

Д. М. ДОСПАЕВ^{1*}, Н. Ю. ЛУ², М. М. ДОСПАЕВ², И. И. МАЛАШКЕВИЧУТЕ¹

¹Карагандинский государственный технический университет

²Химико-металлургический институт им. Ж.Абишева, Караганда, *electrochimik@yandex.kz

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОВОССТАНОВЛЕНИЯ ОКСИДА МЕДИ (II) ПРИ ПОЛУЧЕНИИ ВЫСОКОДИСПЕРСНОЙ ПОРОШКОВОЙ МЕДИ

В потенциодинамических условиях изучено катодное поведение порошкового оксида меди CuO на медном, титановом и стальном электродах в растворе серной кислоты. Установлено, что восстановление CuO протекает на всех исследуемых электродах только по твердофазному механизму - сначала до Cu₂O, которая в дальнейшем разряжается до элементной меди. Рассчитаны значения порядка реакции и энергии активации. Методом Зейделя-Гаусса изучено влияние плотности тока (50-400 А/м²), концентраций серной кислоты (25-150 г/дм³) и ионов титана (IV) (0-4 г/дм³), продолжительности процесса (30-180 мин.), температуры электролита (20-65 °С) на выход по току порошка меди при катодном восстановлении оксида меди (II). Получена математическая модель выхода по току высокодисперсного порошка меди, с помощью которой рассчитана номограмма.

Ключевые слова: вольтамперограммы, катодное восстановление, электролиз, оксид меди (II), титан (IV), порошок меди.

Введение. Значительную долю в объеме производимых порошков металлов занимает медный порошок. Порошок меди получают механическими и физико-химическими способами [1]. Физико-химические методы включают в себя термическое разложение солей, цементацию, автоклавные и электрохимические способы получения порошка меди.

При производстве порошка меди примерно 4-5 % исходного продукта приходит в негодность за счет образования отходов в виде оксидов меди [2]. Создание новых методов переработки таких окисленных отходов является одной из актуальнейших задач. Вопросу катодного восстановления оксидов меди посвящено много работ. Причем приводимые авторами данные по механизму процесса восстановления весьма разноречивы. Согласно работе [3], восстановление твердых солей или оксидов металлов протекает путем следующих электродных реакций:

1 – электронный механизм - прямой разряд твердой частицы;

2 – участие в переносе электронов промежуточного вещества (X), образующегося на электроде в ходе процесса.

3 – распад частицы трудно растворимого

вещества на ионы и разряд иона металла или аниона на электроде.

Так, в работе [4] при изучении катодного восстановления оксида меди высказано предположение о твердофазном механизме процесса. Авторами показано, что восстановление порошка оксида меди в нейтральном растворе сульфата калия протекает стадийно через образование Cu₂O, который в дальнейшем восстанавливается до металлической меди с постоянной скоростью. По результатам проведенных исследований разработан способ получения порошка меди путем катодного восстановления оксида меди (II). По данному методу электролиз проводят в растворах Na₂SO₄, Na₂CO₃, NaOH, NaCl при температуре 80 °С и плотности тока 0,1-0,2 А/дм². Восстановление оксида меди (II) протекает по твердофазному механизму:



Также на катоде помимо основного процесса (1) протекает реакция выделения водорода:



Для более полного восстановления оксида меди (II) количество электричества необхо-

димо увеличить в 1,3-1,5 раз по сравнению с теоретическим значением.

Приведенные выше данные по электрохимическим методам получения порошка меди, в частности из оксида меди (II), позволяют констатировать, что значительный расход электроэнергии и невысокий выход по току обусловлены самим принципом получения порошка в нейтральных и щелочных растворах. В указанных средах катодное восстановление, как известно, протекает только по твердофазному механизму (1). При этом ток дополнительно расходуется на нежелательный побочный процесс выделения водорода (2).

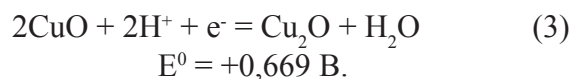
Целью наших исследований являлось создание принципиально нового метода получения порошка меди из оксида меди (II), позволяющего, не снижая качества продукта, повысить выход по току и снизить расход электроэнергии.

Экспериментальная часть. Для выполнения поставленной задачи нами предварительно изучено электрохимическое поведение оксида двухвалентной меди в сернокислой среде с последующим использованием полученных результатов для получения порошка меди в гальваностатических условиях. Катодное поведение оксида меди (II) изучали в потенциодинамических условиях на медном, титановом и стальном электродах в растворе серной кислоты. Поляризационные кривые снимали с помощью прижимного электрода специальной конструкции, позволяющей оперативно менять материал рабочего электрода и варьировать величину его поверхности [5]. Вольтамперные измерения проводили при температуре 25 ± 1 °C, скорости развертки потенциала от 2 до 80 мВ/с и концентрации электролита 50-150 г/дм³. В отличие от известных электродов [3,4] преимуществом конструкции прижимного электрода является возможность поляризовать порошки за счет прямого контакта с поверхностью электрода.

