

УДК 621.762:669.23

ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ ЦИРКУЛЯЦИИ ЭЛЕКТРОЛИТА НА СВОЙСТВА ДИСПЕРСНОЙ ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКОЙ МЕДИ

ВНУКОВ А. А.^{1*}, к. т. н.,
ГОЛОВАЧЕВ А. Н.², к. т. н., доц.,
БЕЛАЯ А. В.³, к. т. н.

^{1*} Кафедра покрытий, композиционных материалов и защиты металлов, Национальная металлургическая академия Украины, пр. Гагарина, 4, 49600, г. Днепропетровск, Украина, тел. +38-050-138-33-59, e-mail: alvnukov@yandex.ru, ORCID: 0000-0002-1888-1200.

² Кафедра электрометаллургии, Национальная металлургическая академия Украины, пр. Гагарина, 4, 49600, г. Днепропетровск, Украина, тел. +38-095-201-44-40, e-mail: 380952014440@ya.ru, ORCID 0000-0002-4813-6586.

³ Кафедра покрытий, композиционных материалов и защиты металлов, Национальная металлургическая академия Украины, пр. Гагарина, 4, 49600, г. Днепропетровск, Украина, тел. +38-050-504-66-11, e-mail: belaya_alena@mail.ru, ORCID 0000-0001-8574-6853.

Аннотация. Постановка проблемы. Получение химически стабильного электролитического порошка меди с регулируемой формой и размерами частиц, с требуемыми структурными, физическими и функциональными свойствами. **Методика.** Процесс электролитического осаждения дисперсной меди вели с использованием медного растворимого анода и медного катода. Состав электролита: 130 г/л H_2SO_4 + 40 г/л $CuSO_4$; форма катода – пластина; время электролиза – 1 ч. Экспериментальные исследования проводили в соответствии с планом полного факторного эксперимента (ПФЭ) 2³, а также с применением корреляционно-регрессионного анализа. Средний размер частиц определяли с применением метода оптической микроскопии, насыпную плотность порошка – в соответствии с ISO 3923-1; морфологию частиц – с использованием средств растровой электронной микроскопии. **Результаты.** По результатам экспериментов получены полиномиальные модели, которые адекватно описывают установленные взаимосвязи параметров. Наиболее значимыми факторами являются скорость циркуляции и температура рабочей среды, а также плотность тока. Установлено наличие синергетического эффекта совместного влияния температуры и скорости циркуляции. При одновременном увеличении этих параметров наблюдается значительное укрупнение частиц порошка меди и повышение насыпной плотности. С повышением скорости циркуляции электролита средний размер частиц увеличивается. При этом зависимость среднего размера частиц от скорости циркуляции носит практически линейный характер, а форма частиц изменяется от мелкокристаллической с хорошо развитыми дендритами до крупнокристаллической со сглаженными ветвями. **Научная новизна.** Впервые определены закономерности совместного влияния технологических факторов процесса электролиза (плотности тока, температуры и скорости циркуляции электролита, шероховатости поверхности катода и межкатодного расстояния) на морфологию частиц и свойства медного порошка. **Выводы.** Определены оптимальные уровни основных технологических параметров электроосаждения дисперсной меди с целью обеспечения заданных регулируемых характеристик медного электролитического порошка и расширения областей его применения.

Ключевые слова: медный порошок, скорость циркуляции, электроосаждение, плотность тока, морфология частиц, размер частиц

ВПЛИВ ШВИДКОСТІ ЦИРКУЛЯЦІЇ ЕЛЕКТРОЛІТУ НА ВЛАСТИВОСТІ ДИСПЕРСНОЇ ЕЛЕКТРОЛІТИЧНОЇ МІДІ

ВНУКОВ О. О.¹, к. т. н.,
ГОЛОВАЧОВ А. М.², к. т. н., доц.,
БІЛА О. В.³, к. т. н.

^{1*} Кафедра покриттів, композиційних матеріалів та захисту металів, Національна металургійна академія України, пр. Гагаріна, 4, 49600, м. Дніпропетровськ, Україна, тел. +38-050-138-33-59, e-mail: alvnukov@yandex.ru, ORCID: 0000-0002-1888-1200.

² Кафедра електрометалургії, Національна металургійна академія України, пр. Гагаріна, 4, 49600, м. Дніпропетровськ, Україна, тел. +38-095-201-44-40, e-mail: 380952014440@ya.ru, ORCID 0000-0002-4813-6586.

³ Кафедра покриттів, композиційних матеріалів та захисту металів, Національна металургійна академія України, пр. Гагаріна, 4, 49600, м. Дніпропетровськ, Україна, тел. +38-050-504-66-11, e-mail: belaya_alena@mail.ru, ORCID 0000-0001-8574-6853.

Анотація. Постановка проблеми. Одержання хімічно стабільного електролітичного порошку міді з регульованою формою і розмірами частинок, з необхідними структурними, фізичними і функціональними властивостями. **Методика.** Процес електролітичного осадження дисперсної міді вели з використанням мідного розчинного анода і мідного катода.

