

УДК 621.762

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОЛИЗА И СОСТАВА ЭЛЕКТРОЛИТА НА ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ДИСПЕРСНОГО ЖЕЛЕЗА

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, Днепр, 49600, Украина, тел. (050) 138-33-59, e-mail: alvnukov@yandex.ru, ORCID ID: 0000-0002-1888-1200

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

³Кафедра электрометаллургии, Национальная металлургическая академия Украины, 49600, пр. Гагарина, 4, Днепр, Украина, тел. (095) 201-44-40, e-mail: golar@yandex.ru, ORCID ID: 0000-0002-4813-6586

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

⁵Кафедра покрытий, композиционных материалов и защиты металлов, Национальная металлургическая академия Украины, пр. Гагарина, 4, Днепр, 49600, Украина, тел. (097) 557-72-05, e-mail: grin-gren@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-2832-9102

Аннотация. Постановка проблемы. Получение технологичного электролитического порошка железа с регулируемой формой и размером частиц, с требуемыми структурными, физическими и функциональными свойствами. **Методика.** Процесс электролитического осаждения дисперсного железа проводили с использованием стального растворимого анода и титанового катода. Электролит – сульфатный; форма катода – пластина; время электролиза – 1 час. Экспериментальные исследования проводили в соответствии с планом полного факторного эксперимента (ПФЭ) 2³, а также с применением корреляционно-регрессионного анализа. Средний размер и морфологию частиц определяли с применением метода оптической микроскопии. **Результаты.** По результатам экспериментов получены полиномиальные модели, которые адекватно описывают установленные взаимосвязи изучаемых параметров. Наиболее значимыми факторами являются скорость циркуляции электролита, катодная плотность тока, а также концентрация в электролите железного купороса. Установлено наличие синергетического эффекта совместного влияния на свойства катодного осадка железа катодной плотности тока и кислотности электролита. При одновременном увеличении этих параметров наблюдается значительное укрупнение частиц дисперсного железа. С повышением скорости циркуляции электролита средний размер частиц увеличивается. Снижение концентрации серноокислого железа в пределах заданного интервала варьирования приводит к образованию очень тонких и легких катодных осадков с насыпной плотностью менее 1,0 г/см³. **Научная новизна.** Впервые определены закономерности совместного влияния технологических факторов процесса электролиза (катодной плотности тока, температуры и скорости циркуляции электролита), а также состава электролита на морфологию частиц железного порошка. **Практическая значимость.** Определены оптимальные уровни основных технологических параметров электроосаждения дисперсного железа с целью обеспечения заданных регулируемых характеристик железного электролитического порошка и расширения областей его применения.

Ключевые слова: железный порошок; скорость циркуляции; электроосаждение; плотность тока; морфология частиц; размер частиц

ВПЛИВ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРОЛІЗУ І СКЛАДУ ЕЛЕКТРОЛІТУ НА ФІЗИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ДИСПЕРСНОГО ЗАЛІЗА

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, аспір.

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

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

³ Кафедра електрометалургії, Національна металургійна академія України, пр. Гагаріна, 4, Дніпро, 49600, Україна, тел. (095) 201-44-40, e-mail: golar@yandex.ru, 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. (050) 504-66-11, e-mail: belaya_alena@mail.ru, 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. (097) 557-72-05, e-mail: grin-gren@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-2832-9102

