

## ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА УПРОЩЕННОЙ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ГРАФИТОПЛАСТОВЫХ ЩЕТОК

*М.Н. Самодурова, Л.А. Барков, В.А. Иванов, Б.А. Яров*

Представлен анализ известных и новых, созданных с участием ученых ЮУрГУ, способов производства щеток для электрических машин из углеродных порошковых композиций.

*Ключевые слова:* углерод, щетки, электрические машины, углеродные порошковые композиции, электрическое сопротивление, кажущаяся плотность.

Впервые в России изделия из порошка углерода были изготовлены на небольшом заводе в г. Кинешме кустарным способом еще в 1874 г. На крупном по тому времени заводе «Электроугли» в 1879 г. начали изготавливать щетки электрических машин. В качестве наполнителя исходной порошковой композиции использовали сажу, а в качестве связки пек [1]. Современные исследования показали, что сажа – это один из самых химически чистых углеродных материалов, зольность которого не превышает 0,1 %, частицы сажи имеют форму, близкую к сферической, а их размеры находятся в пределах 13–120 нм [2]. Пек, использованный на заводе «Электроугли», очевидно, был древесным, полученным от переработки дегтя.

В 1892 г. во Франции щетки для электрических двигателей начала выпускать фирма Carbone Logaine. С 2010 года эта фирма носит название Mersen Group и является крупнейшим в мире производителем щеток из углеродных композиций [3]. Ассортимент включает следующие типы щеток: А – карбографитные; G – электрографитные; С – мягкографитные; МС – металлографитные; ВG – бакелитографитные.

Каждый тип щеток имеет свой диапазон таких параметров, как плотность, удельное электросопротивление, твердость поверхности, механическая прочность и контактное трение в процессе работы щетки.

Аналогичный французскому ассортимент щеток выпускают крупнейшие фирмы Европы и мира: Schunk Kohlenstofftechnik [4], Morgan AM&T [5] и многие другие.

В России крупным производителем щеток является ФГУП «НИИЭИ» в г. Электроугли. ФГУП «НИИЭИ» производит щетки электрических машин общего назначения, автотракторных электрических машин, электромашин для авиационной и ракетно-космической техники, железнодорожного транспорта и электромашин бытового назначения [6]. Производят щетки и другие предприятия России, среди которых можно назвать ООО «Графитопласт» в г. Челябинске.

Электрощетками из углеродных композиций относятся к важнейшим функциональным элементам двигателей и генераторов. Надежная работа этих

машин определяется характеристикой скольжения щеток по пластинам коммутатора, которая зависит главным образом от состава углеродной композиции и технологии изготовления из нее щетки.

ФГУП «НИИЭИ» разработан и введен Госстандартом РФ в 2003 г. новый национальный стандарт «Щетки электрических машин» (ГОСТ 52157–2003).

Согласно этому стандарту щетки в зависимости от исходных материалов подразделяют на следующие группы:

– углеграфитные, изготовленные из технического углерода (сажи), графита или кокса и связующих;

– графитные, изготовленные из натурального графита и связующих;

– электрографитные, изготовленные из технического углерода (сажи), графита или кокса, связующих, прошедшие графитацию;

– металлографитные, изготовленные из натурального графита, металлических порошков и связующих или без связующих.

В качестве связующих ГОСТ предлагает использовать каменноугольную смолу, пек, фенолформальдегидную смолу (бакелит), бакелитовый лак и растворители пека.

Типы щеток наиболее широкого общепромышленного применения, выпускаемые в настоящее время предприятиями России, представлены в каталоге, разработанном ФГУП «НИИЭИ» (рис. 1).

К маркам щеток общепромышленного назначения относятся [7]: МГ, М1, ЭГ4, ЭГ61АИ, ЭГ-14, Э141, ЭГ2А, ЭГ2АФ, ЭГ71, ЭГ74, Г3, Г20 и другие предназначенные в основном для использования в токосъемных устройствах электрических машин с контактными кольцами, в генераторах и двигателях. Внешний вид некоторых марок щеток показан на рис. 2.

Технология получения электрощеток всех типов начинается с подготовки исходных материалов, прежде всего «черных» щеточных материалов, включающих углеграфитные, графитные, электрографитные; затем «цветных» материалов, включающих медный, свинцовый и оловянный порошки, и связующих.

