

на силумины, изготавливаемые из лома и отходов.

#### Библиографический список

1. Структурообразование доэвтектических силуминов после воздействия на расплав электрического тока / С. С. Петров, А. Г. Пригунова, С. В. Пригунов // МТОМ. – 2006. – № 4. – С. 43-52.
2. Заявка на винохід. Спосіб виробництва ливарних сплавів на основі алюмінію № 2011 01616 від 22.02.2011,- № 5119/3А/11/ Петров С. С., Пригунов С. В., Пригунова А. Г., Ключник Д. М.
3. К вопросу о механизме модифицирования силуминов обработкой расплавов электрическим током / С. С. Петров, А. Г. Пригунова, С. В. Пригунов // МТОМ. – 2007. – № 4. – С. 26-33.
4. Структурные и фазовые превращения в си-

лумах под воздействием жидкофазной обработки электрическим током / С. С. Петров, А. Г. Пригунова, С. В. Пригунов, Д. М. Ключник // Металлофизика и новейшие технологии. – 2008. – Т. 30. – № 8. – С. 1129-1137.

5. Структурные превращения в расплавах силуминов при жидкофазной обработке постоянным импульсным электрическим током / С. С. Петров, А. Г. Пригунова, С. В. Пригунов // Тр. XIII Российской конференции «Строение и свойства металлических и шлаковых расплавов». - Екатеринбург: Уральский центр академического обслуживания, 2011. - Т. 4. - С. 165-168.

Поступила 31.01.2014



УДК 621.762:669.2

Наука

Пинчук С. И. /д. т. н./, Внуков А. А.  
НМетАУ

## Структура и свойства изделий из электролитических медных порошков, синтезированных по традиционной и оптимизированной технологиям

*Проведен сравнительный анализ физических и механических свойств спеченных конструкционных электроконтактных материалов, произведенных из различных типов медного электролитического порошка. Исследовано влияние размера, а также состояния и морфологии поверхности частиц электролитического медного порошка на прочность, пористость, твердость и удельное электросопротивление спеченных медных электроконтактных материалов. Ил. 2. Табл. 3. Библиогр.: 6 назв.*

**Ключевые слова:** медный порошок, электроконтактный материал, химическая стабильность, морфология поверхности, структура, спекание, прессование, физико-механические свойства, пористость, электросопротивление, прочность, твердость

*Comparative analysis of the physical and mechanical properties of sintered electrical-engineering materials produced from various types of electrolytic copper powder is fulfilled. Influence of particles size, condition and morphology of their surface of electrolytic copper powder on strength, porosity, hardness and electrical resistivity of sintered copper electrocontact materials is analyzed.*

**Keywords:** copper powder, electrocontact material, chemical stability, morphology of surface, structure, sintering, pressing, physico-mechanical properties, porosity, electrical resistivity, strength, hardness

#### Постановка проблемы

На свойства спеченных порошковых материалов и изделий существенное влияние оказывают их макро- и микроструктура, формирование которых происходит либо без расплавления основного компонента твердой фазы, либо при наличии ограниченного объема жидкой фазы. Структурообразование таких материалов происходит под воздействием многих факторов, важнейшие из которых: методы формования, температуры, скорости нагрева и длительности спекания, скорости охлаждения после спекания, составы защитных сред, режимы термической обработки и др. В значительной степени макро- и микроструктура материалов

зависит не только от названных факторов их формирования, но и от условий синтеза и свойств металлических порошков [1].

Наряду с такими важными свойствами как химический состав, дисперсность, распределение и количественное соотношение фаз, размеры зерен, на механические и физико-химические свойства изделий из металлических порошков большое влияние оказывают также форма их частиц, величина межчастичных контактов и пористость спеченного материала, являющаяся самостоятельным структурным фактором.

Структурными составляющими спеченных порошковых материалов являются металлическая

фаза, неметаллические включения (графит, оксиды и т. п.) и поры. Влияние свойств металлических порошков на структуру спеченных порошковых материалов неоднозначно и проявляется в различной мере в зависимости от особенностей технологических процессов получения материалов и изделий из них [1, 2].

Так, форма и окисленность поверхности частиц определяют качество формовок и особенности формирования структуры спеченного материала на контактных поверхностях частиц порошка. Причем, происходит это на всех этапах технологического процесса получения порошковых изделий.

Увеличение размеров частиц приводит к формированию крупнозернистой структуры с большими порами неправильной формы. Увеличение дисперсности порошков активизирует процессы массопереноса при спекании и обеспечивает получение более плотной, т. е. менее пористой, структуры, что может приводить к повышению содержания в материале неметаллических включений в связи с повышенной окисленностью исходного порошка [3].