Анотація. Постановка проблеми. Одержання технологічного електролітичного порошку заліза з регульованою формою і розмірами частинок, з необхідними структурними, фізичними і функціональними властивостями. **Методика.** Процес електролітичного осадження дисперсного заліза вели з використанням сталевого розчинного анода і титанового катода. Електроліт – сульфатний; форма катода – пластина; час електролізу – 1 година. Експериментальні дослідження проводили відповідно до плану повного факторного експерименту (ПФЕ) 2³, а також із застосуванням кореляційно-регресійного аналізу. Середній розмір та морфологію частинок визначали із застосуванням методу оптичної мікроскопії. **Результати.** За результатами експериментів отримано поліноміальні моделі, що адекватно описують установлені взаємозв'язки параметрів. Найбільш значимими факторами є швидкість циркуляції і катодна густина струму, а також концентрація залізного купоросу в електроліті. Встановлено наявність синергетичного ефекту спільного впливу катодної густини струму та кислотності електроліту на властивості катодного осаду заліза. За одночасного збільшення цих параметрів спостерігається значне укрупнення частинок дисперсного заліза. З підвищенням швидкості циркуляції електроліту середній розмір частинок збільшується. Зменшення концентрації сірчаноокислого заліза у межах заданого інтервалу варіювання викликає утворення дуже тонких та легких катодних осадів із насипною щільністю менше ніж 1,0 г/см³. **Наукова новизна.** Уперше визначено закономірності спільного впливу технологічних факторів процесу електролізу (густина струму, температури і швидкості циркуляції електроліту), а також складу електроліту на морфологію частинок і властивості залізного порошку. **Практична значимість.** Визначено оптимальні рівні основних технологічних параметрів електроосадження дисперсного заліза з метою забезпечення заданих регульованих характеристик електролітичного залізного порошку і розширення галузей його застосування.

Ключові слова: залізний порошок; швидкість циркуляції; електроосадження; густина струму; морфологія частинок; розмір частинок

INFLUENCE OF TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF ELECTROLYSIS AND THE COMPOSITION OF THE ELECTROLYTE ON THE PHYSICAL PROPERTIES OF THE DISPERSED IRON

VNUKOV A.A.^{1*}, *Cand. Sc. (Tech.)*,

ROSLYK I.G.², *Cand. Sc. (Tech.)*,

GOLOVACHOV A.N.³, *Cand. Sc. (Tech.)*,

BILA A.V.⁴, *Cand. Sc. (Tech.)*,

CHERAN'OV R.M.⁵, *Graduate student*

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

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

³ Department of electrometallurgy, National metallurgical academy of Ukraine, Gagarin av., Dnipro, 49600, Ukraine, tel. (095) 201-44-40, e-mail: golar@yandex.ru, ORCID ID: 0000-0002-4813-6586

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

⁵ Coatings, composite materials and metal protection department, National metallurgical academy of Ukraine, Gagarin av., Dnipro, 49600, Ukraine, tel. (097) 557-72-05, e-mail: grin-gren@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-2832-9102

Abstract. Problem definition. Synthesis of a technological electrolytic iron powder with controlled particle size and shape, the desired structural, physical and functional properties. **Methodology.** For the dispersed iron electrolytic deposition process were using a soluble steel anode and titanium cathode. Electrolyte – sulfate; form cathode – plate; electrolysis time – 1 hour. Experimental studies were carried out in accordance with the plan of full factorial experiment (FFE) 2³, as well as with the use of regression analysis. The average particle size and morphology was determined using optical microscopy method. **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, current density and iron sulphate concentration. The presence of a synergistic effect of joint influence cathode current density and electrolyte acidity on the iron cathode precipitation properties has been determined. When simultaneous increase of these parameters there is a significant coarsening of iron powder particles. With increasing rate electrolyte circulation average particle size increases. Reduced concentration of iron sulfate in the interval of variation leads to the formation of very thin and light cathode precipitation with a bulk density of less than. **Originality.** First defined patterns combined influence of electrolysis process technological factors (current density, temperature and circulation speed of the electrolyte), as well as electrolyte composition, on particle morphology and properties of the iron powder has been determined in the first. **Practical value.** The

practical significance of the results is that the optimal levels of the main disperse iron electrodeposition technological parameters to provide the specified characteristics of controlled electrolytic iron powder and the expansion of application areas.

Keywords: iron powder; circulation rate; electrodeposition; current density; particle morphology; particle size

Постановка проблемы

Увеличение спроса на железные порошки не только для нужд порошковой металлургии, но и в химической и аккумуляторной промышленности, вызывает необходимость организации их массового производства, способствует удешевлению стоимости этого продукта и выдвигает требования о постепенном улучшении его качества.