Склад електроліту: 130 г/л H_2SO_4 + 40 г/л $CuSO_4$; форма катода – пластина; час електролізу – 1 год. Експериментальні дослідження проводили відповідно до плану повного факторного експерименту (ПФЕ) 2^3 , а також із застосуванням кореляційно-регресійного аналізу. Середній розмір частинок визначали із застосуванням методу оптичної мікроскопії, насипну щільність порошку – відповідно до ISO 3923-1; морфологію частинок – із використанням засобів растрової електронної мікроскопії. **Результати.** За результатами експериментів отримано поліноміальні моделі, що адекватно описують установлені взаємозв'язки параметрів. Найбільш значимими факторами є швидкість циркуляції і температура електроліту, а також густина струму. Встановлено наявність синергетичного ефекту спільного впливу температури і швидкості циркуляції. У разі одночасного збільшення цих параметрів спостерігається значне укрупнення частинок порошку міді і підвищення насипної щільності. З підвищенням швидкості циркуляції електроліту середній розмір частинок збільшується. При цьому залежність середнього розміру частинок від швидкості циркуляції має практично лінійний характер, а їх форма змінюється від дрібнокристалічної з добре розвинутими дендритами до крупнокристалічної зі згладженими гілками. **Наукова новизна.** Уперше визначено закономірності спільного впливу технологічних факторів процесу електролізу (густини струму, температури і швидкості циркуляції електроліту, шорсткості поверхні катода і міжкатодної відстані) на морфологію частинок і властивості мідного порошку. **Висновки.** Визначено оптимальні рівні основних технологічних параметрів електроосадження дисперсної міді з метою забезпечення заданих регульованих характеристик мідного електролітичного порошку і розширення галузей його застосування.

Ключові слова: мідний порошок, швидкість циркуляції, електроосадження, густина струму, морфологія частинок, розмір частинок

INFLUENCE OF ELECTROLYTE CIRCULATION RATE PROPERTIES OF DISPERSE ELECTROLYTIC COPPER

VNUKOV A. A.^{1*}, *Cand. Sc. (Tech.),*
GOLOVACHOV A. N.², *Cand. Sc. (Tech.),*
BELAYA A. V.³, *Cand. Sc. (Tech.)*

^{1*} Coatings, composite materials and metal protection department, National metallurgical academy of Ukraine, Gagarin av., 4, 49600, Dnipropetrovsk, Ukraine, tel. +38-050-138-33-59, e-mail: alynukov@yandex.ru, ORCID: 0000-0002-1888-1200.

² Department of electrometallurgy, National metallurgical academy of Ukraine, Gagarin av., 4, 49600, Dnipropetrovsk, Ukraine, tel +38-095-201-44-40, e-mail: 380952014440@ya.ru, ORCID 0000-0002-4813-6586.

³ Coatings, composite materials and metal protection department, National metallurgical academy of Ukraine, Gagarin av., 4, 49600, Dnipropetrovsk, Ukraine, tel +38-050-504-66-11, e-mail: belaya_alena@mail.ru, ORCID 0000-0001-8574-6853.

Annotation. Raising of problem. Synthesis of a chemically stable electrolytic copper powder with controlled particle size and shape, the desired structural, physical and functional properties. **Methodology.** The process of copper electrolytic deposition were dispersed using a soluble copper anode and copper cathode. The electrolyte composition: 130 g/l H_2SO_4 + 40 g/l $CuSO_4$; form cathode – plate; electrolysis time – 1 hour. Experimental studies were carried out in accordance with the plan of full factorial experiment (FFE) 2^3 , as well as with the use of regression analysis. The average particle size was determined using optical microscopy method, a bulk density of the powder – under ISO 3923-1; particle morphology – with the use of scanning electron microscopy. **Findings.** According to the results of experiments obtained polynomial models that adequately describe the relationship established parameters. The most important factors are the circulation speed and temperature of the electrolyte and the current density. The presence of a synergistic effect of the temperature and circulation speed joint influence. When simultaneous increase of these parameters there is a significant coarsening of copper powder particles and increase bulk density. With increasing rate electrolyte circulation average particle size increases. The dependence of the average particle size of the circulation rate is almost linear, and the shape is changed from fine-grained particles with well developed dendrites to macrocrystalline with smoothed branches. **Originality.** First defined patterns combined influence of electrolysis process technological factors (current density, temperature and circulation speed of the electrolyte, the surface roughness of the cathode and distance between cathodes) on particle morphology and properties of the copper powder. **Conclusions.** The optimal levels of the main disperse copper electrodeposition technological parameters was indicated to provide the specified characteristics of controlled electrolytic copper powder and the expansion of application areas.

Keywords: copper powder, circulation rate, electrodeposition, current density, particle morphology, particle size

Постановка проблемы

Одним из наиболее эффективных способов производства порошка меди является электролиз водных растворов. Он позволяет эффективно влиять на свойства дисперсного осадка путем варьирования технологическими режимами электрокристал-

лизации. Одним из таких параметров является скорость циркуляции электролита [1; 2; 14].

