

УДК 62-93  
DOI 10.17513/snt.40087

## НОВОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ СТАБИЛИЗАЦИИ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КАРБОНОВЫХ РЕЗИСТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Шелехов И.Ю., Шелехова А.И.

*ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет»,  
Иркутск, e-mail: promteplo@yandex.ru*

Карбоновые резистивные материалы находят все большее применение в электронике и электротехнике, постепенно вытесняя резистивные материалы, созданные на основе благородных металлов. Это происходит благодаря появлению новых технологий и нового оборудования, с помощью которого расширяется их диапазон сопротивлений и улучшаются электрофизические характеристики. В данной статье представлена технология по производству резистивной карбоновой пасты, где с помощью установки гомогенизации полидисперсных систем осуществляется равномерное пространственное распределение ультрадисперсных частиц в основной функциональной фазе, что существенно повышает параметры надежности и стабильности. В статье представлены результаты исследования электрофизических параметров карбоновой пасты отечественного и импортного производства, а также произведенной по разработанной технологии. Результаты исследования показали, что благодаря представленной технологии удалось существенно расширить спектр удельных сопротивлений карбоновых паст, увеличить величину токовой нагрузки. В статье также представлены результаты лабораторных исследований по изменению коэффициента термического сопротивления карбоновых паст, было показано, что возможно изменять уровень термического сопротивления в широком диапазоне. Разработанная технология не только улучшает электрофизические характеристики производимой карбоновой пасты, но и сокращает время технологического цикла, что существенно снижает себестоимость производства. Российскими учеными накоплен большой теоретический и практический опыт по изготовлению и использованию карбоновых резистивных материалов, что позволит в ближайшее время отечественным производителям снять зависимость от поставок из-за рубежа.

**Ключевые слова:** карбоновые резистивные материалы, гомогенизатор, карбоновая паста, термический коэффициент сопротивления, удельное сопротивление, плотность тока

## NEW EQUIPMENT FOR STABILIZATION OF ELECTROPHYSICAL CHARACTERISTICS OF CARBON RESISTIVE ELEMENTS

Shelekhov I.Yu., Shelekhova A.I.

*Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, e-mail: promteplo@yandex.ru*

Carbon resistive materials are increasingly used in electronics and electrical engineering, gradually replacing resistive materials based on noble metals. This is due to the emergence of new technologies and new equipment, with the help of which their resistance range is expanded and the electrical characteristics are improved. This article presents a technology for the production of resistive carbon paste, where, using a homogenization unit for polydisperse systems, a uniform spatial distribution of ultrafine particles is carried out in the main functional phase, which significantly increases the parameters of reliability and stability. The article presents the results of a study of the electrophysical parameters of carbon paste of domestic and imported production, as well as those produced using the developed technology. The results of the study showed that thanks to the presented technology, it was possible to significantly expand the range of resistivities of carbon pastes and increase the current load. The article also presents the results of laboratory studies on changing the coefficient of thermal resistance of carbon pastes; it was shown that it is possible to change the level of thermal resistance in a wide range. The developed technology not only improves the electrophysical characteristics of the produced carbon paste, but also reduces the technological cycle time, which significantly reduces production costs. Russian scientists have accumulated extensive theoretical and practical experience in the production and use of carbon resistive materials, which will allow domestic manufacturers to eliminate their dependence on supplies from abroad in the near future.

**Keywords:** carbon resistive materials, homogenizer, carbon paste, thermal coefficient of resistance, resistivity, current density

### Введение

В электронике и электротехнике сложно обойтись без резистивных токопроводящих материалов, без них не сможет работать ни один электронный прибор, начиная от светодиодного светильника и заканчивая персональным компьютером. Широкое применение резистивные токопроводящие материалы нашли в электротехнике, осо-

бенно при производстве электронагревательных приборов. Ассортимент электронных и электротехнических приборов растет с каждым годом, увеличиваются их область применения и функциональные возможности, это, в свою очередь, требует от токопроводящих материалов новых свойств, таких как пластичность и гибкость. По экспертным оценкам, востребо-

ванность таких материалов увеличивается ежегодно на 16,3% и уже превысила отметку в несколько триллионов долларов США [1]. Особой популярностью пользуются материалы на основе карбона, которые успешно конкурируют на рынке с другими резистивными материалами и занимают в общей доле рынка около 5%, что оценивается в 50,23 млрд долларов [2].