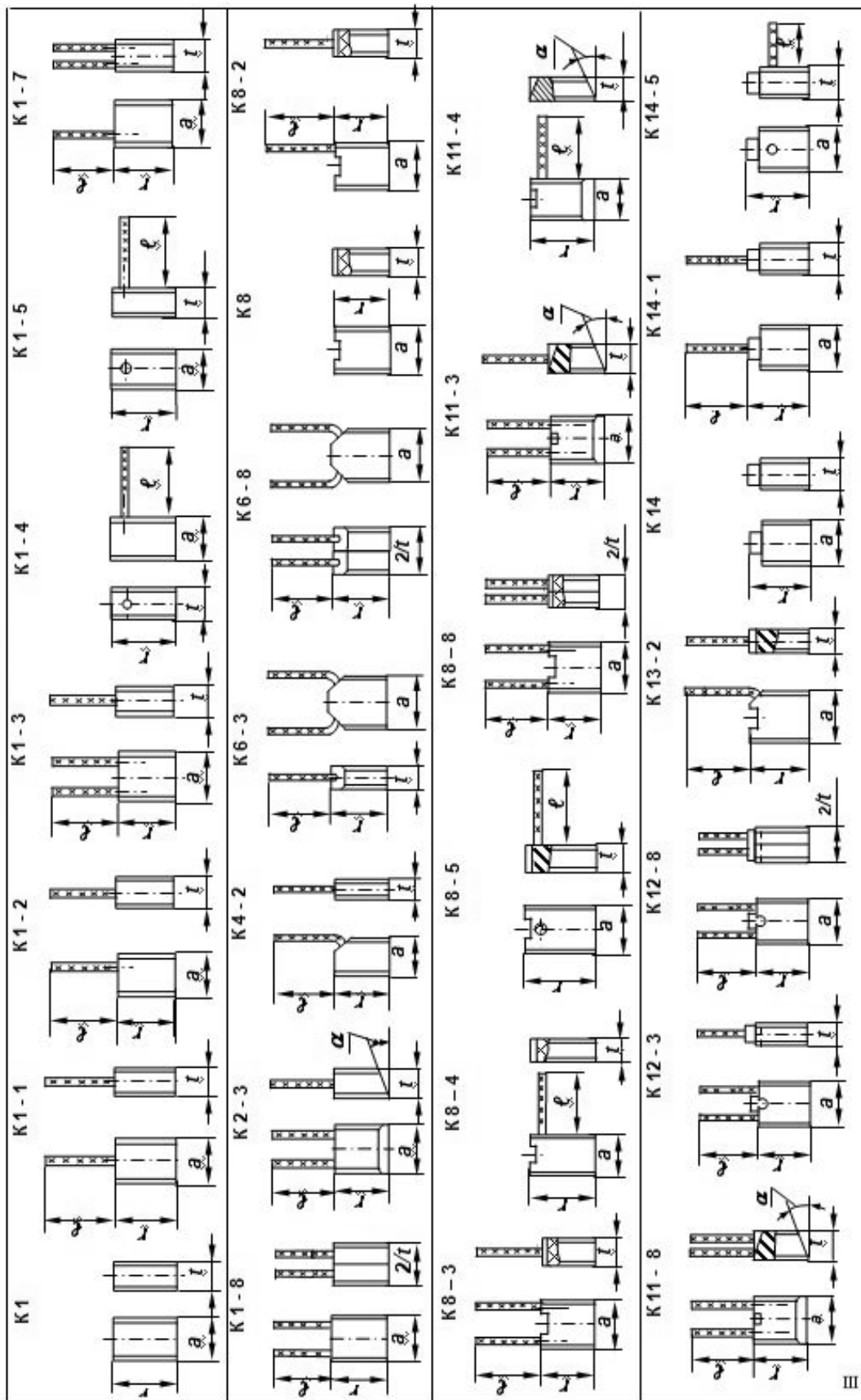


Рис. 1. Типы электродов общепромышленного применения [6]

