64-4-488-494>Поступило в редакцию 23.03.2020
Received 23.03.2020**Л. Н. Дьячкова***Институт порошковой металлургии имени академика О. В. Романа, Минск, Республика Беларусь***СТРУКТУРА И СВОЙСТВА КОМПОЗИЦИОННЫХ
МЕДНО-ГРАФИТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ***(Представлено академиком П. А. Витязем)*

Аннотация. Представлены результаты исследований влияния содержания, вида и дисперсности графита на структуру, механические и электрофизические свойства композиционного медно-графитового материала. Показано, что в процессе спекания при содержании графита марки ГЛ 1, 5, 7 % усадка составляет 5,7; 2,4 и 0,6 % соответственно, при 20 и 30 % – объемные изменения отсутствуют. В медно-графитовом материале с графитом марки МГ менее 10 % наблюдается рост образцов 1–1,6 %, при большем содержании графита объемных изменений практически не происходит. При содержании графита более 20 %, независимо от его марки и дисперсности, происходит резкое снижение прочности медно-графитового материала вследствие уменьшения площади металлического контакта и перехода структуры материала из каркасно-металлической в матричную. В материале с графитом марки МГ дисперсностью 140 и 65 мкм в процессе деформации происходит множественное образование микротрещин. Удельное электросопротивление медно-графитового материала с содержанием графита марки МГ 10 % составляет $11\text{--}13 \cdot 10^8$ Ом·м, при 30 % – $136\text{--}140 \cdot 10^8$ Ом·м, графита марки ГЛ – 8 и $18 \cdot 10^8$ Ом·м соответственно.

Ключевые слова: композиционный медно-графитовый материал, структура, свойства

Для цитирования: Дьячкова, Л. Н. Структура и свойства композиционных медно-графитовых материалов / Л. Н. Дьячкова // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2020. – Т. 64, № 4. – С. 488–494. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2020-64-4-488-494>

Larisa N. Dyachkova*Powder Metallurgy Institute named after O. V. Roman, Minsk, Republic of Belarus***STRUCTURE AND PROPERTIES OF COMPOSITE POWDER COPPER-BASED MATERIALS***(Communicated by Academician Petr A. Vityaz)*

Abstract. The research results of the influence of graphite content, type and dispersion on the structure, mechanical and physical properties of copper–graphite composite material are presented. It is shown that in the sintering process, when the content of grade GL graphite is 1, 5, 7 %, shrinkage is 5.7; 2.4 and 0.6 %, respectively, with 20 and 30 % – no volumetric changes. In copper–graphite material, when the content of grade MG graphite is less than 10 %, a growth of samples of 1–1.6 % is observed; when the graphite content is higher, the volume practically does not change. With a graphite content of more than 20 %, regardless of its grade and dispersion, the strength of copper–graphite material sharply decreases due to both a reduction of the metal contact area and a transition of the material structure from frame-metal to matrix. In a material with grade MG graphite with the dispersion of 140 and 65 μm , multiple microcracks are formed in the deformation process. When the content of grade MG graphite is 10 %, the electrical resistivity of copper–graphite material is equal to $11\text{--}13 \cdot 10^8$ Ohm·m, when it is 30 %, the electrical resistivity is equal to $136\text{--}140 \cdot 10^8$ Ohm·m; when the content of grade GL graphite – 8 and $18 \cdot 10^8$ Ohm·m, respectively.

Keywords: copper-graphite composite material, structure, properties

For citation: Dyachkova L. N. Structure and properties of composite powder copper-based materials. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2020, vol. 64, no. 4, pp. 488–494 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2020-64-4-488-494>

Введение. Работоспособность электрических машин в значительной степени зависит от качества элементов скользящего контакта, которое определяется свойствами их материалов [1]. Анализ состояния производства щеток для электрических машин показывает, что не удается достичь воспроизводимости свойств щеточных изделий из-за сложности технологии их изготовления [2; 3].