Свойство карбона образовывать токопроводящие структуры широко используется в электронной промышленности для преобразования различных сигналов, в том числе малых величин, и в электротехнике для изготовления нагревательных элементов, при работе с промышленным напряжением с удельными мощностями до 500 Вт/м<sup>2</sup>. Одним из самых распространенных способов изготовления резистивных элементов является нанесение его на диэлектрическую подложку в виде специализированной карбоновой пасты. Чтобы обеспечить необходимое сопротивление, пасту наносят в виде топологического рисунка с определенной толщиной, длиной и шириной. Паста изготавливается путем введения в полимерное связующее порошков карбона разной дисперсности, при этом размер частиц и технология их перемешивания с полимером во многом определяют ее электрофизические свойства. Свои исследования авторы осуществляют в области «толсто пленочной технологии», где резистивные элементы изготавливаются с помощью станков трафаретной печати, путем продавливания карбоновой пасты через трафарет, нанесенный на сетку с заданной толщиной, на подложку. После нанесения пасты на подложку она помещается в печь, где под температурным воздействием происходит процесс полимеризации. Качество резистивных элементов, в основном, определяется характеристиками пасты, ее реологическими свойствами и равномерностью распределения токопроводящих частиц в объеме полимерного связующего. Обычно пасту изготавливают из смеси мелкодисперсных и ультрадисперсных порошков, для этого используют бисерные мельницы, смесители и трехвалковые пастотерки, при этом в зависимости от качества помола, эффективности смешивания, гомогенизации и других сложных технологических процессов у паст меняются не только физические характеристики, такие как пластичность, адгезия, величина термического расширения, но и электротехнические характеристики, величина удельного сопротивления, характер проводимости, значение коэффициента термического сопротивления [3].

Российские ученые имеют большой опыт по управлению электрофизическими характеристиками у композиционных материалов, особенно в области введения в основную композицию наноматериалов, но данные исследования не получили широкого внедрения в связи с отсутствием отечественного специализированного оборудования. Импортное оборудование попадает на российский рынок в незначительном количестве, поэтому полученные в лабораторных условиях результаты невозможно реализовать на промышленном уровне. Данный факт серьезно сдерживает внедрение новых технологий в отечественную промышленность [4], несмотря на то, что данное научное направление развивается в нашей стране с середины 1980-х годов, уже в этот период времени в головном институте резисторостроения создавались углеродные полимерные композиции, которые могли конкурировать с лучшими зарубежными аналогами [5]. Имеются научные публикации, в которых описывается, как наши ученые без дорогостоящего оборудования создают сложные проводниковые структуры путем варьирования соотношением нескольких паст с различной вязкостью и проникающей способностью в межслойную функциональную фазу [6]; также для получения новых свойств у материалов для толсто пленочной технологии используется метод диффузирования ультрадисперсных частиц [7] и метод образования межслойных переходов в полимерных пастах [8]. Результаты российских и зарубежных ученых сопоставимы, но наши ученые производят данные композиции в единичных экземплярах, а зарубежные специалисты внедряют результаты своей деятельности в серийное производство.

**Целью исследования** было создание надежного и высокопроизводительного оборудования для решения проблем в области образования электропроводности в сложных композиционных структурах, созданных на основе карбона, путем равномерного пространственного распределения ультрадисперсных металлических порошков между функциональными фазами, что обеспечит стабильность электрофизических характеристик и увеличит величину удельной мощности.

