

УДК 621.762:669.23

ПРИМЕНЕНИЕ РАЗЛИЧНЫХ СПОСОБОВ ПЕРЕМЕШИВАНИЯ ЭЛЕКТРОЛИТА ДЛЯ РЕГУЛИРОВАНИЯ МОРФОЛОГИИ ЧАСТИЦ МЕДНОГО ПОРОШКА

ВНУКОВ А. А.^{1*}, к. т. н., доц.,
РОСЛИК И. Г.², к. т. н., доц.,
ГОЛОВАЧЕВ А. Н.³, к. т. н., доц.,
БЕЛАЯ А. В.⁴, к. т. н., доц.,
ЧЕРАНЕВ Р. М.⁵, аспир.

^{1*} Кафедра покрытий, композиционных материалов и защиты металлов, Национальная металлургическая академия Украины, пр. Гагарина, 4, Днепро, 49600, Украина, тел. +38(050) 138-33-59, e-mail: alvnukov74@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-1888-1200

² Кафедра покрытий, композиционных материалов и защиты металлов, Национальная металлургическая академия Украины, пр. Гагарина, 4, Днепро, 49600, Украина, тел. +38(050) 452-54-18, e-mail: roslyk67@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-7168-6623

³ Кафедра электрометаллургии, Национальная металлургическая академия Украины, пр. Гагарина, 4, Днепро, 49600, Украина, тел. +38 (095) 201-44-40, e-mail: golartem@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-4813-6586

⁴ Кафедра покрытий, композиционных материалов и защиты металлов, Национальная металлургическая академия Украины, пр. Гагарина, 4, Днепро, 49600, Украина, тел. +38(050) 504-66-11, e-mail: alena@ukr.net, ORCID ID: 0000-0001-8574-6853

⁵ Кафедра покрытий, композиционных материалов и защиты металлов, Национальная металлургическая академия Украины, пр. Гагарина, 4, Днепро, 49600, Украина, тел. +38(066) 952-42-49, e-mail: Cheranovroman@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-2832-9102

Аннотация. *Постановка проблемы.* Получение 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 $CuSO_4$ +0,1 г/л БТА (бензотриазол); форма катода – пластина; время электролиза – 1 ч. Исследовали влияние способа и режимов перемешивания электролита на морфологию частиц медного порошка. Перемешивали электролит путем барботирования раствора воздухом, принудительной проточной циркуляцией раствора через ванну, а также воздействием на раствор ультразвука различной частоты. Средний размер и морфологию частиц определяли с использованием средств растровой электронной микроскопии. *Результаты.* По результатам экспериментов установлено, что зависимость между средним размером частиц и интенсивностью перемешивания электролита при помощи циркуляции и барботирования носит практически линейный прямопропорциональный характер. Повышение интенсивности перемешивания в этих случаях ведет к укрупнению частиц меди и уплотнению катодного осадка. Зависимость между интенсивностью ультразвуковых колебаний и морфологией частиц меди носит более ярко выраженный экстремальный характер. Адекватное изменение параметра выхода по току наблюдается только при увеличении интенсивности ультразвуковых колебаний. Можно предположить, что данный метод воздействия на электролит является наиболее эффективным для регулирования морфологии частиц порошка меди и технико-экономических показателей его производства. *Научная новизна.* Впервые определены закономерности влияния режимов ультразвукового воздействия на электролит на морфологию частиц медного порошка. *Практическая значимость.* Определены наиболее эффективные способы и режимы перемешивания электролита, которые в наибольшей степени влияют на процесс электроосаждения дисперсной меди и ее свойства с целью обеспечения заданных регулируемых характеристик медного электролитического порошка и расширения областей его применения.

Ключевые слова: медный порошок; электроосаждение; перемешивание электролита; барботирование; ультразвуковое воздействие на раствор; морфология частиц порошка

ЗАСТОСУВАННЯ РІЗНИХ СПОСОБІВ ПЕРЕМІШУВАННЯ ЕЛЕКТРОЛІТУ ДЛЯ РЕГУЛЮВАННЯ МОРФОЛОГІЇ ЧАСТИНОК МІДНОГО ПОРОШКУ

ВНУКОВ О. О.^{1*}, к. т. н., доц.,
РОСЛИК І. Г.², к. т. н., доц.,
ГОЛОВАЧОВ А. М.³, к. т. н., доц.,
БІЛА О. В.⁴, к. т. н., доц.,
ЧЕРАНЬОВ Р. М.⁵, аспир.