Циркуляцию электролита применяют в электролитических ваннах с целью поддержания постоянной концентрации раствора у электродов и устранения концентрационной поляризации. Поэтому в ваннах с перемешиваемым электролитом можно получать плотные мелкозернистые гладкие

осадки при более высоких плотностях тока с повышенным выходом металла по току. Чем выше предполагаемая плотность тока, тем интенсивнее должно быть перемешивание электролита [3–5; 15].

Перемешивание растворов осуществляется механическими мешалками, циркуляционными насосами или сжатым воздухом, очищаемым перед подачей в ванну от масла и пыли в специальных фильтрах. Перемешивание сжатым воздухом можно применять в кислых медных ваннах, состав которых не меняется под действием кислорода и двуокиси углерода, содержащихся в воздухе.

Скорость циркуляции измеряется количеством литров электролита, протекающего через ванну в минуту. При получении медных порошков она колеблется в пределах 5...35 л/мин и зависит от применяемой плотности тока. Значение перемешивания электролита очень велико. Скорость циркуляции электролита определяет не только размер частиц порошка, но и его гранулометрический состав, а также форму отдельных частиц.

Механизмы влияния отдельных параметров электролиза, и в том числе скорости циркуляции электролита, на процессы структурообразования и свойства медного порошка изучены и представлены в ряде работ [6–9; 16]. Однако для возможности регулирования свойств порошка меди и эффективного управления процессами синтеза порошка с требуемыми и прогнозируемыми свойствами необходимо понимать механизмы совместного влияния основных параметров процесса электроосаждения на структуру и эксплуатационные свойства осадка.

В этой связи значительный интерес представляет вопрос о степени влияния параметров электролиза, т. е. количественной оценки их влияния, а также совместного действия различных факторов, при котором суммарный эффект превышает действие каждого из них в отдельности [10; 11]. Решение этих вопросов позволит оптимизировать режим электролиза и прогнозировать свойства электролитического порошка меди.

Цель и задача исследования

Цель исследования – получение химически стабильного электролитического порошка меди с регулируемой формой и размерами частиц, с требуемыми структурными, физическими и функциональными свойствами.

Задача исследований – оценить степень влияния циркуляции электролита на свойства медного катодного осадка в сравнении с другими технологическими параметрами процесса электролиза, а также определить эффективность использования циркуляции электролита как одного из основных факторов, позволяющих синтезировать

медный порошок с заданной морфологией поверхности и размером частиц.

Методика исследований

Процесс электролитического осаждения дисперсной меди вели с использованием медного растворимого анода и медного катода. Состав электролита: 130 г/л H_2SO_4 + 40 г/л $CuSO_4$; форма катода – пластина; время электролиза – 1 ч [10–12].

Экспериментальные исследования проводили в соответствии с планом полного факторного эксперимента (ПФЭ) 2^3 , а также с применением корреляционно-регрессионного анализа.

Средний размер частиц определяли с применением метода оптической микроскопии, насыпную плотность порошка – в соответствии с ISO 3923-1; морфологию частиц – с использованием средств растровой электронной микроскопии.

Результаты исследований

В первой серии опытов изучали совместное влияние на средний размер частиц (d_{cp} , мкм), и насыпную плотность порошка ($\gamma_{нас}$, г/см³) следующих факторов электролиза: скорость циркуляции электролита (v , л/мин); плотность тока (i , А/дм²); шероховатость поверхности катода (R_A , мкм).

Матрица плана эксперимента и результаты его реализации представлены в таблице 1.

Во второй серии экспериментов исследовали совместное влияние на средний размер частиц и насыпную плотность порошка: скорости циркуляции электролита; температуры электролита (t , °C); межэлектродного расстояния (l , мм).

Таблица 1

План и результаты эксперимента 1-й серии опытов / The plan and results of experiment in the first series of tests

№	Факторы			Функции отклика	
	i , А/дм ²	v , л/мин	R_A , мкм	$\gamma_{нас}$, г/см ³	d_{cp} , мкм
1	40	5	40	1,62	105
2	10	5	40	1,78	125
3	40	0	40	1,42	98
4	10	0	40	1,48	111
5	40	5	6	1,52	108
6	10	5	6	1,72	123
7	40	0	6	1,26	97
8	10	0	6	1,34	114
9	25	2,5	23	1,48	106

Матрица плана эксперимента и результаты его реализации представлены в таблице 2.