#### **Материал и методы исследования**

Электрофизические характеристики карбоновых резистивных элементов, в первую очередь, зависят от исходных компонентов карбоновой пасты и технологических режимов ее изготовления. Для электронных и электротехнических приборов основными показателями качества являются едино-

бразии параметров и стабильность этих параметров при длительной эксплуатации. Условно карбоновую пасту можно разделить на две основные фазы: функциональную и термоактивную. Функциональная фаза состоит из токопроводящих элементов, которые распределены в диэлектрическом связующем (термоактивной фазе). Протекание тока осуществляется с помощью механического контакта токопроводящих элементов и с помощью преодоления потенциального барьера, созданного термоактивной фазой (туннельный эффект). Протекание электрического тока, термическое сжатие и расширение, механические воздействия влияют на контакт между токопроводящими частицами, что приводит к изменению электрофизических свойств резистивного элемента, меняются величина электрического сопротивления и температурный коэффициент сопротивления. Для увеличения стабилизации параметров необходимо обеспечить два основных фактора при изготовлении карбоновой пасты:

– равномерное распределение функциональной фазы в термоактивной позволяет стабилизировать зависимость электрического сопротивления от температуры;

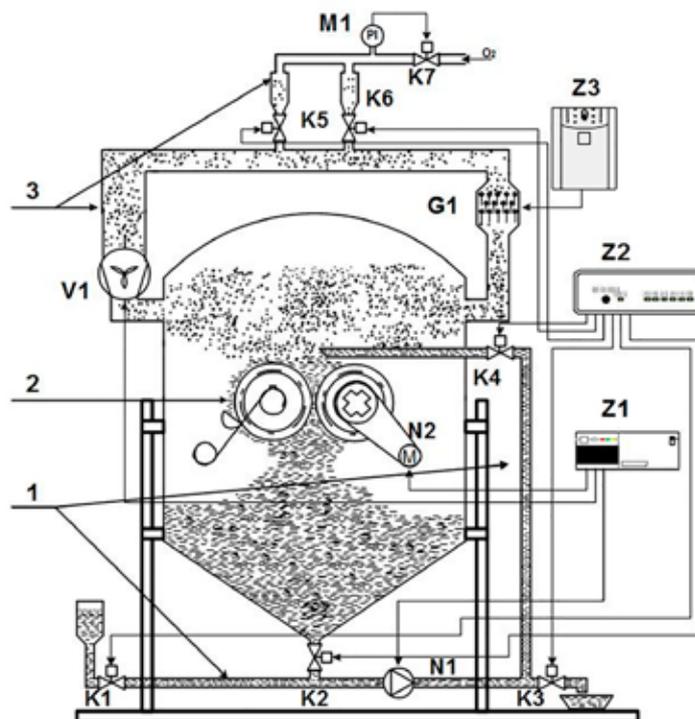
– введение ультрадисперсных металлических порошков между функциональными фазами дает возможность стабилизировать

электрическое сопротивление при механических и электрических воздействиях [9].

Измерив величину отклонения электрического сопротивления и величину коэффициента термического сопротивления, можно охарактеризовать качество производимой карбоновой пасты и определить спектр ее применения, а также охарактеризовать качество технологического оборудования, которое применяется для ее производства.

Для изготовления карбоновой пасты использовалось запатентованное устройство гомогенизации полидисперсных систем [10], конструкция которого представлена на рисунке.

Перечень элементов управления: K1 – K4 – клапаны управления вводом, выводом и перемешиванием основного состава карбоновой пасты; N1 – насос-гомогенизатор; N2 – двигатель управления блоком измельчения и диспергизации; V1 – вентилятор для управления воздушно-порошковой смесью; Z1 – щит управления скоростью насосов и вентилятора; K5 – K7 – клапаны управления количеством ультрадисперсных металлических частиц, M1 – устройство контроля за давлением в блоке подачи ультрадисперсных частиц; Z2 – логическое устройство управления технологическим процессом; G1 – высоковольтный блок; Z3 – источник высоковольтного напряжения.



Конструкция гомогенизатора полидисперсных систем:

1 – смесительный блок; 2 – блок измельчения и диспергирования;  
3 – блок подачи ультрадисперсных частиц в термоактивную фазу

*Краткое писание работы установки гомогенизации полидисперсных систем.* В смесительный блок с помощью насоса-гомогенизатора подается базовый состав карбоновой пасты, состав зависит от величины удельного сопротивления, которое необходимо получить. В блоке измельчения и диспергирования происходит дополнительное дробление частиц функциональной фазы и их перемешивание. В блоке подачи ультрадисперсных частиц в термоактивную фазу создается воздушно-порошковая смесь, которая движется по замкнутому кругу; проходя через высоковольтный блок, частицы заряжаются и притягиваются к базовому составу пасты; количество внедренных в основной состав ультрадисперсных частиц определяется величиной заряда. Меняя величину подаваемого напряжения, можно не только регулировать величину удельного сопротивления, но и управлять коэффициентом термического сопротивления.