^{1*} Кафедра покриттів, композиційних матеріалів та захисту металів, Національна металургійна академія України, пр. Гагаріна, 4, Дніпро, 49600, Україна, тел. +38(050) 138-33-59, e-mail: alvnukov74@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-1888-1200

² Кафедра покриттів, композиційних матеріалів та захисту металів, Національна металургійна академія України, пр. Гагаріна, 4, Дніпро, 49600, Україна, тел. +38(050) 452-54-18, e-mail: roslyk67@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-7168-6623

³ Кафедра електрометалургії, Національна металургійна академія України, пр. Гагаріна, 4, Дніпро, 49600, Україна, тел. +38(095) 201-44-40, e-mail: golartem@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-4813-6586

⁴ Кафедра покриттів, композиційних матеріалів та захисту металів, Національна металургійна академія України, пр. Гагаріна, 4, Дніпро, 49600, Україна, тел. +38(050) 504-66-11, e-mail: alena@ukr.net, ORCID ID: 0000-0001-8574-6853

⁵ Кафедра покриттів, композиційних матеріалів та захисту металів, Національна металургійна академія України, пр. Гагаріна, 4, Дніпро, 49600, Україна, тел. +38(066) 952-42-49, e-mail: Cheranovroman@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-2832-9102

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 проводили з використанням мідного розчинного анода і мідного катода. Склад електроліту: 130 г/л H_2SO_4 +40 г/л $CuSO_4$ +0,1 г/л БТА (бензотриазол); форма катода – пластина; час електролізу – 1 год. Досліджено вплив способу і режимів перемішування електроліту на морфологію частинок мідного порошку. Перемішували електроліт шляхом барботування розчину повітрям, примусовою циркуляцією розчину крізь ванну, а також шляхом впливу на розчин ультразвуку різної частоти. Середній розмір і морфологію частинок визначали з використанням засобів растрової електронної мікроскопії. **Результати.** За результатами експериментів визначено, що залежність між середнім розміром частинок та інтенсивністю перемішування електроліту за допомогою циркуляції і барботування має практично лінійний прямопропорційний характер. Підвищення інтенсивності перемішування в цих випадках викликає укрупнення частинок міді й ущільнення катодного осаду. Залежність між інтенсивністю ультразвукових коливань і морфологією частинок міді має більш яскраво виражений екстремальний характер. Адекватне змінення параметра виходу за струмом спостерігається тільки під час збільшення інтенсивності ультразвукових коливань. Можна припустити, що цей метод впливу на електроліт найбільш ефективний для регулювання морфології частинок порошку міді, а також за техніко-економічними показниками його виробництва. **Наукова новизна.** Уперше визначено закономірності впливу режимів обробки електроліту ультразвуком на морфологію частинок мідного порошку. **Практична значимість.** Визначено найефективніші способи і режими перемішування електроліту, які найбільш істотно впливають на процес електроосадження дисперсної міді та її властивості з метою забезпечення заданих регульованих характеристик мідного електролітичного порошку і розширення сфер застосування.

Ключові слова: мідний порошок; електроосадження; перемішування електроліту; барботування; ультразвуковий вплив на розчин; морфологія частинок порошку

APPLICATION OF VARIOUS METHODS OF MIXING ELECTROLYTE FOR REGULATING MORPHOLOGY OF PARTICLES OF COPPER POWDER

VNUKOV A.A. ^{1*}, *Cand. Sc. (Tech.), Ass. Prof.*,
 ROSLYK I.G. ², *Cand. Sc. (Tech.), Ass. Prof.*,
 GOLOVACHOV A.N. ³, *Cand. Sc. (Tech.), Ass. Prof.*,
 BILA A.V. ⁴, *Cand. Sc. (Tech.), Ass. Prof.*,
 CHERAN'OV R. M. ⁵, *Graduate student*

^{1*} Coatings, composite materials and metal protection department, National metallurgical academy of Ukraine, Gagarina av., Dnipro, 49600, Ukraine, tel. +38(050) 138-33-59, e-mail: alvnukov74@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-1888-1200

² Coatings, composite materials and metal protection department, National metallurgical academy of Ukraine, Gagarina av., Dnipro, 49600, Ukraine, tel. +38(050) 452-54-18, e-mail: roslyk67@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-7168-6623