Основным промышленным способом синтеза порошков меди является электролитический. Он позволяет получать химически чистые медные порошки с уникальными и стабильными свойствами. Однако они имеют и ряд недостатков: невысокую насыпную плотность, чрезвычайно низкую текучесть, а также достаточно большие размеры частиц (50-200 мкм). А для изготовления спеченных изделий с повышенными механическими и эксплуатационными свойствами необходимы медные порошки с размером частиц  $\leq 20$  мкм. Особенно важным это является при производстве спеченных материалов электротехнического назначения на основе меди.

Поэтому актуальным является применение для синтеза медных порошков электролитическим методом новых эффективных технологий, оптимизированных, в том числе за счет введения в электролит специальных функциональных добавок.

**Цель и задача исследований**

Цель исследований – получение спеченных конструктивных электроконтактных материалов с повышенными эксплуатационными характеристиками из медного электролитического порошка, синтезированного по оптимизированной технологии.

Задача исследований – изучить влияние размеров, морфологии поверхности, а также степени окисленности частиц электролитического медного порошка на структуру и комплекс физико-механических свойств спеченных конструктивных электроконтактных материалов.

**Результаты исследований**

Для оценки эффективности разработанной технологии синтеза электролитического медного порошка исследованы эксплуатационные свойства спеченного из него материала в сопоставлении с физическими и механическими свойствами спеченных электроконтактных материалов из других типов электролитических медных порошков, при-

меняемых в порошковой металлургии. Для исследований были изготовлены конструкционные электротехнические материалы, применяемые для производства порошковых токоъемных контактов типа КМК-Б00 из электролитического медного порошка. Такие материалы используют в производстве контроллеров и контакторов, работающих при токовых нагрузках более 100 А и напряжениях до 1000 В, а также для производства дугогасительных контактов [4].

Для изготовления экспериментальных образцов были использованы три типа электролитических медных порошков.

Тип I – порошок медный электролитический марки ПМС-1 (ГОСТ 4960-75), выпускаемый украинскими производителями.

Тип II – порошок медный электролитический марки ПМС-1 (ГОСТ 4960-75), выпускаемый российскими производителями.

Тип III – порошок медный электролитический, полученный по разработанной технологии, оптимизированной в соответствии с результатами исследований [5]. Для повышения химической стабильности порошка в электролит при его синтезе вводили бензотриазол (БТА). Для уменьшения размеров частиц порошка до 10-15 мкм концентрацию медного купороса в электролите уменьшили с 40 до 10 г/л. Отдельные операции стабилизации и промывки порошка были исключены.

Свойства электролитических порошков меди приведены в табл. 1, 2.

**Таблица 1. Химический состав медных порошков**

Тип порошка	Содержание, %						
	Cu	Fe	Pb	As	Sb	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	O <sub>2</sub>
I	99,5	0,018	0,05	0,003	0,005	0,01	0,20
II	99,5	0,021	0,04	0,004	0,005	0,02	0,40
III	99,6	0,056	0,05	0,004	0,015	0,01	0,09

**Таблица 2. Технологические свойства медных порошков**

Тип порошка	Насыпная плотность, г/см <sup>3</sup>	Текучесть, с	Содержание фракции, мкм (%)		
			63-100	45-63	< 45
I	1,25-1,90	36	5	95	-
II	1,25-1,90	36	5	95	-
III	2,00-2,30	27	-	10,2	89,8

Для изготовления экспериментальных спеченных образцов применяли стандартную технологическую схему с однократным холодным пресованием при давлении 500 МПа и спеканием в водороде при температуре 850 °С в течение 2 ч. При этом наблюдали строгую идентичность режимов прессования и спекания образцов из всех приведенных выше типов электролитических медных

порошков.

Оценивали следующие свойства образцов спеченных материалов:

- пористость;
- прочность на разрыв;
- прочность на изгиб;
- твердость по Бринеллю;
- удельное электросопротивление.

Определение плотности и пористости сформованных и спеченных изделий регламентировано ГОСТ 18898-89 и предусматривает применение расчетного и гидростатического методов. Может быть применен металлографический метод (ГОСТ 9391-80). Для расчета общей пористости спеченных электроконтактных материалов на основе меди использовали расчетный метод, подтвержденный металлографическими исследованиями.

Определение прочности на разрыв производили в соответствии с ГОСТ 18227-85 (СТ СЭВ 4653-84). Форма и размеры образцов после механической обработки соответствовали требованиям ГОСТ 1497-84.

Предел прочности на изгиб, в соответствии с ГОСТ 18228-72, определяли, испытывая специально изготовленные образцы прямоугольного сечения на универсальной испытательной машине (ГОСТ 7855-68).