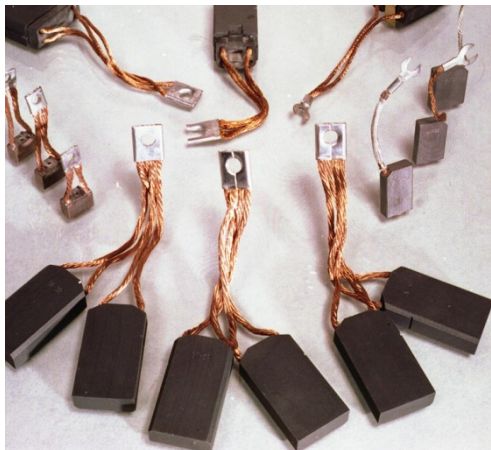


Рис. 2. Общий вид щеток общепромышленного назначения [6]

Основные технологические схемы изготовления щеточных полуфабрикатов, как при одностадийной, так и особенно при двухстадийной переработке, показанные на рис. 3, многооперационны и очень сложны. Так, одностадийная схема подготовки щеточных полуфабрикатов, пригодных для последующего формирования из них щеток, включает 14 технологических операций, а при двухстадийной 21 операцией. Такое большое количество операций приводит к высокой трудоемкости и большой длительности процесса получения щеток. Один из крупных специалистов в России по технологиям получения щеток, П.С. Лифшиц, в опубликованном им справочнике [8] отмечает, что, например, изготовление щетки ЭГ2А по времени занимает 60 суток (1440 часов).

Для устранения указанных недостатков ведущие фирмы мира по углеродным материалам и