По результатам экспериментальных исследований синтезированы регрессионные модели, адекватно описывающие изучаемые зависимости [12]:

$$\eta = 78 + 2 \cdot v, \%; \quad (1)$$

$$\gamma_{нас} = 1,9 - 2,1 \cdot i + 3,2 \cdot v - 0,1 \cdot R_A - 0,01 \cdot i \cdot v - 0,004 \cdot R_A \cdot v, \text{ г/см}^3; \quad (2)$$

$$d_{cp} = 102 - 4,7 \cdot i + 8,7 \cdot v - 0,05 \cdot R_A - 0,08 \cdot i \cdot v - 0,007 \cdot R_A \cdot v, \text{ мкм}; \quad (3)$$

$$\eta = 81 + 2,3 \cdot v - 12,1 \cdot l, \text{ \%}; \quad (4)$$

$$\gamma_{нас} = 1,02 + 2,6 \cdot v + 5,2 \cdot t - 0,05 \cdot l - 0,02 \cdot v \cdot t, \text{ г/см}^3; \quad (5)$$

$$d_{cp} = 123 + 10,1 \cdot v + 3,2 \cdot t - 0,02 \cdot l - 0,01 \cdot v \cdot t, \text{ мкм}. \quad (6)$$

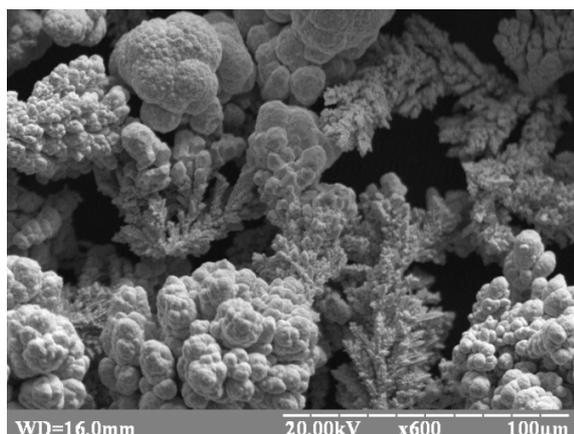
Таблица 2

План и результаты эксперимента 2-й серии опытов / The plan and results of experiment in the second series of tests

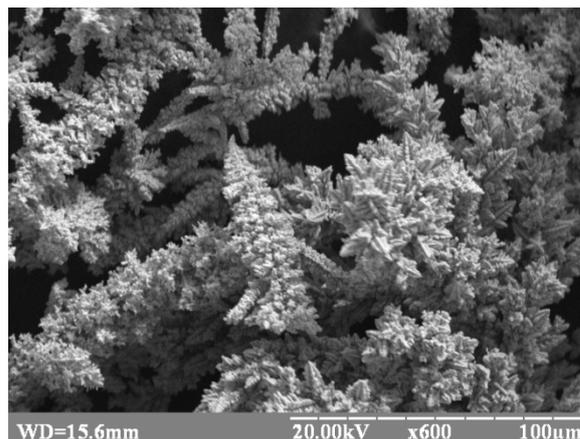
№	Факторы			Функции отклика	
	v, л/мин	t, °C	l, мм	$\gamma_{нас}$, г/см ³	d_{cp} , мкм
1	2	3	4	5	6
1	5	60	200	1,42	122
2	0	60	200	1,37	112
3	5	20	200	1,30	135
4	0	20	200	1,10	98
5	5	60	10	1,48	125
6	0	60	10	1,35	111
7	5	20	10	1,33	133
8	0	20	10	1,15	95
9	2,5	40	95	1,25	108

Как следует из приведенных зависимостей, наибольшее влияние на свойства, а также материальную эффективность процесса оказывают скорость циркуляции и температура электролита, а также плотность тока.

Повышение плотности тока до 40 А/дм² приводит к образованию порошка, содержащего большое количество частиц размером ≤ 20 мкм (рис. 1).



a

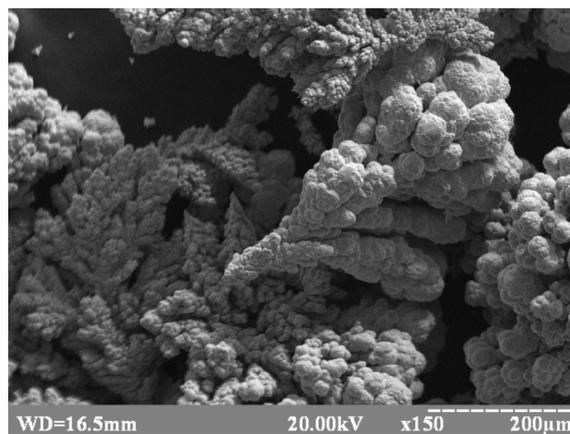


б (b)