Сложность заключается не только в многообразии типов щеток, а и в специфических свойствах, которыми они должны обладать, чтобы обеспечить нормальную работу электромашин. Щеточная технология осложняется также и тем, что щетка разрабатывается для определенной машины и должна существовать столько же, сколько существует электрическая машина.

История развития щеточной промышленности (создание новых щеточных материалов, разработка новых фасонов, размеров, способов сопряжения и т. п.) тесно связана с прогрессом электромашиностроения. С начала XX в. в мире стали применять металлографитовые или графитовые щетки. Металлографитовые щетки предназначены для работы на электромашине с низким напряжением на коллекторе, углеграфитовые – на электромашине с высоким напряжением на коллекторе. Оба класса характеризуются сравнительно низкой допустимой окружной скоростью скользящего контакта [4; 5]. Для быстроходных машин были разработаны графитные щетки, полученные путем прессования порошка графита с малым количеством связующего, в качестве которого использовали каменноугольную смолу, и последующего отжига [6–8]. Область применения металлографитных щеток почти полностью ограничивается генераторами низкого напряжения. Иногда их применяют для снятия токов большой силы со скользящих колец. В этом случае содержание металла в щетке изменяется в зависимости от окружной скорости и максимальной силы тока на кольце.

В настоящее время в связи с настоятельными требованиями электромашиностроения необходимо резкое улучшение качественных характеристик щеток и разработка новых видов материалов [9]. В связи с этим особую актуальность приобретает необходимость разработки материала и технологии изготовления электрощеток, потребность которых особенно большая в автомобилестроении, в частности, для стартеров. На стартерах многих современных авто щетки составляют одно целое с регулятором. С помощью щеток ток с реле регулятора подается на обмотку. Одной из причин плохой работы стартера может быть износ щеток и их неправильная установка. Чаще всего используются меднографитовые щетки, спрессованные из графита и медного порошка. За счет наличия меди такие щетки обладают меньшим электрическим сопротивлением и более устойчивы к износу. Однако они имеют и несколько недостатков, главные из которых низкая износостойкость щеток и повышенный абразивный эффект, приводящий к повышенному износу коллектора. Однако рабочий цикл стартера обычно непродолжителен (от нескольких десятков секунд до нескольких минут в день), поэтому износ коллектора происходит медленно.

Свойства меднографитовых материалов зависят от вида используемого графита и его количества, а также вводимых добавок [10; 11]. Для повышения износостойкости меднографитовых материалов их модифицируют, так в [12] для модифицирования графитомедных композиционных материалов применяли ниобий, молибден, хром.

Целью работы является исследование влияния вида и количества графита на структуру и свойства меднографитового материала для стартерных щеток легковых машин.

Материалы и методы исследования. При получении меднографитового материала в зависимости от предъявляемых к нему требований используют порошки графита различной формы и дисперсности. Отличительной особенностью меднографитовых материалов является то, что составляющие его имеют существенные различия по физико-механическим свойствам и строению. В работе исследовали меднографитовые материалы с содержанием графита 1; 5; 10; 20; 30 мас. %, что соответствует 4; 17; 30; 50; 63; 80 об. %. Вводили искусственный графит марки МГ, имеющий осколочную форму и неоднородную структуру (рис. 1, *a*), со средним размером частиц 140, 65 и 32 мкм, и натуральный элементный графит марки ГЛ со средним размером частиц 80 мкм, имеющий чешуйчатую форму с толщиной чешуек менее 1 мкм (рис. 1, *b*). Медь использовали в виде порошка марки ПМС-1 дисперсностью 50–60 мкм.