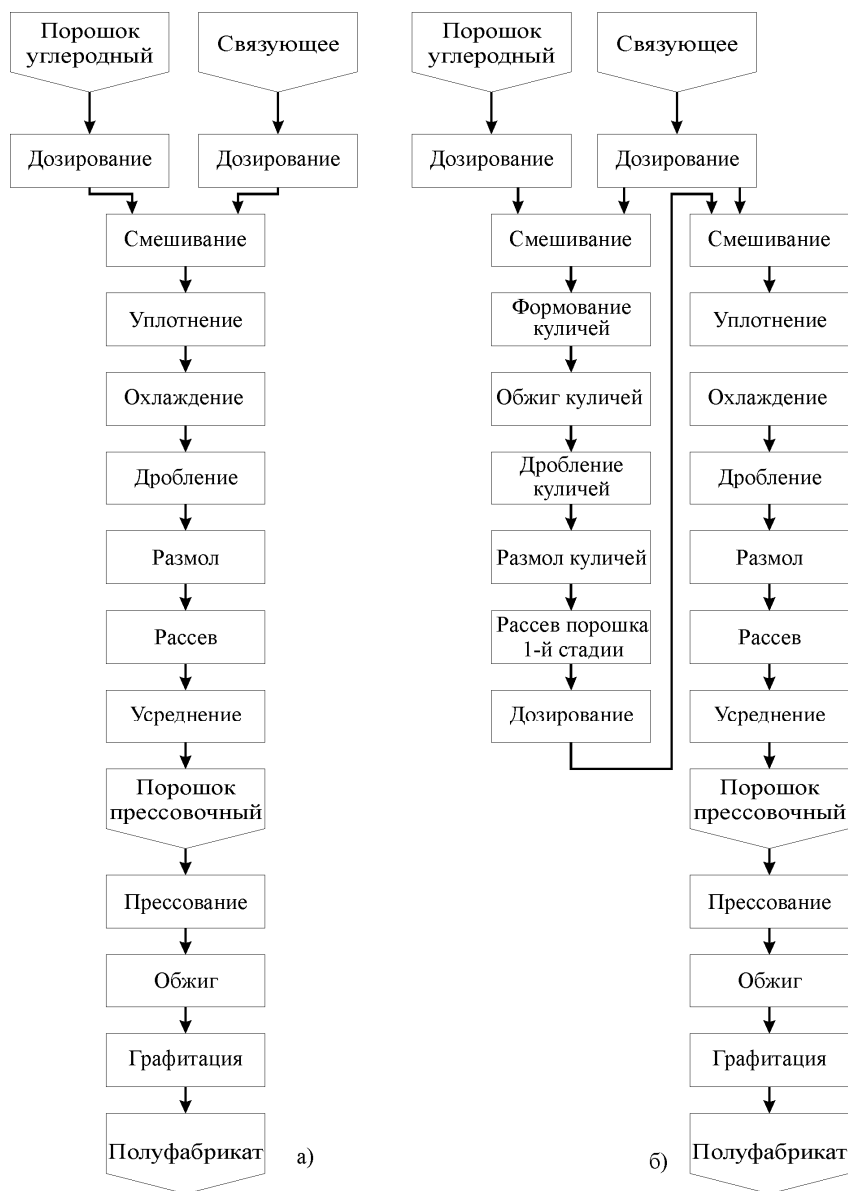


Рис. 3. Принципиальные схемы изготовления щеточных полуфабрикатов при одностадийной (а) и двухстадийной (б) переработке [8]

изделиям наряду с описанными схемами получения щеточных полуфабрикатов используют упрощенные схемы. Например, фирма Mersen в качестве полуфабрикатов для щеток типа бакелитографитовых использует натуральный или искусственный графит в основном в виде «обточка» готовых графитованных заготовок на изделия крупномасштабного электродного производства.

В России самостоятельные до последнего времени крупные электродные заводы, как Челябинский, Новочеркасский, Новосибирский и другие объединились в группу компаний «ЭнергоПром», которая стала одним из крупнейших в мире производителей углеродной продукции [9]. Известно, что Челябинский электродный завод (ЧЭЗ) всегда выпускал и выпускает в больших объемах конструкционные графиты. В проспекте ЧЭЗ [10] приведена технологическая схема производства графитованной продукции (рис. 4), из которой видно, что при механической обработке заготовок, особенно для получения изделий цилиндрической формы, образуется большой объем «обточка». Конечно, эта «обточка» возвращается для использования в технологическом цикле производства основной продукции ЧЭЗ.

Для частичного использования этой «обточка», которая представляет собой электрографит, в конце 90-х годов XX века в г. Челябинске было создано ООО «Графитопласт» [7]. Основной продукцией этого предприятия являются электрощетки, скользящие контакты токосъема для троллейбусов, трамваев и железнодорожного транспорта. Разработанные в 2001 г. технические условия на электрощетки предусматривали использование в качестве наполнителя «графит искусственный измельченный» по ТУ 1916-109-71-2000. Этот графит имеет насыпную плотность  $0,85 \text{ г/см}^3$ , массовую долю серы не более 0,05 %, влаги не более 1,0 % и его зольность не превышает 1,0 %. В качестве связки используется порошковая фенолформальдегидная смола новолачного типа марки СПФ-011А по ТУ 6-05751768-35-94.

В первые годы работы предприятия исходную порошковую композицию в виде смеси электрографита с фенолформальдегидной смолой получали по одной технологии для щеток, токосъемников троллейбусов, вставок пантографов трамваев и железнодорожного транспорта. Эта технология включала дозирование наполнителя и связки, их дробление и гомогенизацию в вибрационной мельнице. Полученная смесь содержала 17–19 %

фенолформальдегидной смолы новолачного типа, насыпная плотность смеси равнялась  $0,7 \text{ г/см}^3$  [11]. В последующие годы с учетом пожеланий потребителей, в основном связанных со снижением удельного электросопротивления, технология приготовления исходной смеси, предназначенной для формования электрощеток, была изменена. Во-первых, для щеток вместо графита из отходов по ТУ 1916-109-71-2000, содержащих бой бракованных фасонных изделий, электродов, доменных подовых блоков, огарки электродов, выпускаемых ЧЭЗ, стали использовать углеродсодержащий материал по ТУ 1914-00194042-026-01, выпускаемый группой компаний «ЭнергоПром» [10]. Этот материал в зависимости от размера частиц и физико-химических свойств делится на марки: МТ, МО, МГ и МУ. Для щеток была выбрана марка МГ, содержащая до 99 % чистого углерода с размерами частиц до 0,5 мм, не содержащая золы и имеющая насыпную плотность  $0,7 \text{ г/см}^3$ . Во-вторых, порошковую смолу перед операцией гомогенизации дополнительно обрабатывали до мелкодисперсного состояния. Эти меры привели к стабильным, но все же еще достаточно высоким значениям удельного электросопротивления щеток, равного 50–60 мкОм·м.