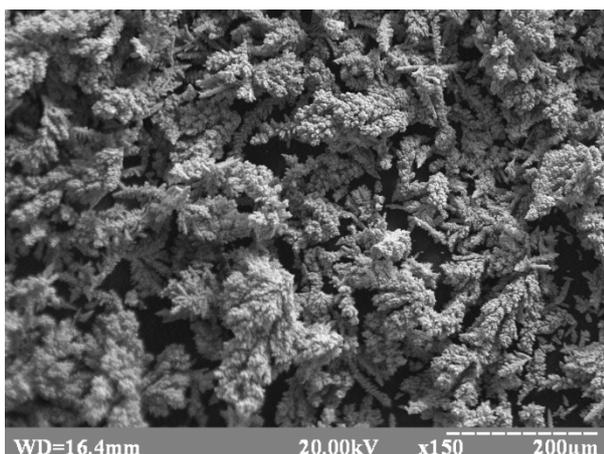
Рис. 1. Морфология частиц медного порошкового материала, синтезированного при плотностях тока 10 А/дм² (а) и 40 А/дм² (б), скорости циркуляции 2,5 л/мин, t = 20 °C, × 600 / The morphology of the copper powder material particles, synthesized at current densities of 10 А/дм² (a) and 40 А/дм² (b), the circulation speed 2,5 l/min, t = 20 °C, × 600

При высоких скоростях циркуляции образуются частицы порошка со слабо развитой поверхностью дендритов. Высокая плотность тока дает возможность получения порошка с хорошо развитой дендритной поверхностью. Синергетического эффекта влияния данных факторов на рассмотренные функции отклика не наблюдалось.

Повышение температуры приводит к увеличению среднего размера частиц и увеличению насыпной плотности. Однако, при значительном увеличении температуры (до 60 °C) осадки порошка получаются очень крупные и твердые, и выход годного для технологического применения порошка и производства спеченных изделий уменьшается (рис. 2).



a

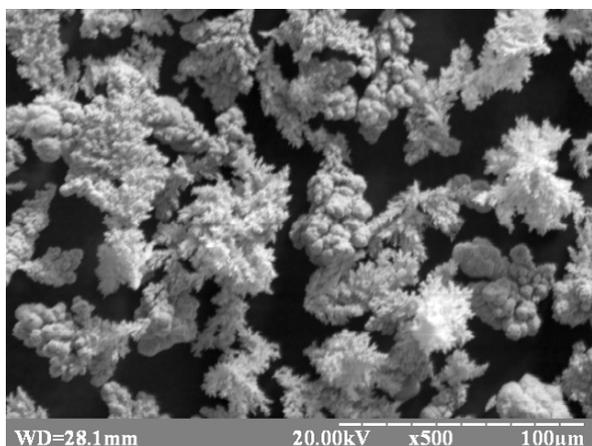


б (b)

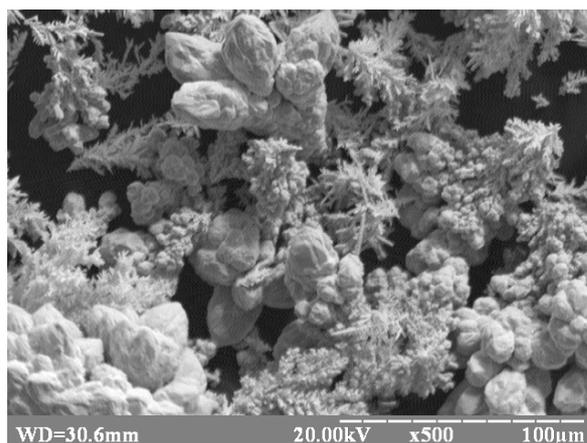
Рис. 2. Морфология частиц медного порошкового материала, синтезированного из электролитов с температурой 60 °С (а) и 20 °С (б) при плотности тока 10 А/дм² и скорости циркуляции 2,5 л/мин, × 150 / The morphology of the copper powder material particles, synthesized from the electrolytes with a temperature of 60 °С (a) and 20 °С (b) at a current density of 10 А/дм² and circulation speed 2,5 5 l/min, × 150

Данные результатов экспериментов, полученные с использованием средств математической статистики, подтверждаются экспериментальными исследованиями размера и морфологии частиц медного порошка при помощи средств оптической и растровой микроскопии (рис. 1 и 2) [12].

Наиболее существенным оказалось влияние на рассмотренные свойства порошка скорости циркуляции рабочей среды. Повышение скорости циркуляции приводит к уменьшению разности концентрации меди у катода и в глубине раствора. При этом количество разряжающихся ионов в прикатодном слое увеличивается, формирование и рост кристаллов происходит равномерно, частицы имеют грубозернистую структуру, а медный порошок – повышенную насыпную плотность (рис. 3).



а



б (b)

Рис. 3. Морфология частиц медного порошкового материала, синтезированного при скоростях циркуляции 1 л/мин (а) и 5 л/мин (б), плотности тока 10 А/дм² и температуре 20 °С, × 500 / Morphology of the copper powder material particles, synthesized in circulation speed 1 l/min (a) and 5 l/min (b) current density of 10 А/дм² and temperature of 20 °С, × 500

Снижение скорости циркуляции (вплоть до нулевой) приводит к образованию мелкокристаллического порошка с сильно развитой поверхностью частиц и характерным темным цветом (рис. 4). Такой порошок практически не пригоден для производства спеченных порошковых изделий с применением обычных способов формования и требует дополнительной обработки. Однако такой порошок благодаря своим характеристикам можно эффективно использовать в процессах химического синтеза, медицине и т. д.