Среди известных способов получения железных порошков электролиз имеет ряд преимуществ, особенно при необходимости получения в массовых масштабах продукта с определенными физико-химическими свойствами, удовлетворяющими потребности отдельных видов производств. Высокая дисперсность, хорошо развитая поверхность и дендритная форма частиц электролитических порошков вообще и железа в частности делают их пригодными для производства металлокерамики, в процессах синтеза некоторых специальных сортов электротехнического железа, пористых антифрикционных материалов. Возможность синтеза электролитических железных порошков с насыпной плотностью в пределах 1,5...2,2 г/см³ дает им преимущество по сравнению с порошками, имеющими малую насыпную плотность, синтезированными методами химического восстановления. Кроме того, электролитические порошки железа обладают превосходной способностью спрессовываться в прочные изделия и легко спекаться [1–3].

Получение электролизом высокодисперсных порошков при относительно низких температурах может иметь большое практическое значение в производстве активного материала для железных пористых электродов при замене ими дефицитных кадмиевых электродов в щелочных аккумуляторах.

Электролитические порошки железа обладают высокой степенью чистоты. В ряде случаев удается синтезировать порошки, содержащие до 99,7 % железа. В высокодисперсных электролитических железных порошках (размер частиц от 2 до 10 мкм) такой чистоты отсутствует магнитный гистерезис, что делает данный материал необычайно ценным в электротехнической промышленности (сердечники для высокочастотных установок, магнитные сердечники для катушек в телефонии и телеграфии, для щеток переключателей, для индукционных катушек и различных других целей).

Однако следует отметить ряд трудностей при электролитическом синтезе железного порошка, связанных с особыми свойствами железа [1; 2].

Железо является электроотрицательным металлом, поэтому из кислых растворов совместно с ним выделяется водород. При работе в таких

условиях сильно снижается выход железного порошка по току и ухудшается качество катодного осадка в результате внедрения в него водорода. Последнее обстоятельство вызывает необходимость дополнительной операции отжига. Кроме того, чем больше водорода в осадке, тем с большим трудом он поддается дроблению. Наряду с этим при повышенной способности железа выделяться из растворов в виде гидроокисей последние могут быть причиной загрязнения порошка, что влечет за собой трудности в получении стандартного продукта и в осуществлении непрерывного технологического процесса.

Кроме того, электролитический способ, в противоположность способу химического восстановления окислов железа, не дает частиц достаточно однородных по гранулометрическому составу и, следовательно, такой порошок мало пригоден в технологиях, где требуется однородная дисперсность.

Механизмы влияния отдельных параметров электролиза на процессы формирования морфологии и свойства железного порошка изучены и представлены в ряде работ [1–3]. Однако для возможности регулирования свойств порошка железа 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 [4–8]. Решение этих вопросов позволит оптимизировать режим электролиза и прогнозировать свойства электролитического порошка железа.

Цель и задача исследований

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

Задача исследований – оценить степень влияния технологических параметров процесса электролиза на свойства дисперсного железного осадка, а также определить эффективность варьирования данными параметрами при синтезе железного порошка с заданной морфологией частиц.

Методика исследований

Таблица 2

Процесс электролитического осаждения дисперсного железа вели с использованием стального растворимого анода и титанового катода. Электролит – сульфатный; 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.

Морфологию частиц определяли с применением методов оптической микроскопии.

Результаты исследований

В первой серии опытов изучали совместное влияние на средний размер частиц (*d_{ср}*, мкм) и выход по току (*η*, %) следующих факторов электролиза: плотность тока (*i*, А/дм²), температура электролита (*t*, °С) и скорость циркуляции электролита (*v*, об./мин).

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

Во второй серии экспериментов исследовали совместное влияние на средний размер частиц и выход по току плотности тока, концентрации серной кислоты (*C(H₂SO₄)*, г/л) и железного купороса (*C(FeSO₄)*, г/л) в электролите.