Для снижения удельного электросопротивления щеток, изготовленных из композиции «графит – смола» учеными кафедры «Машины и технологии обработки материалов давлением» (МиТОМД) Южно-Уральского государственного университета (ЮУрГУ), был выполнен большой объем исследований.

Установлено, что из всех изделий, выпускаемых ЧЭЗ, наименьшее удельное электросопротивление в пределах 4–11 мкОм·м имеют графитованные электроды всех марок. Ниппели имеют электросопротивление 5,5–7,0 мкОм·м, угольные электроды в пределах 26–35 мкОм·м, масса анодная до 75 мкОм·м, а масса для непрерывных самообжигающихся электродов 80–90 мкОм·м. Электрическое сопротивление таких изделий, как блоки доменные, катодные и другие вообще не нормируется. Именно по этой причине разные партии отходов по ТУ 1916-109-71-2000, полученные от разных изделий, имеют разные значения электросопротивления. Известно также, что разные марки искусственного графита, полученные по разным технологиям, имеют разное удельное электросопротивление [12]. Из табл.1 видно, что значения удельного электросопротивления разных марок

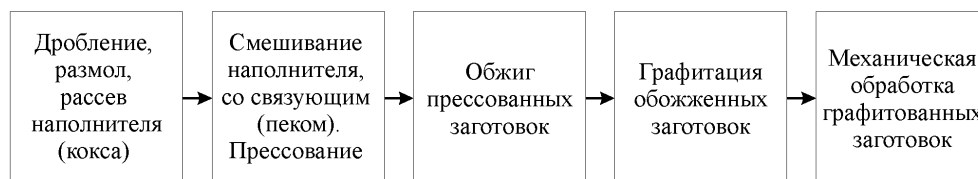


Рис. 4. Схема производства графитованной продукции на ЧЭЗ [10]

графита существенно отличаются. Например, для марки СУ значение удельного электросопротивления в 10 раз выше его значения для марки УПВ-1.

Хорошо известно, что на удельное электросопротивление влияет кажущаяся плотность и остаточная пористость отформованных образцов, которые, в свою очередь, зависят от условий формирования порошковой композиции, гранулометрического состава порошкового графита, связки и смеси, а также среднего размера и формы частиц. В связи с этим на базе Технического центра (СЕТИМ) в г. Сент-Этьене (Франция) на грануломерометре Alpaга 500 NANO и электронном микроскопе Tescan VEGA II было проведено исследование гранулометрического состава и морфологии частиц композиций.

Грануломерометр Alpaга 500 NANO с оригинальным программным обеспечением Callisto производства компании ОССНЮ (Бельгия) позволяет определять диаметр ячейки сита, округлость, удлинение и другие параметры для частиц с размерами от 0,5 до 2500 мкм. Подготовка образца осуществляется вбросом частиц на предметное стекло через отверстие в вакуумной камере за счет создания небольшого, в пределах 0,1 атм, перепада давления.

Диаметр ячейки сита – минимальный диаметр отверстия сита, через которое может пройти частица. Округлость – параметр, характеризующий отклонение формы частицы от идеально круглой. Удлинение частицы – нормированное отношение полуосей эллипса инерции Лагранжа.

Электронный сканирующий микроскоп Tescan VEGA II LS с программным обеспечением VegaTC производства компании Tescan (Чехия) позволяет проводить исследования образцов, в том числе из непроводящих материалов, с поперечными размерами до 145×200 мм и высотой до 60 мм. Уско-

ряжающее напряжение от 200 до 30 000 В. Максимальное разрешение до 3 нм, увеличение непрерывное от 4× до 1 000 000×, время сканирования от 160 нс до 10 мс на точку. Размер изображения 8192×8129 точек, 65 536 градаций серого.

Составы порошковых композиций, подвергнутых исследованию, приведены в табл. 2.