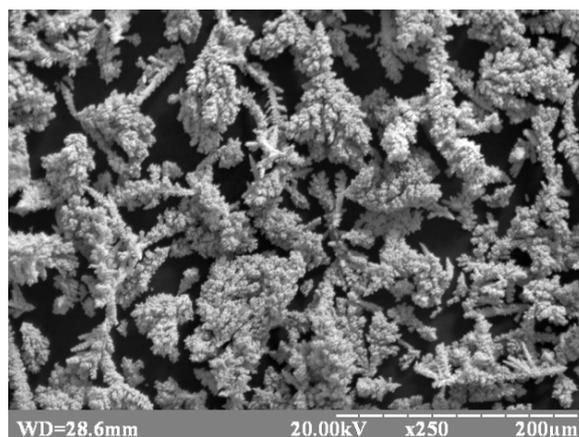


Рис. 4. Морфология частиц медного порошкового материала, синтезированного при плотности тока 10 А/дм² без циркуляции электролита, t = 20 °С, × 250 / The morphology of copper powder material particles, synthesized at a current density of 10 А/дм² without electrolyte circulation, t = 20 °С, × 250

Поскольку скорость циркуляции электролита является наиболее значимым фактором электроосаждения из исследованных, был проведен

более детальный анализ влияния этого фактора на морфологию и свойства медного порошка.

Исследовали влияние скорости циркуляции электролита на морфологию и средний размер частиц меди, а также на средний выход по току [13]. Процесс электролиза вели при скоростях циркуляции 2, 4, 6, 8, 10 л/мин, и без циркуляции электролита.

В таблице 3 приведены результаты измерений.

Таблица 3

Результаты определения среднего размера частиц и выхода по току при различных скоростях и без циркуляции среды / Results of determining the average particle size and the output current at various speeds and without circulation of the electrolyte

Скорость циркуляции электролита, л/мин.	Средний размер частиц, мкм	Выход по току, %
0	13,54	80,14
2	19,00	90,44
4	33,15	89,43
6	62,90	91,46
8	112,27	86,38
10	104,40	94,51

На рисунке 5 графически изображены установленные зависимости среднего размера частиц от скорости циркуляции электролита.

Установлено, что с повышением скорости циркуляции электролита средний размер частиц увеличивается. При этом зависимость среднего размера частиц от скорости циркуляции носит практически линейный прямопропорциональный характер.

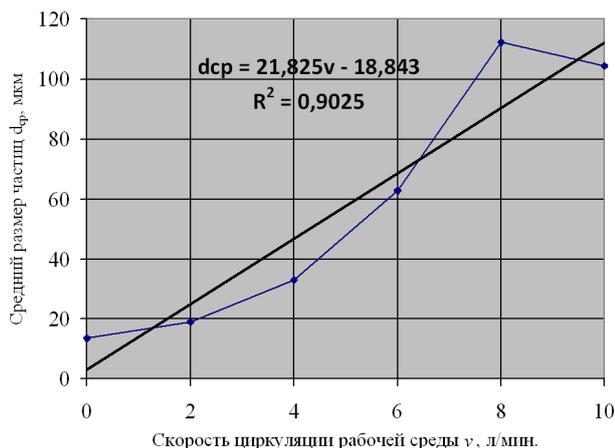
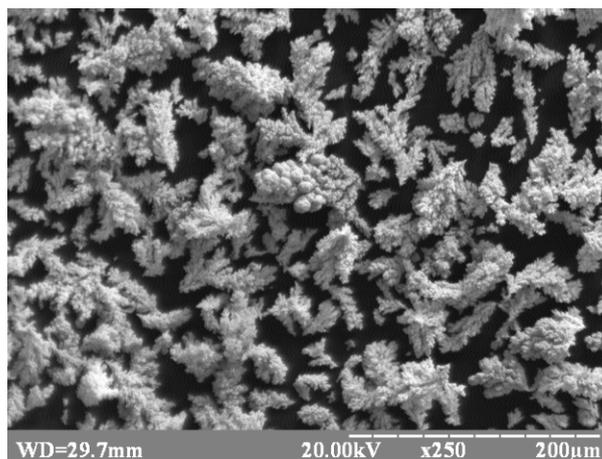


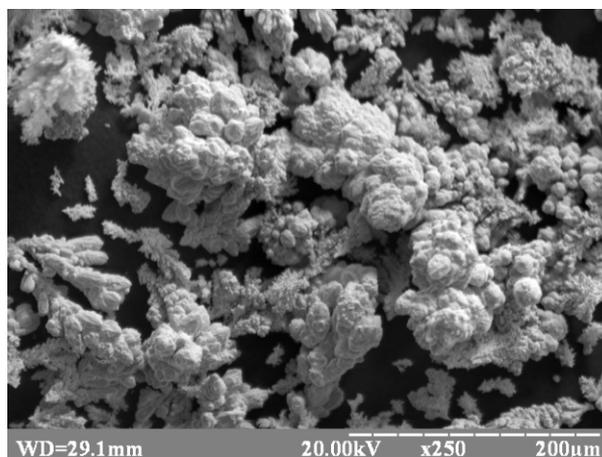
Рис. 5. Зависимость среднего размера частиц от скорости циркуляции электролита / Dependence of average particle size on the electrolyte speed of circulation

С повышением скорости циркуляции форма частиц меди изменяется от мелкокристаллической

хорошо развитой дендритной до крупнодендритной со сглаженными ветвями (рис. 6).