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

По результатам экспериментальных исследований синтезированы регрессионные модели, адекватно описывающие изучаемые зависимости [7; 8].

$$d_{cp} = 337,3 - 9,6 \cdot i - 41,34 \cdot t - 50,27 \cdot v - 10,25 \cdot i \cdot v - 41,34 \cdot t \cdot v + 2,65 \cdot i \cdot t \cdot v, \text{ мкм}; \quad (1)$$

$$\eta = 83,5 + 5,5 \cdot t \cdot v, \%; \quad (2)$$

$$d_{cp} = 369 + 181 \cdot C(H_2SO_4) + 44 \cdot i \cdot C(H_2SO_4) - 84,33 \cdot i \cdot C(FeSO_4), \text{ мкм}; \quad (3)$$

$$\eta = 69,9 - 7 \cdot i \cdot C(H_2SO_4) - 9,833 \cdot i \cdot (H_2SO_4) \cdot C(FeSO_4), \%; \quad (4)$$

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>i</i> , А/дм ²	<i>t</i> , °С	<i>v</i> , об./мин	<i>d_{ср}</i> , мкм	<i>η</i> , %
1	60	80	700	232	85
2	40	80	700	343	86
3	60	40	700	303	88
4	40	40	700	272	89
5	60	80	100	265	83
6	40	80	100	345	98
7	60	40	100	212	78
8	40	40	100	398	63

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

№	Факторы			Функции отклика	
	<i>i</i> , А/дм ²	<i>C(H₂SO₄)</i> , г/л	<i>C(FeSO₄)</i> , г/л	<i>d_{ср}</i> , мкм	<i>η</i> , %
1	60	0,3	300	256	63
2	40	0,3	300	280	85
3	60	0	300	170	89
4	40	0	300	140	45
5	60	0,3	160	350	70
6	40	0,3	160	190	53
7	60	0	160	120	80
8	40	0	160	122	74

Из рассмотренных факторов процесса электролиза однозначно наиболее значительное влияние на исследуемые функции отклика имеет циркуляция электролита. Это подтверждают как математические расчеты, так и результаты экспериментальных исследований.

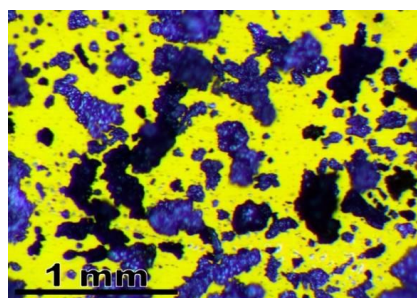
Повышение скорости циркуляции приводит к уменьшению разности концентрации ионов железа у катода и в глубине электролита.

Таким образом, запас разряжающихся ионов в прикатодном слое увеличивается, формирование и рост кристаллов происходит более равномерно, а осадки порошка железа формируются крупнозернистыми.

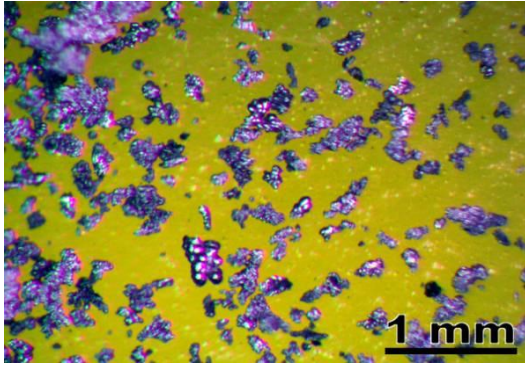
Данные результатов экспериментов, полученные с использованием средств математической статистики, подтверждаются экспериментальными исследованиями морфологии частиц железного катодного осадка при помощи средств оптической микроскопии (рис. 1).

При высоких скоростях циркуляции образуются частицы с менее развитой поверхностью, в то время как высокая плотность тока дает возможность получения частиц с хорошо развитой дендритной поверхностью.

Поэтому для получения дисперсных порошков железа (в том числе за счет дальнейшего размола полученного осадка) можно рекомендовать вести процесс электролиза при повышенной плотности тока и низкой скорости циркуляции электролита (рис. 2) [4; 7; 8].



a(a)



б(б)

Рис. 1. Микрофотографии частиц железного порошкового материала, синтезированного при скорости циркуляции электролита 700 об./мин. (а) и 100 об./мин. (б), плотности тока 40 А/дм², t = 40 °С / The photomicrography of the iron powder material particles, synthesized at the circulation speed of 700 rev./min. (a) and 100 rev./min. (b), the current densities 40 A/dm², t = 40 °C

Повышение плотности тока способствует повышению дисперсности катодного осадка (рис. 3).