#### Результаты исследования и их обсуждение

Для сравнительного исследования были изготовлены образцы резистивных элементов с разным номиналом: из карбоновой пасты, приготовленной на установке гомогенизации полидисперсных систем (**образец И1**), из пасты российских производителей (образцы Р1 и Р2), из пасты китайских производителей (образец К1), из пасты японских производителей (образец Я1). Испытывались образцы номиналом до 30 Ом/квadrat, до 1 кОм/квadrat и до 100 кОм/квadrat. Каждого номинала было изготовлено по 100 образцов, результаты исследований были статистически обработаны и систематизированы. Авторами исследовалось отклонение сопротивления от номинального значения, это характеризует равномерность распространения основных компонентов в пасте. Результаты исследования представлены в таблице, где под цифрой 1 приводится среднестатисти-

ческое отклонение от номинального сопротивления при изготовлении.

Под цифрой 2 представлено среднестатистическое отклонение от номинального сопротивления после воздействия температуры в 40°C в течение 24 часов, под цифрой 3 – после воздействия температуры в 60°C в течение 24 часов (60°C – максимальная температура использования карбоновых паст российских и зарубежных производителей), под цифрой 4 – после воздействия температуры в 100°C в течение 1,5 часов.

Под цифрой 5 представлено начальное значение ТКС образца (значение представлено в  $10^{-4} 1/K^{\circ}$ ), под цифрой 6 – после воздействия постоянным и переменным напряжением величиной 220 В.

Под цифрой 7 представлено среднестатистическое отклонение от номинального сопротивления после воздействия атмосферы в течение 48 часов с высокой относительной влажностью ( $93 \pm 0,2\%$ ), под цифрой 8 – после выдержки на открытом воздухе при воздействии прямых солнечных лучей в течение 48 часов, под цифрой 9 – после механического воздействия в виде изгиба (радиус изгиба до 20 мм).

Под цифрой 10 показано среднестатистическое отклонение от номинального сопротивления после циклов термоциклирования: нагрев до 60°C, охлаждение до 20°C.

Под цифрой 11 показан результат сохранения топологического рисунка после нахождения пасты более 4 часов в емкости на открытом воздухе и под цифрой 12 – после нахождения пасты 0,5 ч на трафаретной сетке.

При термическом воздействии в резистивных элементах возникают деградиационные процессы, микродефекты, образуются или прерываются связи между функциональными элементами. При воздействии постоянным и переменным током происходят разрушение и образование токоведущих мостиков, это оказывает негативное влияние на электрофизические характеристики резистивных элементов [11].

Результаты исследования резистивных карбоновых элементов разных производителей

Наименование	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Образец Р1	6,7	0,8	8,7	30	2,4	2,8	0	1,2	5	-28,1	нет	нет
Образец Р2	8,2	0,8	8,0	28	2,4	3,1	0	1,6	6	-22,3	нет	нет
Образец К1	5,4	0,4	5,5	16	3,2	3,5	0	2,2	0	-16,7	нет	нет
Образец Я1	3,7	0,6	6,1	14,5	3,5	4,1	0	3,4	0	-7,1	нет	нет
<b>Образец И1</b>	2,7	0,2	4,9	11,4	2,9	2,9	0	0	0	+2,4	да	да

При одинаковых электрических сопротивлениях при длительной эксплуатации количество микродефектов зависит от технологических режимов производства резистивных паст: чем выше технологический уровень производства, тем шире область их применения [12]. Проведенные исследования показали, что разработанное оборудование позволяет производить карбоновую пасту с лучшими техническими и электрофизическими характеристиками по сравнению с отечественными и зарубежными производителями. При этом у производимой пасты появляются новые эксплуатационные характеристики, которые дают неоспоримое преимущество при организации серийного производства. При производстве резистивных элементов необходимо обновлять пасту на трафаретной сетке через каждые 30 минут, если не выполнить данной операции, то будет производиться брак. Аналогичная ситуация происходит при использовании пасты из емкости, где она хранится. Если пасту не использовать за 4 часа, то остатки пасты также уходят в брак. После обработки пасты в представленной установке из нее полностью удаляется кислород, и жизнеспособность пасты увеличивается в несколько раз.