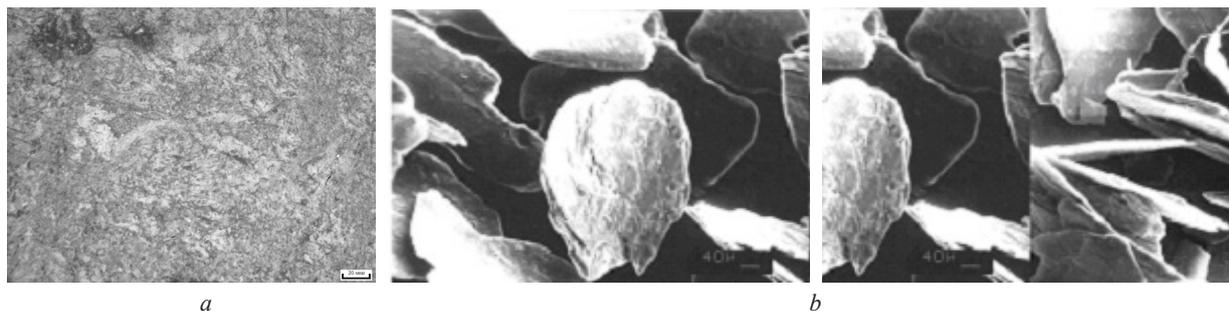


Рис. 1. Структура частиц графита марки МГ (а) и форма частиц графита марки ГЛ (б)

Fig. 1. The particle structure of graphite grade MG (a) and the particle shape of graphite grade GL (b)

Шихту смешивали в четырехбаночном смесителе в течение 3 ч при соотношении шары : шихты 2 : 1 с 10 % пластификатора, в качестве которого использовали раствор каменноугольного пека в бензоле или пульвербакелита с отвердителем и сушили при комнатной температуре. Из полученной пластифицированной шихты прессовали образцы диаметром 10 мм, высотой 12 мм при давлении 300 МПа. Спрессованные образцы спекали 1 ч в атмосфере эндогаза при температуре 900 °С.

Прочность при сжатии определяли на испытательной машине «Инстрон» при скорости нагружения 2 мм/мин – из материала с содержанием графита 5–30 мас. % и 5 мм/мин – из материала с содержанием графита 1 мас. %. Деформацию осуществляли до образования первой трещины, при этом фиксировали максимальное значение нагрузки. Степень деформации определяли по формуле

$$\varepsilon = \frac{h_n - h_k}{h_n} 100, \%$$

Структуру спеченного материала исследовали на шлифах, изготавливаемых по стандартной методике на микроскопе «МЕФ-3», шлифы травили 3 %-ным раствором хлорного железа в спирте.

Электросопротивление материала определяли на образцах размером 2 × 3 × 55 мм на установке, содержащей генератор стабильного тока, позволяющий стабилизировать ток, протекающий через тестируемый образец методом падения напряжения на образце при прохождении тока известной силы. В работе применяли ток, равный 1 А. На одном образце производили не менее 6 измерений электросопротивления. По среднему значению электросопротивления R вычисляли электропроводность материала по формуле

$$\lambda = \frac{L}{S} R, \text{ См/м,}$$

где L – расстояние между контактами в образцедержателе; S – площадь сечения образца.

Удельное электросопротивление рассчитывали по формуле

$$\rho = \frac{1}{\lambda}, \text{ Ом} \cdot \text{м.}$$

Результаты и их обсуждение. Объемные изменения при спекании зависят от содержания и вида графита в материале (рис. 2). Образцы из материала с содержанием графита марки ГЛ 1; 5 и 10 % испытывают усадку 5,7; 2,4 и 0,6 % соответственно, с содержанием графита 20 и 30 % – объемных изменений практически не происходит. При введении графита марки МГ до 10 % наблюдается рост образцов 1–1,6 %, при большем содержании графита объемных изменений не наблюдается, только в образцах с графитом дисперсностью 32 мкм рост образцов составляет 0,3–0,7 %.