Порошок натурального графита марки ЭУ-1, зольность не более 7 %, массовая доля серы не более 0,2 %, массовая доля железа не более 1 %, получен из отходов электродного производства размолот на шаровых мельницах. Связка, порошковая фенолформальдегидная смола новолачного типа СФП-011А, массовая доля уротропина 6–9 %, текучесть 20–65 мм, предварительно измельчена размолот в вибрационных мельницах. Электролитический порошок меди марки ПМС-1, использованный в составе № 3, имеет насыпную плотность, равную 1,25–2,00 г/см<sup>3</sup>. В составах № 4, 5 в качестве добавки использовался нефтяной кокс марки КНГ, зольность не более 0,5 %, массовая доля серы не более 1 %. Порошок стеарата цинка, массовая доля цинка не более 4 %, кислотное число 75–90, в составе № 5 применялся в качестве смазки между частицами графита и связки. Смешивание и гомогенизация композиций также производились в вибрационной мельнице.

В ходе исследования для порошков определялись диаметр ячеек сита, округлость, удлинение частиц. В табл. 3 приведено накопительное распределение размеров частиц в порошковых композициях по диаметру ячеек сита. Так, например, для состава № 1 минимальное значение диаметра ячеек сита составило 0,96 мкм, максимальное – 95 мкм. Доля частиц с диаметром ячеек сита до 13 мкм – 5 %, с диаметром до 18 мкм – 10 %, до 21 мкм – 16 %, до 26 мкм – 25 %, до 40 мкм – 50 % и так далее, до 94 мкм – 95 %.

Таблица 1  
Удельное электросопротивление (мкОм·м) основных марок искусственного графита, измеренное при разных температурах [12]

Температура, К	Марки искусственного графита					
	УПВ-1	ВПП	ГМЗ	МГ	ПГ-50	СУ
300	4,3	7,8	9,6	22,6	37,2	44,0
500	3,3	7,0	7,8	14,5	32,2	39,7
1000	2,7	6,9	7,8	12,7	27,4	29,0
2000	3,5	9,0	10,7	16	33,4	23,0
2500	4,0	10,0	12,3	17,7	37,6	20,0

Таблица 2  
Составы порошковых композиций

№ состава	Графит, %	Связка, %	Медь, %	Кокс, %	Стеарат цинка, %
1	100	–	–	–	–
2	86	14	–	–	–
3	76	14	10	–	–
4	71	14	–	15	–
5	71	14	–	10	5

Таблица 3

## Диаметр ячеек сита, мкм

№ состава	Сред.	Мин.	P5	P10	P16	P25	P50	P75	P84	P90	P95	Макс.
1	47	0,96	13	18	21	26	40	65	77	85	94	95
2	32	0,96	8	10	12	15	22	40	57	72	86	99,8
3	34	0,96	9	11	14	17	26	46	56	72	81	87
4	33	0,48	9	12	15	20	31	44	48	54	64	78
5	33	0,48	9	12	15	18	28	45	53	59	75	76

Сравнение средних значений диаметра ячеек сита позволяет судить о соотношении размеров частиц компонентов. Добавление связки, порошка меди, кокса, стеарата цинка осуществлялось с уменьшением доли графита в композиции и в целом привело к снижению среднего размера частиц композиции. В составе № 1 50 % частиц имеют диаметр менее 40 мкм, при добавлении всего 14 % связки в составе № 2 диаметр менее 40 мкм наблюдался у 75 % частиц, следовательно, средний диаметр частиц связки должен быть существенно ниже 40 мкм.

Минимальные и максимальные значения диаметра частиц не являются характерными, поскольку минимальный размер близок к чувствительности гранулометра, а верхние значения определяются особенностями подготовки образцов для исследования.

Распределение частиц по округлости приведено в табл. 4, по удлинению частиц в табл. 5. Округлость и удлинение частиц являются характеристиками формы частиц компонентов смеси.