### Заключение

Отсутствие технологического оборудования, которое обеспечивало бы достаточную степень однородности распределения химических элементов и фаз по объему гетерофазной системы, приводит к образованию локальных дефектов в толсто пленочных электронных компонентах и к неравномерному нагреву поверхности толсто пленочных резисторов при протекании через них электрического тока. Для устранения данного недостатка толсто пленочные пассивные электронные компоненты и толсто пленочные резистивные нагревательные элементы изготавливаются за несколько операций, состоящих из поочередного нанесения слоев и их термообработки, что существенно усложняет технологический процесс производства и увеличивает себестоимость продукции. С появлением нового технологического процесса и запатентованного технологического оборудования перед российскими производителями электронной и электротехнической продукции открываются возможности по вне-

дрению новых устройств, которые смогут конкурировать с зарубежными аналогами. Проведенные исследования показали, что оборудование позволяет производить карбоновую пасту с лучшими электрофизическими и реологическими характеристиками. Данное оборудование может производить продукцию серийно и с высоким качеством, что позволяет внедрять его в серийный производственный процесс.

### Список литературы

1. Chemicals And Materials Market Research Report [Электронный ресурс]. URL: <https://www.marketresearchfuture.com/categories/chemicals-market-report?page=3> (дата обращения: 22.05.2024).
2. Semiconductor Materials Market [Электронный ресурс]. URL: <https://www.marketresearchfuture.com/reports/semiconductor-materials-market-8605> (дата обращения: 22.05.2024).
3. Рупосов В.Л., Шелехов И.Ю. Подходы к экономической оценке новых нагревательных приборов. Иркутск: Изд-во ИРНТУ, 2015. 174 с.
4. Чижик С.А. Нанотехнологии и аддитивные технологии как технологии «снизу-вверх» В книге: Методологические аспекты сканирующей зондовой микроскопии: Сборник докладов XII Международной конференции / Под редакцией С.А. Чижика. 2016. С. 18-20.
5. Иванников В.П., Кабакова А.В. «Нанотехнологии» в сфере микроэлектроники и нанозлектроники. Возможности и ограничения // Управление техносферой. 2023. Т. 6, № 1. С. 66-92.
6. Zhuo Cao E., Koukharenko M.J., Tudor R.N. Flexible screen printed thermoelectric generator with enhanced processes and materials // Sensors and Actuators A. 2016. P. 196–206.
7. Schubert M., Munch C., Schuurman S. Novel Method for NTC Thermistor Production by Aerosol Co-Deposition and Combined Sintering // Sensors (Basel). 2019. Vol. 19 (7). P. 1632. DOI: 10.3390/s19071632.
8. Кошкин С.С., Кузьменко А.П., Бельских Г.Н., Мин Тан М. Структура и свойства толсто пленочных многослойных терморезистивных покрытий из многофункциональных дисперсных наполнителей // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2019. Т. 9, № 2 (31). С. 108–121.
9. Мисуркин И.А. Механизм электропроводности в молекулярных системах и полимерных наноккомпозитах // Журнал физической химии. 2011. Т. 85, № 12. С. 23-37.
10. Шелехов И.Ю. Устройство гомогенизации полидисперсных систем // Евразийский Патент на изобретение № 046266. Патентообладатель ООО «Промышленные Технологические Инновации». 2024. Бюл. Евразийского патентного ведомства № 2/2024.
11. Степанов С.В., Гуськов Ю.В. Прогнозирование надежности постоянных резисторов // Современные и информационные технологии в социальной сфере: сборник научных трудов III Всероссийской научно-практической конференции. Чебоксары, 2023. С. 240-242.
12. Кузанын М.С., Леухин В.Н., Шабдаров Е.В. Разработка средств измерения ТКС резисторов экспресс-методом // Наука и инновации – 2016. ISS SI – 2016: материалы Одиннадцатой международной научной школы. Йошкар-Ола, 2016. С. 109–113.