Испытания при сжатии образцов из меднографитового материала показали, что повышение содержания графита приводит к резкому снижению прочности материала, практически на порядок (рис. 3). Уменьшение размера частиц графита марки МГ также приводит к снижению проч-

ности материала, что объясняется уменьшением площади металлического контакта. Образцы из материала, содержащего 5 и 10 мас. % графита марки МГ дисперсностью 140 мкм, при сжатии растрескались. Это можно объяснить неравномерным распределением напряжений из-за различий в физико-механических свойствах графита и меди, а также неравномерным распределением графита по объему образца. Кроме того, осколочная форма порошка графита МГ оказывает отрицательное влияние и на прочность материала, поэтому прочность материала с графитом марки ГЛ выше.

Исследование влияние вида и содержания графита на максимальную степень деформации при сжатии показало (рис. 4), что при содержании графита 1 мас. %, независимо от его марки и дисперсности, образцы деформируются, не разрушаясь. Степень деформации составляет более 60 %, благодаря тому, что материал состоит преимущественно из хорошо деформирующейся медной основы, в которой графит располагается в виде отдельных включений (рис. 5, а). При увеличении содержания графита более 10 % предельная степень деформации резко уменьшается. Материалы с содержанием графита марки МГ более 20 %, независимо от его дисперсности, не обладают пластичностью и разрушаются без пластической деформации, с 30 % графита марки ГЛ – испытывают незначительную пластическую деформацию – 0,5–1,2 %.

Отсутствие пластичности объясняется тем, что при содержании графита более 10 мас. % в материале резко уменьшается площадь металлического контакта, структура из каркасной, в которой каркасом является медь, переходит в матричную, в которой преобладает графитовая составляющая (рис. 5, с, d).

Исследование электросопротивления меднографитового материала и его структуры после деформации подтвердило, что содержание графита 10 мас. % является критическим. Так, удельное электросопротивление меднографитового материала с содержанием графита от 1 до 10 %

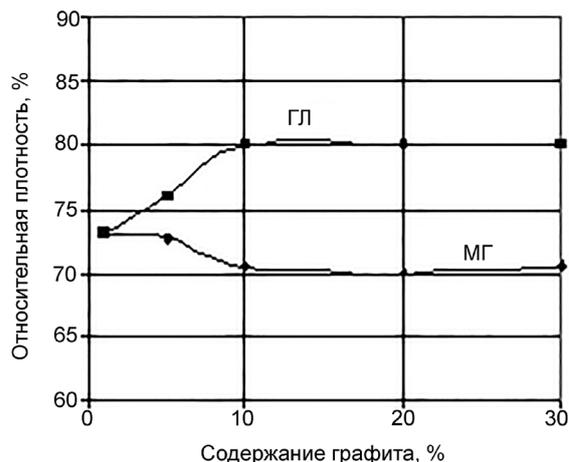


Рис. 2. Влияние содержания и марки графита на плотность меднографитового материала

Fig. 2. The influence of the content and grade of graphite on the density of copper-graphite material