Из табл. 5 видно, что распределение частиц по параметру «удлинение» сохранилось практически

Таблица 4

## Округлость, %

№ состава	Сред.	Мин.	P5	P10	P16	P25	P50	P75	P84	P90	P95	Макс.
1	49	15	28	31	35	38	45	59	66	70	77	100
2	53	10	25	32	33	40	52	65	71	75	80	100
3	50	15	24	32	35	39	49	60	65	71	77	100
4	35	10	13	13	16	19	30	45	52	60	69	100
5	31	13	13	15	16	17	27	39	46	53	65	100

Таблица 5

## Удлинение частиц, %

№ состава	Сред.	Мин.	P5	P10	P16	P25	P50	P75	P84	P90	P95	Макс.
1	33	0,01	11	14	17	22	32	45	50	51	54	91
2	34	0,01	10	14	17	21	32	44	49	54	59	91
3	39	0,01	12	15	21	26	40	49	55	59	64	92
4	39	0,01	10	16	22	29	38	51	57	61	64	97
5	38	0,01	12	16	20	27	37	51	53	58	65	93



Рис. 5. Микрофотография с микроскопа Tescan VEGA II. Смесь № 2 с увеличением 100×

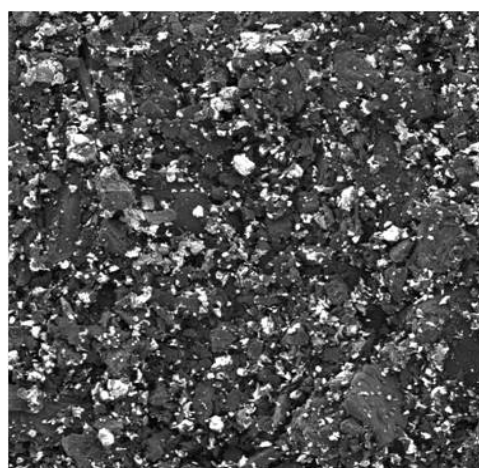


Рис. 6. Микрофотография с микроскопа Tescan VEGA II. Смесь № 3 с увеличением 200×

без изменения для составов № 1 и 2, причиной этого является одинаковый способ (размол в вибрационных мельницах) подготовки порошков графита и связки в отдельности и смесей в целом. Отличия для состава № 3 связаны со способом получения электролитического порошка меди, частицы которого имеют дендритную форму и вытянуты вдоль одного направления.

Фотографии, сделанные на электронном микроскопе (рис. 5 и 6), позволяют визуально оценить характерные размеры и форму частиц, а также однородность смеси.

Удельное электрическое сопротивление измерялось на образцах, полученных динамическим формованием [11] композиций по табл. 2 и термообработанных до полимеризации связки. Диапазон изменения удельного электрического сопротивления составил 38–50 мкОм·м. При этом минимальные значения сопротивления соответствовали максимальным значениям кажущейся плотности образцов после формования и термообработки. Наиболее существенное влияние на удельное электрическое сопротивление, как и ожидалось, оказала добавка порошка меди (состав № 3, табл. 2), удельное электрическое сопротивление таких образцов находилось вблизи нижней границы диапазона. Для образцов, отформованных из состава № 2 удельное электрическое сопротивление составило 45–52 мкОм·м, в зависимости от кажущейся плотности, что меньше диапазона 50–60 мкОм·м полученного для щеток на ООО «Графитопласт». Основное влияние на снижение электрического сопротивления образцов из состава № 2 (табл. 2), оказало пониженное содержание связки по сравнению с составами, применяемыми для производства щеток на ООО «Графитопласт».

Исследование выполнено в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007–2013 годы» Государственный контракт № 14.513.11.088 от 21.06.2013.

#### Литература

1. Чалых, Е.Ф. Щетки электрических машин / Е.Ф. Чалых. – М.: Информэлектро, 1990. – 186 с.
2. Фялков, А.С. Углеродистые материалы / А.С. Фялков. – М.: Энергия, 1979. – 320 с.
3. Материалы фирмы Mersen Group France. – <http://www.mersen.com> (дата обращения: 11.03.2012).
4. Материалы фирмы Schunk Kohlenstofftechnik GmbH, Germany. – <http://www.schunk-group.com> (дата обращения: 11.03.2012).
5. Материалы фирмы Morgan AM&T, Swansea, UK. – <http://www.morganamt.com> (дата обращения: 11.03.2012).
6. Материалы фирмы ФГУП «НИИЭИ» – <http://www.schunk-group.com> (дата обращения: 11.03.2012).
7. Проспект фирмы ООО «Графитопласт». – Челябинск, 2010. – 6 с.
8. Лившиц, П.С. Справочник по щеткам электрических машин / П.С. Лившиц. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 216 с.
9. Материалы группы компаний «ЭнергоПром». – <http://www.energoprom.ru> (дата обращения: 11.03.2012).
10. Проспект Челябинского электродного завода. – Челябинск, 2010. – 15 с.
11. Статическое и высокоэнергетическое формование углеродных порошковых композиций / М.Н. Самодурова, Л.А. Барков, В.А. Иванов и др. // Металлург. – 2011. – № 11. – М. 87–91.
12. Островский, В.С. Основы материаловедения искусственных графитов / В.С. Островский. – М.: Металлургиздат, 2011. – 112 с.