Испытание образцов на твердость по Бринеллю производили согласно ГОСТ 9012-59 (СТ СЭВ 468-88) вдавливанием стального шарика диаметром  $D = 10$  мм под действием нагрузки  $P = 10\ 000$  Н в течение 20 с.

Для оценки удельного электрического сопротивления спеченных образцов (согласно ГОСТ 25947) через них пропускали постоянный электрический ток и определяли падение напряжения на определенном участке длины образцов. В соответствии с ГОСТ 20559 изготовили экспериментальные спеченные образцы прямоугольного сечения из указанных трех типов порошков меди.

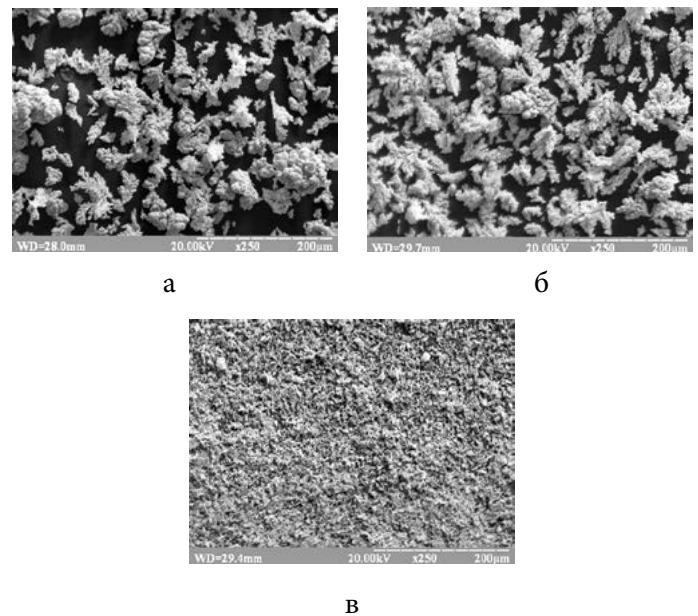
В табл. 3 приведены результаты определения свойств спеченных электроконтактных материалов, полученных из электролитического порошка меди различных типов.

**Таблица 3. Эксплуатационные характеристики спеченных конструкционных электроконтактных материалов**

Свойства материалов	Тип медного порошка		
	I	II	III
Пористость $P$ , %	9-11	8-10	7-8
Плотность $\gamma$ , г/см <sup>3</sup>	8,6	8,7	8,7
Удельная электропроводность $\rho$ , мкОм•м	0,04	0,02	0,015
Относительное удлинение $\delta$ , %	15	17	19
Прочность на разрыв $\sigma_B$ , МПа	150	210	290
Прочность на изгиб $\sigma_{изг}$ , МПа	220	280	350
Твердость по Бринеллю НВ	55	65	80

Согласно приведенным данным, наивысшим уровнем механических и физических свойств обладает спеченный электроконтактный материал, изготовленный из порошка меди, синтезированного по оптимизированной технологии. Несмотря на то, что уровень пористости и плотности у исследуемых материалов отличается незначительно, прочностные характеристики, а также удельная электропроводность электроконтактных материалов из порошка меди, синтезированного по разработанной нами технологии, значительно выше. Это обусловлено структурой полученного спеченного материала, формирование которой в значительной степени зависит от размера и формы его частиц порошка меди, а также от его химической стабильности.

На рис. 1 представлена морфология поверхности частиц порошков меди перед изготовлением из них спеченных электроконтактных материалов.