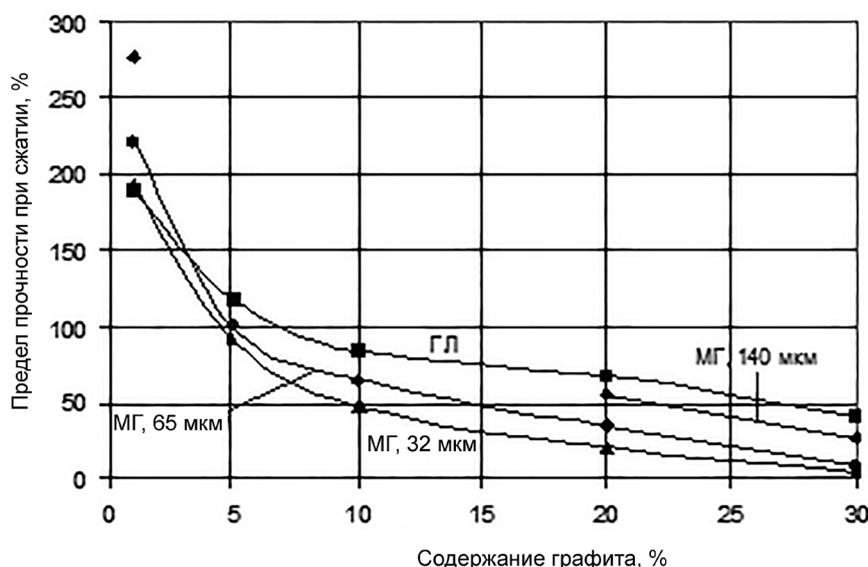


Рис. 3. Влияние содержания и марки графита на предел прочности при сжатии меднографитового материала

Fig. 3. The effect of the content and grade of graphite on the compressive strength of copper-graphite material

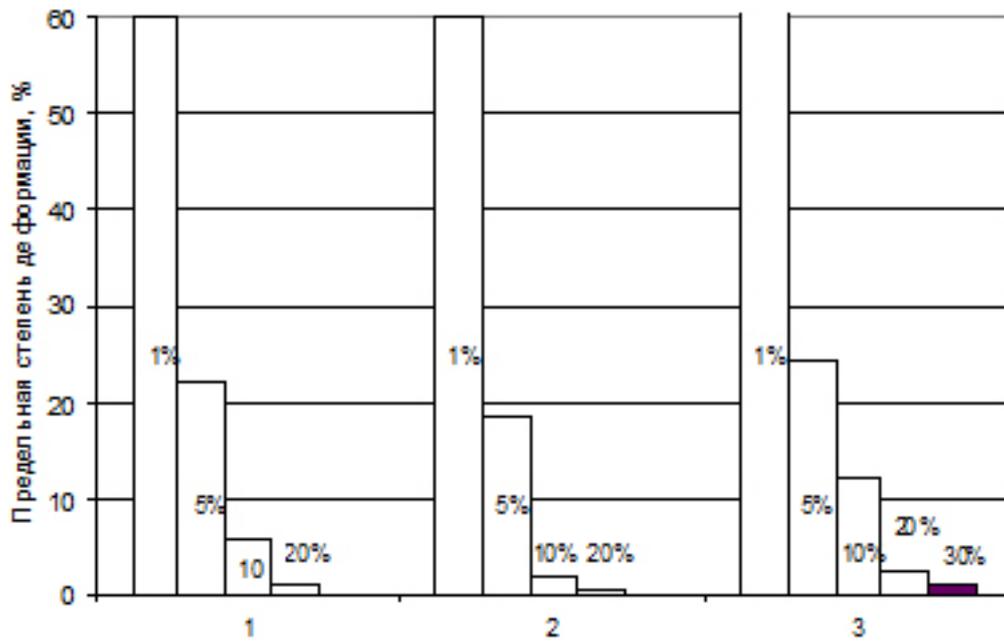


Рис. 4. Влияние содержания и марки графита на предельную степень деформации при сжатии меднографитового материала: 1 – МГ, 65 мкм; 2 – МГ, 32 мкм; 3 – ГЛ

Fig. 4. The influence of the content and grade of graphite on the ultimate degree of deformation during compression of copper graphite material: 1 – MG, 65 μm; 2 – MG, 32 μm; 3 – GL