³ Department of electrometallurgy, National metallurgical academy of Ukraine, Gagarina av., Dnipro, 49600, Ukraine, tel. +38(095) 201-44-40, e-mail: golartem@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-4813-6586

⁴ Coatings, composite materials and metal protection department, National metallurgical academy of Ukraine, Gagarina av., Dnipro, 49600, Ukraine, tel. +38(050) 504-66-11, e-mail: alena@ukr.net, ORCID ID: 0000-0001-8574-6853

⁵ Coatings, composite materials and metal protection department, National metallurgical academy of Ukraine, Gagarina av., Dnipro, 49600, Ukraine, tel. +38(066) 952-42-49, e-mail: Cheranovroman@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-2832-9102

Abstract. Formulation of the 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 $CuSO_4$ +0,1 g/l БТА (benzotriazol); form cathode – plate; electrolysis time – 1 hour. The influence of the method and regimes of electrolyte mixing on the copper powder particles morphology was investigated. Mixing of the electrolyte was carried out by bubbling the solution with air,

forced flow of the solution through the bath, as well as different frequencies ultrasonic action on the solution. The mean size and morphology of particles were determined by using scanning electron microscopy. **Findings.** According to the results of the experiments, it was found that the relationship between the average particle size and the mixing intensity of the electrolyte by means of circulation and bubbling is practically linear, directly proportional. An increase in the intensity of mixing in these cases leads to the copper particles coarsening and the compaction of the cathode deposit. The relationship between the intensity of ultrasonic vibrations and the copper particles morphology has a more pronounced extreme character. An adequate change in the current output parameter is observed only when the ultrasonic oscillations intensity increases. It can be assumed, that this method of effect on electrolyte is the most effective for regulating the copper powder particles morphology and the technical and economic parameters of its production. **Originality.** For the first time, the regularities of the ultrasonic effect influence on the electrolyte on the copper powder particles morphology. **Practical value.** The practical significance of the obtained results is that the most effective methods and regimes of electrolyte mixing have been determined, which have the greatest effect on the process of dispersed copper electrodeposition and its properties in order to provide the specified controlled characteristics of copper electrolytic powder and expand its application areas.

Keywords: copper powder; electrodeposition; electrolyte mixing; bubbling; ultrasonic action on the solution; powder particles morphology

Постановка проблемы

Одним из наиболее эффективных способов производства порошка меди является электролиз водных растворов [1; 2]. Он позволяет эффективно влиять на свойства дисперсного осадка путем варьирования технологических режимов электроосаждения [3–5]. Таким параметром является перемешивание электролита [6].

Значение перемешивания электролита очень велико. При перемешивании электролита уменьшается толщина диффузионного слоя, что ведет к увеличению предельной плотности тока. В результате роста предельной плотности тока должны создаваться условия, благоприятно влияющие на образование рыхлых осадков с низкой степенью дисперсности и большой насыпной плотностью. При этом возможно получение порошков заданного гранулометрического состава и насыпной плотности посредством регулирования интенсивности перемешивания раствора. В зависимости от интенсивности перемешивания насыпную плотность можно варьировать в пределах от 1,2 до 3,0 г/см³ [3].

Вопросы перемешивания электролита в процессах электрохимического осаждения дисперсных металлов рассматривалась многими авторами [1; 2; 6]. Однако роль взаимосвязи скорости движения электролита с учетом гидродинамических факторов и скорости осаждения металла окончательно не выяснена.

В промышленных условиях перемешивание растворов осуществляется механическими мешалками, циркуляционными насосами или сжатым воздухом (барботирование).

Одним из наиболее перспективных методов воздействия на электролит является ультразвук. Анализ литературных данных показывает, что ультразвуковое воздействие на электролит при электроосаждении дисперсных металлов применяется в основном для интенсификации процессов и улучшения физико-механических свойств катодных осадков [6]. Увеличение скорости осаждения металлов в ультразвуковом поле также обуславливается повышением максимально допустимых плотностей токов при значительном

повышении выхода металла по току, что может представлять значительный интерес для многих электрохимических процессов. Благодаря ведению электролиза при высоких плотностях тока, а также специфическому воздействию ультразвуковых колебаний на кинетику осаждения металлов на катоде можно значительно улучшить физико-механические свойства осадка: повысить твердость, снизить внутренние напряжения и т. п.