**Самодурова Марина Николаевна**, кандидат технических наук, доцент кафедры машин и технологий обработки материалов давлением, Южно-Уральский государственный университет. 454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 76. Тел.: (351)2679224. E-mail: samodurovamn@susu.ac.ru.

**Барков Леонид Андреевич**, доктор технических наук, профессор кафедры машин и технологий обработки материалов давлением, Южно-Уральский государственный университет. 454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 76. E-mail: barkovla@susu.ac.ru.

**Иванов Василий Александрович**, старший преподаватель кафедры машин и технологий обработки материалов давлением, Южно-Уральский государственный университет. 454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 76. E-mail: Vasilij.A.Ivanov@gmail.com.

**Яров Булат Ажуватович**, аспирант кафедры машин и технологий обработки материалов давлением, Южно-Уральский государственный университет. 454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 76. E-mail: bulatyarov@gmail.com.

## RESEARCH AND DEVELOPMENT SIMPLIFIES THE PRODUCTION OF CARBON BRUSHES

**M.N. Samodurova**, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation,  
*samodurovamn@susu.ac.ru*,

**L.A. Barkov**, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation,  
*barkovla@susu.ac.ru*

**V.A. Ivanov**, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation,  
*Vasilij.A.Ivanov@gmail.com*

**B.A. Yarov**, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation,  
*bulatyarov@gmail.com*

An analysis of production methods of brushes for electrical machines from carbon powder compositions is presented, both known and updated, created by researchers of the South Ural State University.

*Keywords: carbon, brushes, electrical machines, carbon powder compositions, electrical resistivity, apparent density.*

### References

1. Chalykh E.F. *Shchetki elektricheskikh mashin* [Brushes of Electrical Machines]. Moscow, Informelektro, 1990. 186 p.
2. Fialkov A.S. *Uglegrafitovye materialy* [Carbon Materials]. Moscow, Energiya, 1979. 320 p.
3. *Mersen Group. France*. Available at: <http://www.mersen.com> (accessed 11 March 2012).
4. *Schunk Kohlenstofftechnik GmbH. Germany*. Available at: <http://www.schunk-group.com> (accessed 11 March 2012).
5. *Morgan AM&T. Swansea. UK*. Available at: <http://www.morganamt.com> (accessed 11 March 2012).
6. *NIIEI* [Research Institute of Electric Carbonic Products]. Available at: <http://niiei.ru/> (accessed 11 March 2012).
7. *Prospekt firmy OOO "Grafitoplast"* [Prospect of the Company Grafitoplast Ltd.]. Chelyabinsk, 2010. 6 p.
8. Livshits P.S. *Spravochnik po shchetkam elektricheskikh mashin* [Handbook on Brushes of Electrical Machines]. Moscow, Energoatomizdat, 1983. 216 p.
9. *Energoprom Group*. Available at: <http://www.energoprom.ru> (accessed 11 March 2012).
10. *Prospekt Chelyabinskogo elektrodnoogo zavoda* [Prospect of the Chelyabinsk Electrode Plant]. Chelyabinsk, 2010. 15 p.
11. Samodurova M.N., Barkov L.A., Ivanov V.A., Yarov B.A. Static and High-Energy Shaping of Carbon-Based Powder Composites. *Metallurgist*, 2012, vol. 55, no. 11–12, pp. 848–853. doi: 10.1007/s11015-012-9512-0.
12. Ostrovskiy V.S. *Osnovy materialovedeniya iskusstvennykh grafitov* [Fundamentals of Artificial Graphite Materials Science]. Moscow, Metallurgizdat, 2011. 112 p.

*Поступила в редакцию 2 октября 2013 г.*