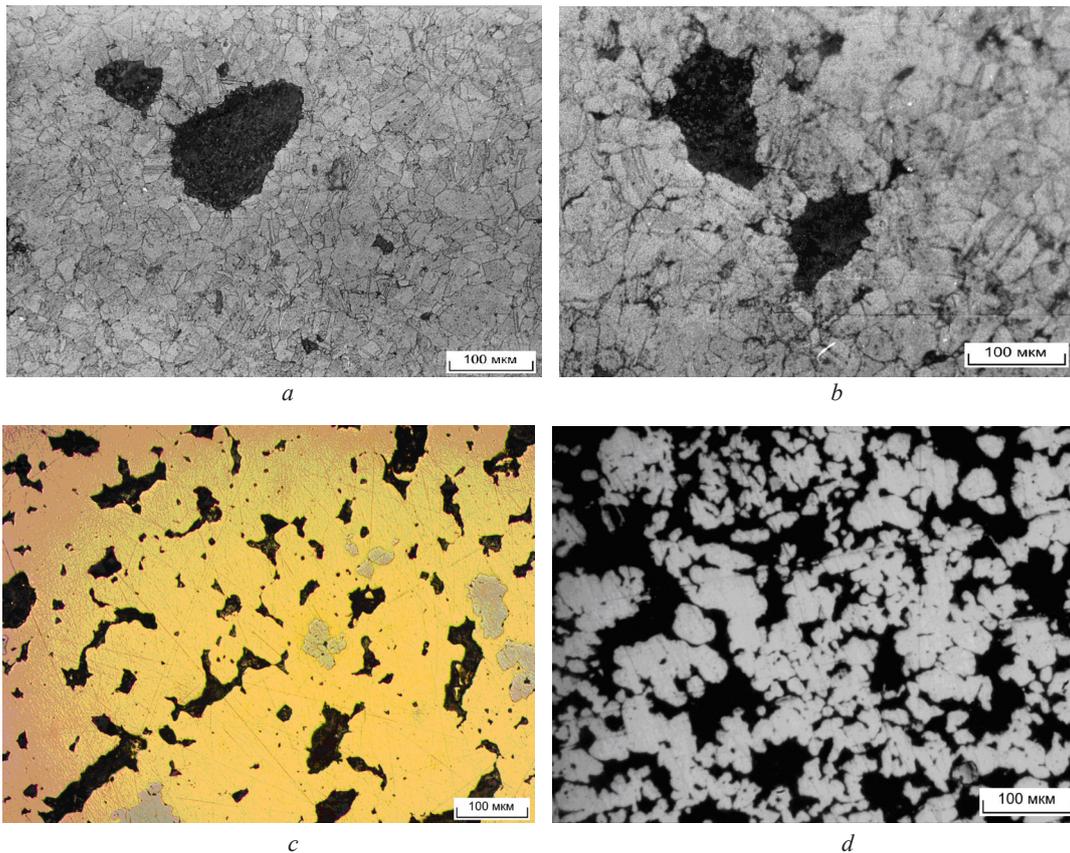


Рис. 5. Структура меднографитового материала: *a* – 1 % графита марки МГ; *b* – 20 % графита марки МГ, после деформации; *c* – 10 % графита марки ГЛ; *d* – 30 % графита марки ГЛ

Fig. 5. The structure of copper-graphite material: *a* – 1 % graphite grade MG; *b* – 20 % of graphite grade MG, after deformation; *c* – 10 % of graphite grade GL; *d* – 30 % of graphite grade GL

изменяется незначительно, более 10 % – возрастает в 2–4 раза (таблица). Причем, если в материалах с графитом марки МГ увеличение его содержания с 20 до 30 % приводит к повышению электросопротивления в 4–6 раз, то в материалах с графитом марки ГЛ электросопротивление возрастает лишь на 1,5 % благодаря тому, что сопротивление графита марки ГЛ существенно меньше (11 мкОм·м), чем марки МГ (18 мкОм·м) [6].