Широкое применение ультразвука в электрохимических процессах значительно тормозится из-за отсутствия должного числа работ, освещающих механизм его воздействия на кинетику электродных процессов. Так, например, до сих пор нет единого мнения о том, оказывает ли ультразвук значительное воздействие на кинетику процесса помимо интенсивного перемешивания. Поэтому исследования в этом направлении и проведение обобщений на основе полученных данных крайне необходимы.

Такое положение в области ультразвукового осаждения дисперсных металлов связано в значительной степени с использованием различных методов при проведении работ. Поэтому целесообразно более подробно освещать вопросы, связанные с применением ультразвука в процессах электрохимического осаждения дисперсных металлов.

Цель и задача исследования

Цель исследования – получение электролитического порошка меди с регулируемой формой и размерами частиц, стабильной структурой, а также требуемыми технологическими, физическими и функциональными свойствами.

Задача исследований – оценить степень влияния разных способов перемешивания электролита на размер и форму частиц медного электролитического порошка, а также определить эффективность использования различных схем перемешивания электролита как одного из основных факторов, позволяющих синтезировать медный порошок с заданной морфологией поверхности частиц и оптимальным уровнем свойств.

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 $CuSO_4$ +0,1 г/л БТА (бензотриазол, вводится в электролит для повышения химической стабильности катодного осадка и повышения его коррозионной стойкости [7]); форма катода – пластина; время электролиза – 1 ч [8; 9]. Катодная плотность тока и температура электролита соответствует промышленным режимам синтеза медного электролитического порошка марки ПМС-1.

Исследовали влияние способа и режимов перемешивания электролита на морфологию частиц медного порошка. Перемешивали электролит путем барботирования раствора воздухом, принудительным проточным движением раствора через ванну, а также воздействием на раствор ультразвука различной интенсивности.

Средний размер и морфологию частиц определяли с использованием средств растровой электронной микроскопии.

Результаты исследований

В первой серии опытов изучали влияние скорости перемешивания электролита принудительным проточным движением раствора через ванну на форму и средний размер частиц меди, а также на средний выход по току.

Процесс электролиза вели при скоростях циркуляции 2, 4, 6, 8, 10 л/мин, и без циркуляции электролита.

В таблице 1 приведены результаты измерений.

Таблица 1

Результаты определения среднего размера частиц и выхода по току при различных скоростях проточной циркуляции электролита/ Results of the average particle size and the output current determining at various flow circulation speed

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	130,20	94,51

На рисунке 1 графически изображены установленные зависимости среднего размера частиц от скорости проточной циркуляции электролита.

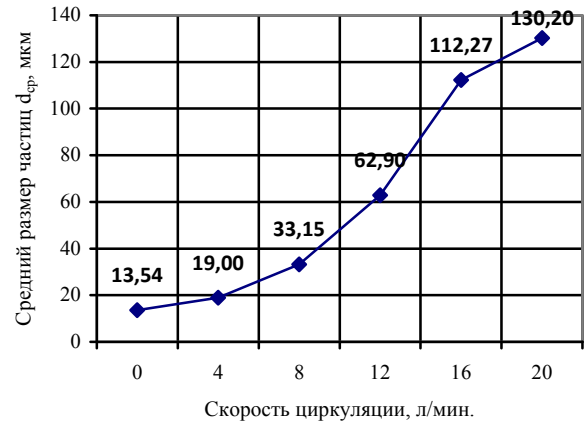


Рис. 1. Зависимость среднего размера частиц от скорости проточной циркуляции электролита / Fig. 1. Dependence of average particle size at flow circulation the electrolyte speed

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

Результаты экспериментов показали, что скорость циркуляции раствора определяет не только размер частиц порошка, но и его гранулометрический состав. С повышением скорости циркуляции форма частиц меди изменяется от мелкокристаллической хорошо развитой дендритной до крупнодендритной со сглаженными ветвями (рис. 2).

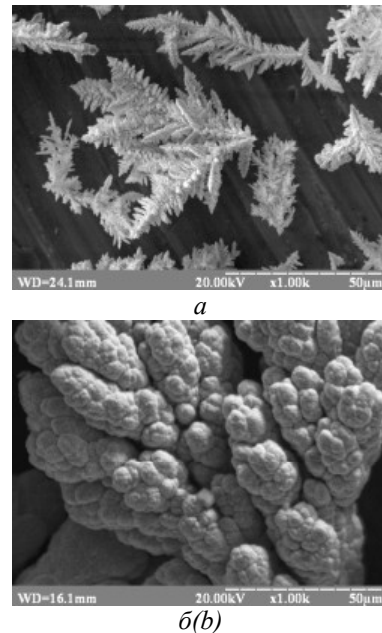


Рис. 2. Морфология частиц медного порошка, синтезированного при скорости проточной циркуляции электролита 2 л/мин (а) и 10 л/мин (б), ×1000 / Fig. 2. The morphology of the copper powder particles, synthesized at the flow circulation speed 2 l/min (a) and 10 l/min (b), ×1 000

При высоких скоростях циркуляции образуются частицы порошка со слабо развитой поверхностью дендритов [10].