а



б (b)

Рис. 6. Морфология частиц медного порошкового материала, синтезированного при плотности тока 15 А/дм² без циркуляции (а) и при скорости циркуляции электролита 5 л/мин (б), t = 45...50 °С, × 250 / The morphology of copper powder material particles, synthesized at a current density of 15 A/dm² without circulation (a) and electrolyte circulation speed 5 l/min (b), t = 45...50 °С, × 250

Зависимость выхода по току от скорости циркуляции не так ярко выражена, однако с повышением скорости циркуляции наблюдается определенный рост значений выхода меди по току.

Выводы

1. По результатам экспериментов получены полиномиальные модели, которые адекватно описывают установленные взаимосвязи параметров. Наиболее значимыми факторами являются скорость циркуляции и температура рабочей среды, а также плотность тока.

2. Установлено наличие синергетического эффекта совместного влияния температуры и

скорости циркуляции. При одновременном увеличении этих параметров наблюдается значительное укрупнение частиц порошка меди и повышение насыпной плотности.

3. С повышением скорости циркуляции электролита средний размер частиц увеличивается.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Ничипоренко О. С. Порошки меди и ее сплавов / О. С. Ничипоренко, А. В. Помосов, С. С. Набойченко. – Москва : Metallurgy, 1988. – 204 с.

Nichiporenko O.S., Pomosov A.V., Naboychenko S.S. *Poroshki medi i ee splavov* [Powders of copper and its alloys]. Moscow : Metallurgy Publ., 1988. 204 p. (in Russian).

2. Набойченко С. С. Порошки меди и ее сплавов / С. С. Набойченко. – Москва : Metallurgy, 1997. – 542 с.

Naboychenko S.S. *Poroshki medi i ee splavov* [Powders of copper and its alloys]. Moscow : Metallurgy Publ., 1997. 542 p. (in Russian).

3. Кунтій О. І. Електрохімія та морфологія дисперсних металів / О. І. Кунтій. – Львів : Видавництво національного університету «Львівська політехніка», 2008. – 208 с.

Kuntiy O.I. *Elektrohimiya ta morfologiya dispersnih metaliv* [Electrochemistry and morphology of dispersed metals]. Lviv : National University Publishing House «Lvivska politehnika», 2008. 208 p. (in Ukrainian).

4. Помосов А. В. О прогнозировании свойств электролитического медного порошка / А. В. Помосов, Е. Е. Крымакова // Порошковая металлургия. – 1976. – № 6. – С. 1–4.

Pomosov A. V., Krymakova Ye. Ye. *O prognozirovanii svoystv elektroliticheskogo mednogo poroshka* [About predicting of the electrolytic copper powder properties]. *Powders metallurgy*. 1976. № 6. Pp. 1–4. (in Russian).

5. Номберг М. И. Производство медного порошка электролитическим способом / М. И. Номберг. – Москва : Metallurgy, 1971. – 134 с.

Nomberg M. I. *Proizvodstvo mednogo poroshka `elektroliticheskim sposobom* [Production of electrolytic copper powder]. Moscow : Metallurgy Publ., 1971. 134 p. (in Russian).

6. Смирнов Б. М. Механизм катодного процесса при формировании порошкообразного медного осадка / Б. М. Смирнов, Л. И. Попова, А. Д. Артемьев // Порошковая металлургия. – 1987. – № 3. – С. 1–3.

Smirnov B. M., Popova L. I., Artemyev A. D. *Mehanizm katodnogo protsessa pri formirovanii katodnogo mednogo osadka* [The mechanism of the cathode process in the formation of a powdery copper deposit]. *Powders metallurgy*. 1987. № 3. Pp. 1–3. (in Russian).

7. Мурашова И. Б. Формирование дендритных осадков при производстве электролитических порошков / И. Б. Мурашова, Е. Е. Соколовская // Цветные металлы. – 2007. – № 10. – С. 46–51.

Murashova I. B., Sokolovskaya Ye. Ye. *Formirovanie dendritnyh osadkov pri proizvodstve elektroliticheskikh poroshkov* [Formation of dendritic deposits in the production of electrolytic powders]. *Non-ferrous metals*. 2007. № 10. Pp. 46–51. (in Russian).

При этом зависимость среднего размера частиц от скорости циркуляции носит практически линейный характер, а форма частиц изменяется от мелкокристаллической с хорошо развитыми дендритами до крупнокристаллической со сглаженными ветвями.