Влияние содержания графита, его марки и дисперсности на электрофизические свойства меднографитового материала

The effect of graphite content, its brand and dispersion on the electrophysical properties of copper graphite

Марка графита, его дисперсность Graphite grade, graphite dispersity	Содержание графита, мас. % Graphite content, mass %	Электропроводность, $\times 10^{-3}$, См/м Electrical conductivity, $\times 10^{-3}$, cm/m	Удельное электросопротивление, 10^8 , Ом·м Specific electrical resistivity, 10^8 , Ohm·m
Без графита		458	2,18
МГ, 160 мкм	1	169,5	5,89
	5	126,4	7,91
	10	91,7	10,91
	20	46,5	21,5
	30	7,3	136,2
МГ, 65 мкм	1	170,9	5,85
	5	125,9	7,94
	10	81,5	12,27
	20	31,8	30,4
	30	7,3	136,99
МГ, 32 мкм	1	170,1	5,88
	5	125,5	7,97
	10	77,2	12,95
	20	16,4	60,98
	30	7,2	139,77
ГЛ	1	170,9	5,85
	5	126,9	7,88
	10	121,7	8,22
	20	84,6	11,82
	30	54,7	18,28

Такие различия в значениях электропроводности и электросопротивления у материала с различными марками графита, по-видимому, объясняются большей, чем на 20 % плотностью материала с графитом марки ГЛ, а также свойствами самого графита, который имеет плотную структуру и более высокие электрофизические свойства.

Исследование структуры меднографитового материала после деформации осадков показало, что при содержании графита марки МГ дисперсностью 140 и 65 мкм в процессе деформации происходит множественное образование микротрещин (рис. 5, б), которые существенно снижают прочность материала и в итоге приводят к разрушению материала без пластической деформации (при содержании 30 % графита) или незначительной пластической деформацией (при 20 % графита). В материале с графитом дисперсностью 63 мкм также наблюдаются микротрещины, однако их значительно меньше.

Заключение. Исследовано влияние содержания, вида и дисперсности графита на структуру, механические и электрофизические свойства композиционного меднографитового материала. Показано, что в процессе спекания при содержании графита марки ГЛ 1 % усадка составляет 5,7 %, при 5 и 10 % – 2,4 и 0,6 % соответственно, при 20 и 30 % – объемные изменения отсутствуют. При введении графита марки МГ до 10 % наблюдается рост образцов 1–1,6 %, при большем содержании графита объемных изменений практически не происходит.

Содержание графита более 20 %, независимо от его марки, приводит к снижению прочности материала практически на порядок вследствие уменьшения площади металлического контакта и перехода структуры материала из каркасной с медным каркасом в матричную, в которой преобладает графитовая составляющая. При содержании графита марки МГ дисперсностью 140 и 65 мкм в процессе деформации происходит образование микротрещин.

Удельное электросопротивление меднографитового материала с содержанием графита от 1 до 10 %, независимо от его марки и дисперсности, изменяется незначительно, более 10 % – возрастает в 2–4 раза. Причем, если в материалах с графитом марки МГ увеличение его содержания с 20 до 30 % приводит к повышению электросопротивления в 4–6 раз, то в материалах с графитом марки ГЛ электросопротивление возрастает лишь на 1,5 %.