Это связано с тем, что применение повышенной скорости циркуляции приводит к уменьшению разности концентрации меди у катода и в глубине электролита. Следовательно, запас разряжающихся ионов в прикатодном слое увеличивается, а образование и рост кристаллов происходит более равномерно, и формируются частицы медного порошка более крупнозернистые с большей насыпной плотностью (рис. 2, а).

При малых скоростях перемешивания (2...4 л/мин) получают мелкокристаллические мягкие порошки с развитой дендритной структурой (рис. 2, б).

Отсутствие перемешивания электролита приводит к образованию мелкокристаллического порошка с сильно развитой поверхностью частиц и характерным темным цветом. Такой порошок практически не пригоден для производства спеченных изделий с применением низкоэнергетических способов формования и требует дополнительной обработки. Однако медные порошки с такой морфологией обладают высокой химической активностью и могут эффективно применяться в процессах катализа, медицины и химического синтеза (рис. 3).

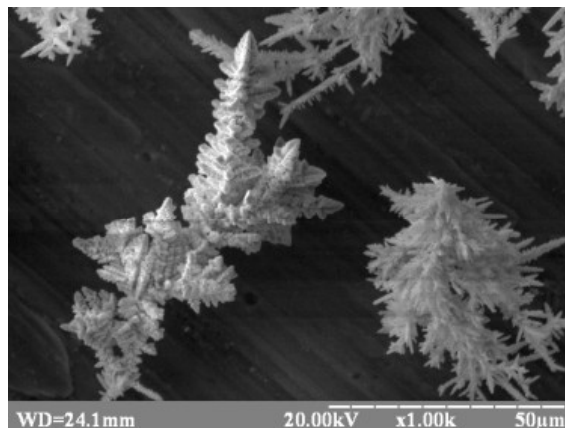


Рис. 3. Морфология частиц медного порошка, синтезированного без перемешивания электролита, $\times 1000$ / Fig 3. The morphology of the copper powder particles, synthesized in non-mixed electrolyte, $\times 1\ 000$

Зависимость выхода по току от скорости циркуляции в заданных пределах варьирования факторов не имеет ярко выраженного характера.

Во второй серии опытов изучали влияние скорости интенсивности барботирования раствора воздухом на указанные выше параметры.

Процесс электролиза вели при интенсивности барботирования 2, 4, 6, 8, 10 л/мин.

В таблице 2 приведены результаты измерений.

Таблица 2

Результаты определения среднего размера частиц и выхода по току при различной интенсивности барботирования раствора / Results of the average particle size and the output current determining at various different intensity of solution bubbling

Интенсивность барботирования, л/мин	Средний размер частиц, мкм	Выход по току, %
0	13,54	80,14
2	33,00	88,33
4	42,50	91,54
6	75,30	90,35
8	92,40	87,11
10	110,50	92,30

На рисунке 4 графически изображены установленные зависимости среднего размера частиц от интенсивности барботирования электролита.

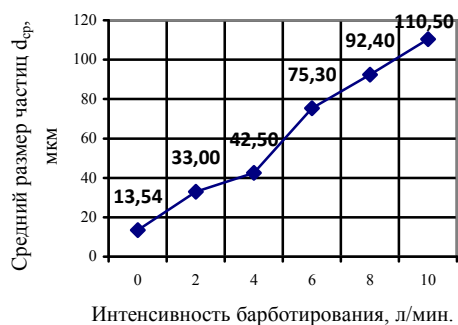
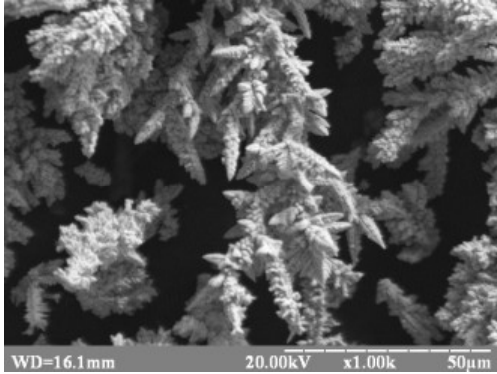