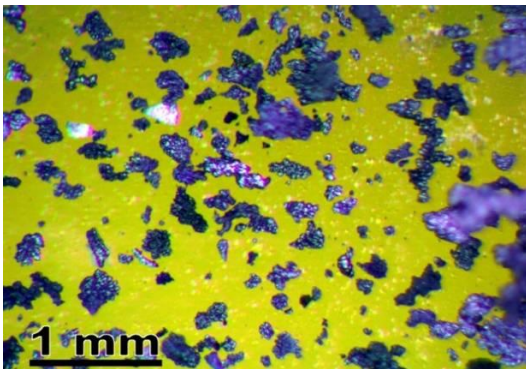
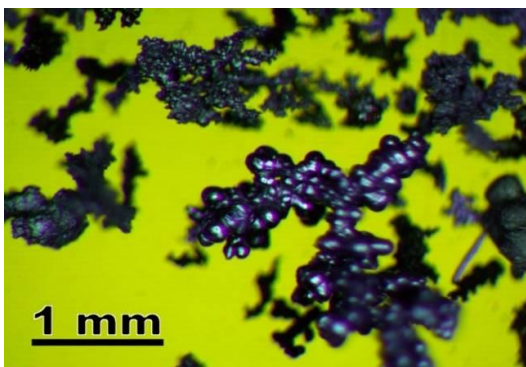
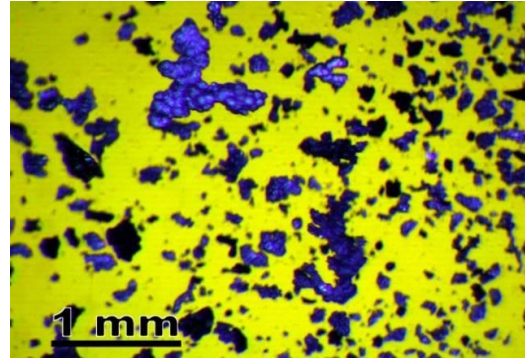


Рис. 2. Микрофотография частиц железного порошкового материала, синтезированного при скорости циркуляции электролита 100 об./мин., плотности тока 60 А/дм², t = 40 °С / The photomicrography of the iron powder material particles, synthesized at the circulation speed of 100 rev./min., the current densities 60 A/dm², t = 40 °C



а(а)



б(б)

Рис. 3. Микрофотографии частиц железного порошкового материала, синтезированного при плотностях тока 40 (а) и 60 А/дм² (б), скорости циркуляции 400 об./мин., t = 40 °С / The photomicrography of the iron powder material particles, synthesized at the current densities 40 (a) and 60 A/dm² (b), the circulation speed of 400 rev./min, t = 40 °C

Кроме того, с ростом плотности тока увеличивается влияние группы факторов, которые ослабляют процессы диффузии. В частности, перемешивание электролита способствует интенсивному выделению водорода и приводит к усилению конвективных потоков, которые формируются под влиянием выделяющегося джоулева тепла и возрастающей скорости изменения концентрации ионов железа в приэлектродных слоях электролита. Водород, восстанавливаясь совместно с ионами железа на катоде при осаждении рыхлого осадка, оказывает многоаспектное влияние на его формирование и на процесс электролиза в целом.

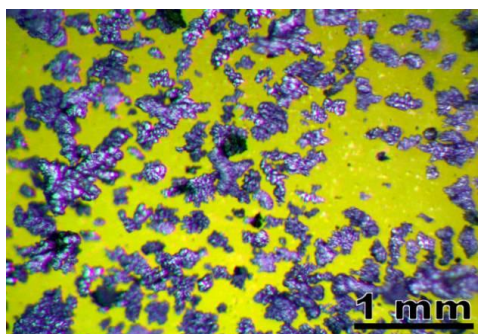
Выделяющийся на катоде водород содействует перемешиванию электролита, влияя на доставку ионов железа к катоду, и, таким образом, влияет на дисперсность и структуру частиц осадка. В результате интенсивного выделения водорода изменяется pH электролита в прикатодном слое, вплоть до величины образования гидроксидов и основных солей металла. Образовавшиеся при этом коллоидные частицы суспензии адсорбируются на гранях кристаллов, существенным образом влияя на дисперсность и дендритность осадка.