8. Мурашова И. Б. / Кристаллизация дендритных осадков при производстве медных порошков разных марок // И. Б. Мурашова, Е. Е. Соколовская, А. М. Савельев. – Пермь : Наука, 2006. – 293 с.

Murashova I. B., Sokolovskaya Ye. Ye., Savelyev A. M. *Krystallizatsiya dendritnyh osadkov pri proizvodstve mednyh poroshkov raznyh marok* [Crystallization of dendritic deposits in the production of dendritic copper powders of different grades]. Perm : Science Publ., 2006. 293 p. (in Russian).

9. Мурашова И. Б. Динамика роста дендритного медного осадка при разных токах и концентрации в растворе сульфата меди / И. Б. Мурашова, А. Б. Даринцева, В. М. Рудой // Электрохимия. – 2010. – Т. 46. – № 6. – С. 649–656.

Murashova I. B., Darintseva A. B., Rudoy V. M. *Dinamika rosta dendritnogo mednogo osadka pri raznyh tokah i kontsentratsii v rastvore sulfata medi* [Dynamics dendritic copper deposit growth at different currents and the concentration of copper sulfate in solution]. *Electrochemistry* 2010. Vol. 46. № 6. Pp. 649–656. (in Russian).

10. Внуков А. А. Оптимизация состава электролита для получения медного порошка / А. А. Внуков, Е. Э. Чигиринец, И. Г. Рослик, В. В. Кабацкая // Вісник НТУ «ХПІ». – 2011. – № 31. – С. 30–38.

Vnukov A. A., Chigirinec Ye. Ye., Roslik I. G. *Optimizatsiya sostava elektrolita dlya polucheniya mednogo poroshka* [Optimizing the electrolyte composition to produce copper powder]. *Herald of STU «KhPI»*. 2011. № 31. Pp. 30–38. (in Russian).

11. Внуков А. А. Совместное влияние функциональных добавок на структурообразование и свойства частиц порошковой меди при электролизе / А. А. Внуков, И. Г. Драган // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2011. – № 6. – С. 55–57.

Vnukov A. A., Dragan I. G. *Sovmestnoye vliyaniye funktsionalnykh dobavok na strukturoobrazovanie i svoystva chastits poroshkovoy medi pri elektrolize* [The combined effect of functional additives on the structure and properties of copper powder particles during electrolysis]. *Metallurgical and Mining Industry*. 2011. № 6. Pp. 55–57. (in Russian).

12. Внуков А. А. Исследование совместного влияния параметров электролиза на структурообразование и свойства дисперсной меди / А. А. Внуков, А. Н. Головачев, Ю. И. Таратута // Новини науки Придніпров'я. – 2012. – № 1-2. – С. 61–65.

Vnukov A. A., Golovachev A. N., Taratuta Yu. I. *Issledovanie sovmnestnogo vliyaniya parametrov elektroliza na strukturoobrazovanie i svoystva dispersnoy medi* [The study combined influence of electrolysis parameters on the structure and properties of the dispersed copper]. *Science News Dnieper*. 2012. № 1-2. Pp. 61–65. (in Russian).

13. Осипова М. Л. Выход по току дендритного медного осадка для порошка марки ПМС11 как параметр, определяющий его структуру / М. Л. Осипова, И. Б. Мурашова, А. Б. Даринцева // Гальванотехника и обработка поверхности. – 2012. – № 2. – С. 35–41.

Osipova M. L., Murashova I. B., Darintseva A. B. *Vykhod po toku dendritnogo mednogo osadka dlya poroshka marki*

PMS11 як параметр, *opredelyayuschiy ego strukturu* [Current output dendritic copper deposit powder brand PMS11 as a parameter, which determines its structure]. *Electroplating and Surface Treatment*. 2012. № 2. Pp. 35–41. (in Russian).

14. Gokhan O. Effect of electrolysis parameters on the morphologies of copper powder obtained in a rotating cylinder electrode cell. *Powder Technology*. Vol. 201. Issue 1. 2010. Pp. 57–63. (in English).

<http://www.journals.elsevier.com/powder-technology>

15. Neikov O. D., Nabojchenko S. S., Murashova I. B., Gopienko V. G., Frishberg I. V., Lotsko D. V. Handbook of non-ferrous metal powders. Technologies and applications. London, New-York, Amsterdam : Elsevier, 2009. 634 p. (in English).

<http://bookfi.org/book/611108>

16. Reznikova O. G., Darintseva A. B., Murashova I. B. About the stabilization of the dendritic structure of GG brand copper powder. *Chimica Techno Acta*. 2015. Vol. 2. № 2. Pp. 116–126. (in English).

<http://elar.urfu.ru/handle/10995/31797>

Статья рекомендована к публикации д-ром техн. наук, проф. Ю. С. Пройдаком (Украина); д-ром техн. наук, проф. А. Г. Гриншуптом (Украина).

Поступила в редколлегию 11.11.2015

Принята к печати 14.1.2015