Рис. 4. Зависимость среднего размера частиц от интенсивности барботирования электролита / Fig. 4. Dependence of average particle size at intensity of solution bubbling

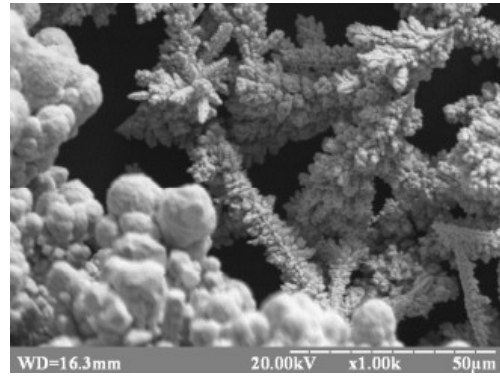
Установлено, что влияние интенсивности барботирования раствора воздухом на морфологию частиц меди и выход по току аналогично влиянию скорости проточной циркуляции электролита. Зависимость среднего размера частиц от интенсивности барботирования также носит практически линейный прямо пропорциональный характер. Однако, исходя из установленных значений среднего размера частиц при высоких значениях интенсивности перемешивания, можно признать циркуляцию электролита более эффективным способом воздействия на раствор и свойства

дисперсного осадка меди при електроосажденні. Крім того, наявність великої кількості розчиненого в електроліті повітря при підвищених температурах електроосаждення призводить до додаткового окислення частинок міді.

Отримані дані підтверджуються результатами мікроскопічних досліджень морфології частинок міді (рис. 5).



a



б(б)

Рис. 5. Морфологія частинок мідного порошку, синтезованого при інтенсивності барботування електроліту 2 л/мін (а) і 10 л/мін (б), $\times 1000$ / Fig. 5. The morphology of the copper powder particles, synthesized at the intensity of solution bubbling 2 l/min (a) and 10 l/min (b), $\times 1\ 000$

В третій серії експериментів вивчали вплив інтенсивності ультразвукового впливу на розчин на вказані вище параметри. Перемішували розчин ультразвуком за допомогою ультразвукового диспергатора моделі УЗДН-А.

Процес електролізу вели при інтенсивності УЗК 4, 8, 12, 16 і 20 кГц.

В таблиці 3 наведені результати вимірювань.

На рисунку 6 графічно зображені установлені залежності середнього розміру частинок від інтенсивності ультразвукових коливань.

Таблиця 3

Результати визначення середнього розміру частинок і виходу по струму при різній інтенсивності впливу ультразвуку / Results of the average particle size and the output current determining at various intensity of ultrasound

Інтенсивність ультразвукових коливань, кГц	Середній розмір частинок, мкм	Вихід по струму, %
0	13,54	80,14
4	19,00	88,50
8	35,00	90,40
12	52,30	93,80
16	47,00	96,00
20	41,20	98,00

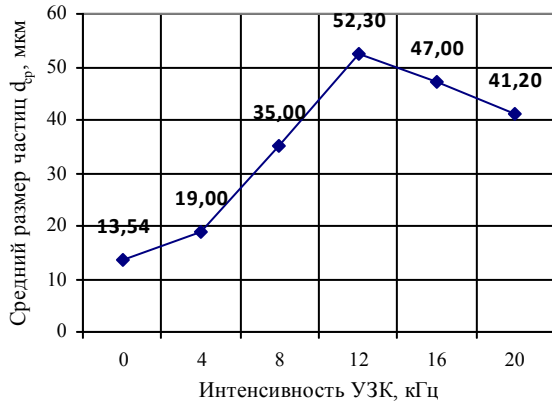
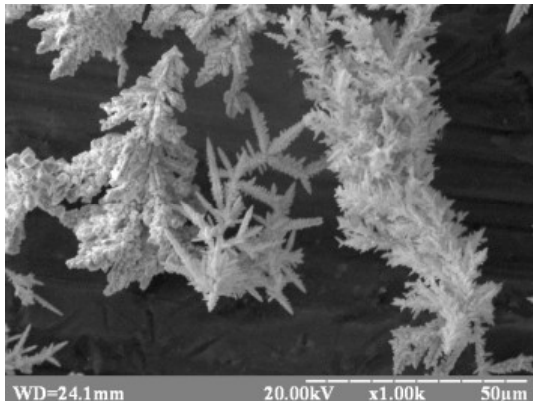
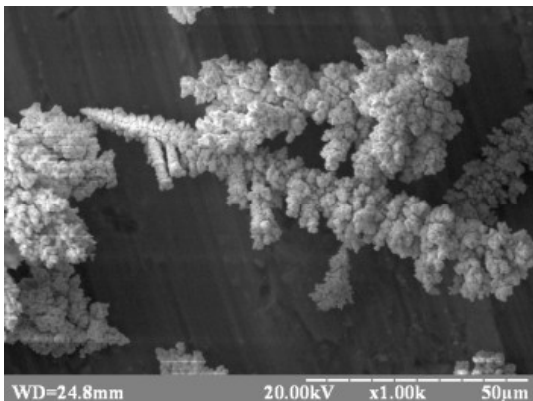