Таким образом, при высокой плотности тока дальнейшее измельчение осадка прекращается и появляется возможность получения более стабильных по дисперсности порошков.

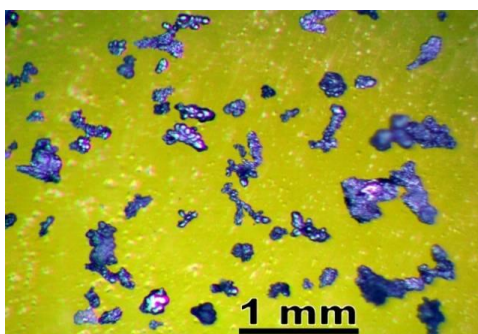
При интенсивном выделении водорода существенным образом уменьшается коэффициент полезного использования тока (выход по току) и, соответственно, возрастают затраты электроэнергии на получение порошка.

Влияние температуры на закономерности процесса катодного восстановления ионов железа имеет обратный характер, по сравнению с плотностью тока. С повышением температуры катодная поляризация уменьшается, осадки становятся более крупнокристаллическими,

возрастает предельная плотность тока. Такое влияние температуры на катодную поляризацию связано с увеличением скорости диффузии ионов железа. Экспериментальные исследования влияния температуры электролита на эффективность процесса катодного выделения железного порошка показали незначительное повышение выхода по току металла при увеличении температуры в пределах от 40 до 80 °С, за счет возрастания концентрации ионов металла вблизи катодной зоны (рис. 4).



a(a)



б(б)

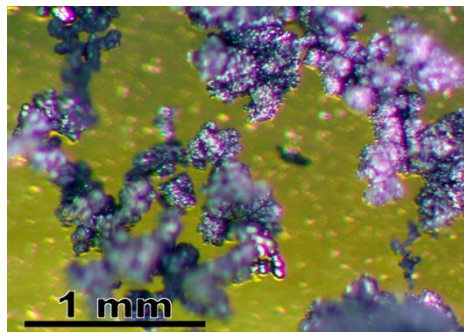
Рис. 4. Микрофотографии частиц железного порошкового материала, синтезированного при температурах электролита 80 (а) и 40 °С (б), скорости циркуляции 400 об./мин., плотности тока 50 А/дм² / The photomicrography of the iron powder material particles, synthesized at electrolyte temperature 80 (a) and 40 °C (b), the circulation speed of 400 rev./min, the current density 50 A/dm²

Анализ полученных уравнений дает возможность сделать вывод, что на выход по току существенно влияют два фактора одновременно: это температура и скорость циркуляции электролита.

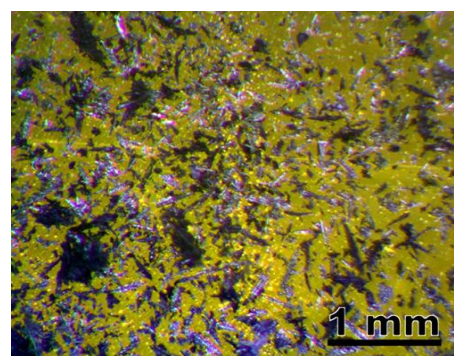
Содержание серной кислоты в электролите существенным образом влияет только на выход по току и затраты электроэнергии. С повышением кислотности электролита выход по току порошка железа значительно падает. Влияние кислотности на гранулометрический состав железного осадка менее незначительно. При этом с повышением концентрации серной кислоты наблюдается некоторое повышение дисперсности частиц железа.

Снижение концентрации сернокислого железа в пределах заданного интервала варьирования и, как следствие, ионов железа в электролите приводит к

образованию очень тонких и легких катодных осадков с насыпной плотностью менее 1,0 г/см³. Это связано с тем, что с уменьшением концентрации ионов железа в растворе затрудняются условия их разряда на катоде, осадок на катоде растет неравномерно, и увеличивается его дендритность [7; 8] (рис. 5).



a(a)



б(б)

Рис. 5. Микрофотографии частиц железного порошкового материала, синтезированного при концентрации железного купороса в электролите 300 (а) и 160 г/л (б), скорости циркуляции электролита 400 об./мин., плотности тока 50 А/дм² / The photomicrography of the iron powder material particles, synthesized in electrolyte at iron sulfate concentration 300 (a) and 160 g/l (b), the circulation speed of 400 rev./min, the current density 50 A/dm²

Выводы

1. По результатам экспериментов получены полиномиальные модели, которые адекватно описывают установленные взаимосвязи параметров. Наиболее значимыми факторами в заданных интервалах варьирования являются скорость циркуляции и температура электролита, плотность тока, а также концентрация железного купороса.