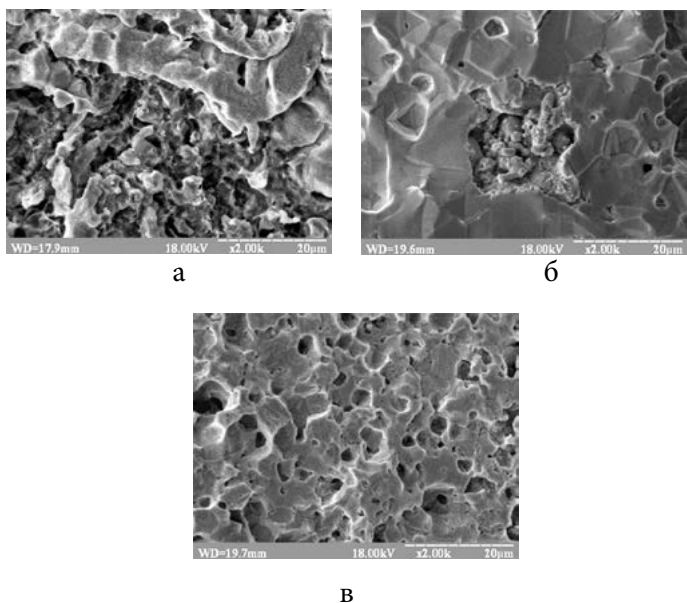


**Рис. 1. Морфология поверхности частиц медных электролитических порошков: тип I (а), тип II (б), тип III (в)**

Частицы порошков меди типов I и II имеют ярко выраженную дендритную форму со средним размером частиц  $\sim 70$  мкм. Такая форма частиц с хорошо развитыми ветвями дендритов и значительным междендритным расстоянием обуславливает невысокую текучесть и насыпную плотность медных порошков данных типов. Порошок, синтезированный по оптимизированной технологии, обладает значительно меньшим средним размером частиц ( $\sim 5-7$  мкм). Частицы после размолва имеют форму, близкую к осколочной, за счет чего порошок обладает высокой текучестью и насыпной плотностью по сравнению с порошками типов I и II. При этом показатели прессуемости и формуемости порошка типа III также высоки.

Исследования показали, что медный порошок типа I не обладает необходимой химической стабильностью и быстро темнеет на воздухе после вскрытия упаковочной тары [6]. Большое количество кислорода в порошке негативно влияет на процессы, протекающие при формовании и спекании изделий из него. Кислород содержится в порошке данного типа преимущественно в виде оксида меди I. Высокое содержание данного оксида в порошке меди снижает его прессуемость, формуюемость, а также прочность сырых прессовок. Кроме того, затрудняется процесс спекания, так как водород, применяемый в качестве защитной атмосферы, не обеспечивает полного восстановления больших количеств оксида меди. В результате структура спеченного материала становится неоднородной, а в некоторых участках его объема наблюдается «непропекание», что в конечном итоге является причиной снижения механических свойств.

На рис. 2 приведены фотографии микроструктур спеченных электроконтактных материалов из различных электролитических медных порошков.



**Рис. 2. Структура спеченных электроконтактных материалов, полученных из электролитических порошков меди типов I (а), II (б), III (в)**

Структура спеченного материала, полученного из порошка меди, синтезированного по разработанной технологии, характеризуется высокой степенью однородности распределения структурных составляющих, т. е. зерен меди и пор. Структура этого материала отличается значительно меньшим размером зерен по сравнению со структурой материалов, полученных из порошков типов I и II. Установленные характеристики порошков, синтезированных по различным технологиям, имеют чрезвычайно важное значение для получения требуемого высокого уровня эксплуатационных свойств спеченных материалов.

## Выводы

1. Электролитический порошок меди, синтезированный по оптимизированной технологии, обладает значительно меньшим средним размером частиц по сравнению с порошками, синтезированными по традиционной технологии. Форма его частиц близка к осколочной. Порошок обладает высокой текучестью и насыпной плотностью.

2. Наивысшим уровнем механических и физических свойств обладает спеченный электроконтактный материал, изготовленный из порошка меди, синтезированного по оптимизированной технологии. Это обусловлено структурой полученного спеченного материала, которая характеризуется значительно меньшим размером и высокой степенью однородности распределения структурных составляющих.

3. Для промышленного производства спеченных электроконтактных материалов на основе меди следует рекомендовать использование электролитического медного порошка, полученного по разработанной оптимизированной технологии.

## Библиографический список

1. Радомысельский И. Д., Сердюк Г. Г., Щербань Н. И. Конструкционные порошковые материалы. – К.: Техника, 1985. – 152 с.
2. Давыденкова А. В., Радомысельский И. Д. Технология получения и свойства конструкционных деталей из медных порошков // Порошковая металлургия. – № 3. – 1982. – С. 44-53.
3. Гегузин Я. Е. Физика спекания. – М.: Наука, 1984. – 360 с.
4. Металлические порошки и порошковые материалы: Справочник. Б. Н. Бабич, Е. В. Вершинина, В. А. Глебов и др.; под. ред. Ю. В. Левинского. – М.: ЭКОМЕТ, 2005. – 520 с.
5. Пат. на корисну модель № 56876 МПК С 25 С 5/00. Спосіб одержання мідного порошку / Внуков О. О., Чигиринець О. Е., Рослик І. Г., Гальченко Г. Ю., Кабацька В. В.; заявник Внуков О. О., Чигиринець О. Е., Рослик І. Г., Гальченко Г. Ю., Кабацька В. В.; власник НМетАУ. – № у 201009579; заявл. 30.07.2010; опубл. 25.01.2011, Бюл. № 2.
6. Пинчук С. И., Внуков А. А. Влияние функциональных добавок в электролит на химическую стабильность медных порошков // Металлург. и горноруд. пром-сть. – 2013. – № 6. – 85-89.

**Поступила 27.01.2014**