Рис. 6. Зависимость среднего размера частиц от интенсивности ультразвуковых колебаний / Fig. 6. Dependence of average particle size at intensity of ultrasound

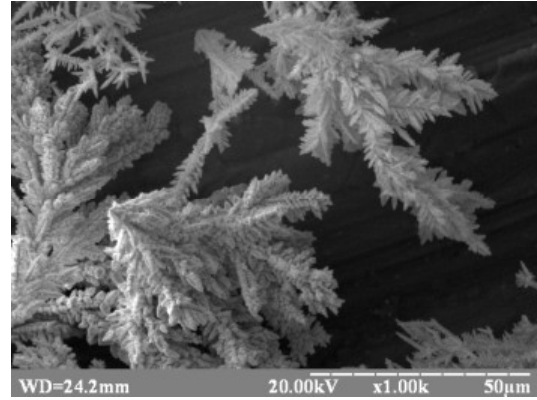
Зависимость среднего размера частиц от интенсивности ультразвуковых колебаний в заданном интервале варьирования носит более сложный экстремальный характер. При повышении интенсивности ультразвуковых колебаний средний размер частиц меди сначала растет, а затем, по достижении определенного критического значения частоты колебаний, резко падает. При этом дендриты меди имеют наиболее сглаженную форму и наибольшую плотность при частоте колебаний 12 кГц (рис. 7).



a



б(b)



в(c)

Рис. 7. Морфология частиц медного порошка, синтезированного при интенсивности ультразвука 4 кГц (а), 12 кГц (б) и 20 Гц (в), $\times 1000$ / Fig 7. The morphology of the copper powder particles, synthesized at the intensity of ultrasound 4 kHz (a), 12 kHz (b) and 20 kHz (c), $\times 1000$

Зависимость выхода по току от интенсивности ультразвуковых колебаний не значительна, однако с повышением скорости циркуляции наблюдается определенный рост значений выхода меди по току.

Из полученных данных следует, что перспективным является изучение влияния ультразвуковых колебаний на процесс электроосаждения дисперсной меди с учетом совместного влияния нескольких параметров электролиза. В первую очередь речь идет о катодной плотности тока, температуре электролита и концентрации ионов меди в нем. Данные факторы влияют на область предельного тока, образование пассивных пленок на поверхности катода, рассеивающую способность электролита и, как следствие, скорость осаждения дисперсной меди.

Выводы

1. По результатам экспериментов установлено, что зависимость между средним размером частиц и интенсивностью перемешивания электролита при помощи циркуляции и барботирования электролита носит практически линейный прямо пропорциональный характер. Повышение интенсивности перемешивания в этих случаях ведет к укрупнению частиц меди и уплотнению катодного осадка.

2. Зависимость между интенсивностью ультразвуковых колебаний и морфологией частиц меди носит более ярко выраженный экстремальный характер. Применение ультразвука в сочетании с правильным выбором катодной плотности тока позволит эффективно регулировать свойства осадка.