Список использованных источников

1. Лившиц, П. С. Скользящий контакт электрических машин / П. С. Лившиц. – М., 1974. – 158 с.
2. Чалых, Е. Ф. Щетки для электрических машин / Е. Ф. Чалых. – М., 1990. – 189 с.
3. Гершман, И. С. Токосъемные углеродно-медные материалы / И. С. Гершман // Вестн. ВНИИЖТ. – 2002. – № 5. – С. 15–20.
4. Темкин, И. В. Производство электроугольных и металлокерамических изделий / И. В. Темкин. – М., 1986. – 255 с.
5. Gershman, I. S. Compatibility of current collection materials in friction / I. S. Gershman // Трение и износ. – 2000. – Т. 21, № 5. – С. 540–543.
6. Фиалков, А. С. Углеграфитовые материалы / А. С. Фиалков. – М., 1979. – 320 с.
7. Шулепов, С. В. Физика углеграфитовых материалов / С. В. Шулепов. – М., 1972. – 254 с.
8. Искусственный графит / В. С. Островский [и др.]. – М., 1986. – 272 с.
9. Гершман, И. С. Разработка износостойких материалов с помощью методов неравновесной термодинамики на примере скользящих электрических контактов / И. С. Гершман. – М., 2006. – 234 с.
10. Gupta, S. A review on copper-graphite composite material fabrication & its mechanical properties [Electronic resource] / S. Gupta, H. Bharti // International Journal of Advance Research and Innovative Ideas in Education. – 2016. – Vol. 2, N 5. – P. 594–599. – Mode of access: <http://www.ijariie.com/FormDetails.aspx?MenuScriptId=2045>. – Date of access: 23.03.2020.
11. Rajkumar, K. Microwave sintering of copper-graphite composites / K. Rajkumar, S. Aravindan // Journal of Materials Processing Technology. – 2009. – Vol. 209. N 15–16. – P. 5601–5605. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2009.05.017>
12. Гершман, И. С. Исследование свойств и характеристик графито-медных материалов с модифицированным графитом / И. С. Гершман, Е. И. Гершман, П. Г. Тюрнин // Вестн. НИИЖТ. – 2013. – № 3. – С. 43–48.

References

1. Livshits P. S. *The sliding contact of electric machines*. Moscow, 1974. 158 p. (in Russian).
2. Chalykh E. F. *Brushes for electric machines*. Moscow, 1990. 189 p. (in Russian).
3. Gershman I. S. Current Collecting Carbon-Copper Materials. *Vestnik VNIIZhT [VNIIZHT Scientific Journal]*, 2002, no. 5, pp. 15–20 (in Russian).
4. Temkin I. V. *Production of electric coal and cermet products*. Moscow, 1986. 255 p. (in Russian).
5. Gershman I. S. Compatibility of materials at friction with current collection. *Journal of Friction and Wear*, 2000, vol. 21, no. 5, pp. 71–74.
6. Fialkov A. S. *Carbon-graphite materials*. Moscow, 1979. 320 p. (in Russian).
7. Shulepov S. V. *Physics of carbon-graphite materials*. Moscow, 1972. 254 p. (in Russian).
8. Ostrovsky V. S., Virgiliev Yu. S., Kostikov V. I., Shipkov N. N. *Artificial Graphite*. Moscow, 1986. 272 p. (in Russian).
9. Gershman I. S. *The development of wear-resistant materials using methods of nonequilibrium thermodynamics on the example of sliding electrical contacts*. Moscow, 2006. 234 p. (in Russian).
10. Gupta S., Bharti H. A review on copper-graphite composite material fabrication & its mechanical properties. *International Journal of Advance Research and Innovative Ideas in Education*, 2016, vol. 2, no. 5, pp. 594–599. Available at: <http://www.ijariie.com/FormDetails.aspx?MenuScriptId=2045> (accessed 23 March 2020).
11. Rajkumar K., Aravindan S. Microwave sintering of copper-graphite composites. *Journal of Materials Processing Technology*, 2009, vol. 209, no. 15–16, pp. 5601–5605. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2009.05.017>
- 10 Gershman I. S., Gershman E. I., Turnin P. G. Investigation of the properties and characteristics of graphite-copper materials with modified graphite. *Vestnik VNIIZhT [VNIIZHT Scientific Journal]*, 2013, no. 3, pp. 43–48 (in Russian).

Информация об авторе

Дьячкова Лариса Николаевна – д-р техн. наук, доцент, заведующий лабораторией. Институт порошковой металлургии им. О. В. Романа (ул. Платонова, 41, 220005, Минск, Республика Беларусь). E-mail: dyachkova@tut.by.

Information about the author

Dyachkova Larisa N. – D. Sc. (Engineering), Associate professor, Head of the Laboratory. Powder Metallurgy Institute named after O. V. Roman (41, Platonov Str., 220005, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: dyachkova@tut.by.