2. Установлено наличие синергетического эффекта совместного влияния на морфологию частиц железа кислотности электролита и катодной плотности тока. При одновременном увеличении этих параметров наблюдается значительное укрупнение частиц катодного железа.

3. Для получения высокодисперсных частиц электролитического железа (в том числе за счет дальнейшего размолва полученного осадка) можно

рекомендовать вести процесс электролиза при повышенной плотности тока и низкой скорости циркуляции электролита.

4. В целом необходимо отметить, что рассмотренные технологические факторы процесса электролиза в заданных интервалах варьирования

могут служить эффективными рычагами влияния на процесс электроосаждения дисперсного катодного осадка железа, а также на комплекс физических и технологических свойств электролитического железного порошка.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Акименко В. Б. Железные порошки / В. Б. Акименко, В. Я. Буланов, В. В. Рукин, Е. С. Смичкова, Л. Н. Заворохин. – Москва : Наука, 1982. – 264 с.
2. Кунтій О. І. Електрохімія та морфологія дисперсних металів / О. І. Кунтій. – Львів : Вид-во нац. ун-ту «Львівська політехніка», 2008. – 208 с.
3. Кудра О. Электролитическое получение металлических порошков / О. Кудра, Е. Гитман. – Киев : Изд-во АН УССР, 1952. – 144 с.
4. 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.
5. 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. – Режим доступа: <http://www.metinfo.dp.ua>
6. 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.
7. Внуков А. А. Исследование совместного влияния параметров электрокристаллизации на морфологию и дисперсность частиц порошка никеля / А. А. Внуков, А. Н. Головачев, В. А. Асмолков // Металознавство та термічна обробка металів. – 2012. – № 3–4 (58–59). – С. 7–81. – Режим доступа: <http://www.journals.uran.ua/index.php/2413-7405>
8. 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. Akimenko V.B., Bulanov V.Ya., Rukin V.V., Smychkova E.S. and Zavorohin L.N. *Geleznye poroshki* [Iron powders]. Moscow : Science Publ., 1982, 264 p. (in Russian).
2. 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).
3. Kudra O. and Gitman E. *Elektroliticheskoe poluchenie metallicheskih poroshkov* [Metal powder electrolysis synthesis]. Kyiv : USSR publishing of SA, 1952, 144 p. (in Russian).
4. 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]. *Visnyk NTU «KPI»* [Bulletin of NTU «KPI»]. 2011, no. 31, pp. 30–38. (in Russian).
5. Vnukov A.A. and Dragan I.G. *Sovmestnoye vliyanie funktsionalnyh 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).
6. Vnukov A.A., Golovachev A.N. and Taratuta Yu.I. *Issledovanie sovmnestnogo vliyania 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 Pridneprovyia*. [Science News Dnepr]. 2012, no. 2, pp. 61–65. (in Russian).
7. Vnukov A.A., Golovachev A.N. and Asmolkov V.A. *Issledovanie sovmnestnogo vliyania parametrov elektrokristallizatsii na morfologiyu i dispersnost chastits poroshka nikelya* [Research of electrocrystallisation parameters joint influence on nickel powder morphology and dispersion]. *Metaloznnavstvo ta termichna obrobka* [Metal Science and Heat Treatment of Metals]. 2012, no. 2, pp. 75–81. (in Russian).
8. Vnukov A.A., Golovachev A.N. and Belaya A.V. *Vliyanie 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. Л. В. Камкиной (Украина), д-ром техн. наук, проф. В. А. Гладких (Украина).

Поступила в редколлегию 25.11.2016.

Принята в печать 28.11.2016