3. Адекватное изменение параметра выхода по току наблюдается только при увеличении интенсивности ультразвуковых колебаний. Можно предположить, что данный метод воздействия на электролит является наиболее перспективным, как с

точки зрения регулирования морфологии частиц порошка меди, так и технико-экономических показателей его производства. Однако применение ультразвука при синтезе порошка меди в промышленных масштабах затрудняется аппаратурным оформлением процесса.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Порошки меди и ее сплавов : монография / [О. С. Ничипоренко, А. В. Помосов, С. С. Набойченко]. – Москва : Metallurgia, 1988. – 204 с.
2. Набойченко С. С. Порошки меди и ее сплавов : монография / С. С. Набойченко. – Москва : Metallurgia, 1997. – 542 с.
3. Помосов А. В. О прогнозировании свойств электролитического медного порошка / А. В. Помосов, Е. Е. Крымакова // Порошковая металлургия. – 1976. – № 6. – С. 1–4.
4. Мурашова И. Б. Формирование дендритных осадков при производстве электролитических порошков / И. Б. Мурашова, Е. Е. Соколовская // Цветные металлы. – 2007. – № 10. – С. 46–51.
5. Кристаллизация дендритных осадков при производстве медных порошков разных марок : монография / [И. Б. Мурашова, Е. Е. Соколовская, А. М. Савельев]. – Пермь : Наука, 2006. – 293 с.
6. Кунтій О. І. Електрохімія та морфологія дисперсних металів : монографія / О. І. Кунтій. – Львів : Видавництво національного університету «Львівська політехніка», 2008. – 208 с.
7. Внуков А. А. Совместное влияние функциональных добавок на структурообразование и свойства частиц порошковой меди при электролизе / А. А. Внуков, И. Г. Драган // Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'. – 2011. – № 6. – С. 55–57.
8. 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.
9. 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.
10. Внуков А. А. Влияние скорости циркуляции электролита на свойства дисперсной электролитической меди / А. А. Внуков, А. Н. Головачев, А. В. Белая // Металознавство та термічна обробка металів. – 2015. – № 3–4. – С. 63–65. – Режим доступа : <http://www.journals.uran.ua/index.php/2413-7405>

REFERENCES

1. Nichiporenko O.S., Pomosov A.V. and Naboychenko S.S. *Poroshki medi i ee splavov* [Powders of copper and its alloys]. Moscow : Metallurgy Publ., 1988, 204 p. (in Russian).
2. Naboychenko S.S. *Poroshki medi i ee splavov* [Powders of copper and its alloys]. Moscow : Metallurgy Publ., 1997, 542 p. (in Russian).
3. Pomosov A.V. and Krymakova E.E. *O prognozirovani svoystv elektroliticheskogo mednogo poroshka* [About predicting of the electrolytic copper powder properties]. *Poroshkovaya metallurgiya*. [Powders metallurgy]. 1976, no. 6, pp. 1–4. (in Russian).
4. Murashova I.B. and Sokolovskaya E.E. *Formirovanie dendritnyh osadkov pri proizvodstve elektroliticheskikh poroshkov* [Formation of dendritic deposits in the production of electrolytic powders]. *Tsvetnye metally*. [Non-ferrous metals]. 2007, no. 10, pp. 46–51. (in Russian).
5. Murashova I.B., Sokolovskaya E.E. and Savelyev A.M. *Kristallizatsiya 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).
6. Kuntiy O.I. *Elektrohimiya i morfologiya dispersnyh metallov* [Electrochemistry and morphology of dispersed metals]. Lviv : National University Publishing House «Lvivska politehnika», 2008, 208 p. (in Ukrainian).
7. Vnukov A.A. and 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]. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost*. [Metallurgical and Mining Industry]. 2011, no. 6, pp. 55–57. (in Russian).
8. Vnukov A.A., Chigirinec E.E. and Roslik I.G. *Optimizatsiya sostava elektrolita dlya polucheniya mednogo poroshka* [Optimizing the electrolyte composition to produce copper powder]. *Vistnik NTU «KPI»* [Herald of STU «KPI»]. 2011, no. 31, pp. 30–38. (in Russian).
9. Vnukov A.A., Golovachev A.N. and Taratuta Yu.I. *Issledovanie sovmestnogo 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]. *Noviny nauki Pridneprovya*. [Science News Dnepr]. 2012, no. 2, pp. 61–65. (in Russian).
10. Vnukov A.A., Golovachev A.N. and Belaya A.V. *Vliyaniye skorosti tsirkulyatsii elektrolita na svoystva dispersnoy elektroliticheskoy medi*. [Effect of electrolyte circulation speed on the properties of the dispersed electrolytic copper]. *Metaloznnavstvo ta termichna obrobka*. [Metal science and heat treatment of metals]. 2015, no. 3–4, pp. 63–65. (in Russian).

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

Поступила в редколлегию 12.11.17

Принята к печати 19.11.17