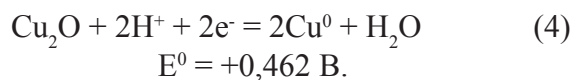
Электролитическое получение порошка меди проводили в стеклянном электролизере емкостью 0,3 дм³ с донным расположением электрода-катода. Катод площадью 0,005 м² изготовлен из меди, анод такой же площади - из свинца. Исходное количество

порошкового оксида CuO составило 3,0 г. В качестве катализатора использовали сульфат четырехвалентного титана. Выход по току порошка меди рассчитывали по разности исходного количества оксида меди (II) и остаточного содержания оксида меди (II) в осадке после электролиза. Фазовый анализ осадка на содержание металлической меди и оксида двухвалентной меди проводили по методу Подчайновой В.Н. [6]. По данной методике осадок после электролиза обрабатывали раствором серной кислоты (1:3). При этом происходило растворение оксида меди. Полученный раствор фильтровали, медь в фильтрате определяли иодометрическим титрованием и пересчитывали на CuO.

Обсуждение результатов. Нами было установлено, что на меди, титане и нержавеющей стали восстановление CuO в сернокислых растворах (рисунок 1) протекает по следующему механизму. Независимо от материала электрода на поляризационных кривых зафиксированы две волны. Первая волна при потенциале $\sim +0,2$ В отвечает протеканию реакции прямого твердофазного разряда частиц CuO по электронному механизму:

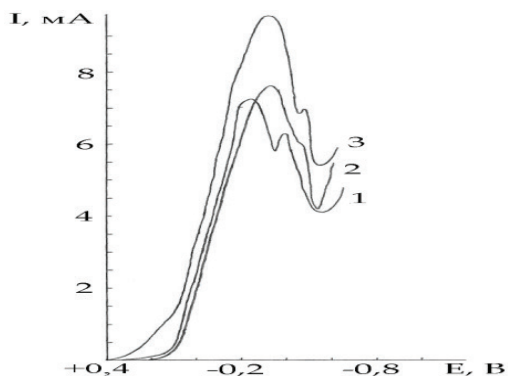


Вторая волна соответствует дальнейшему восстановлению частиц Cu₂O до металлического состояния по реакции:



При снятии катодной поляризационной кривой поверхность электродов в месте контакта с навеской CuO постепенно покрывается элементной медью.

Восстановление оксида меди (II) в сернокислой среде протекает на всех исследуемых электродах, потенциал начала восстановления практически не зависит от материала подложки и процесс протекает с некоторым перенапряжением. Существенное влияние на скорость катодного восстановления оксида меди (II) оказывает концентрация фонового раствора серной кислоты (рисунок 2).



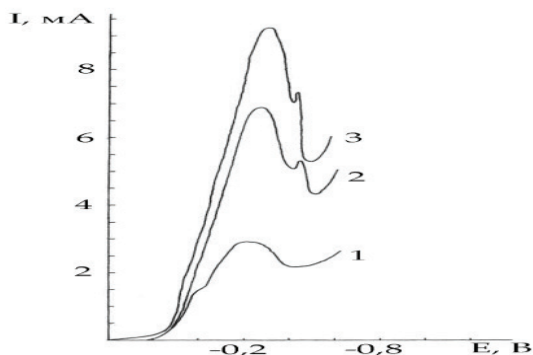
1 – медь; 2 – нержавеющая сталь; 3 – титан

Рисунок 1 - Катодные поляризационные кривые оксида меди (II) на твердых электродах в растворе серной кислоты, 100г/дм³

Зависимость, построенная в координатах величина предельного тока – концентрация серной кислоты, имеет возрастающий характер. Найдено значение порядка реакции по серной кислоте, равное 1,08, что свидетельствует о влиянии концентрации H_2SO_4 на скорость катодного восстановления оксида меди (II) согласно принципу Ле-Шателье. Кроме того, с увеличением концентрации повышается электропроводность раствора.

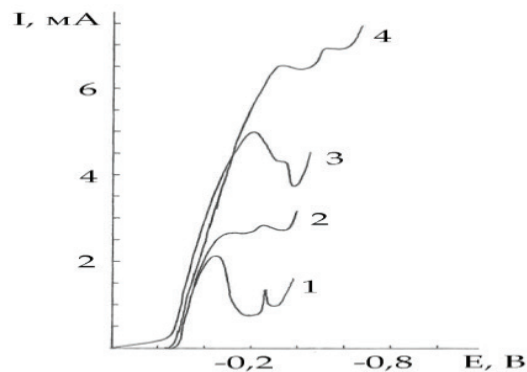
Влияние скорости развертки потенциала изучено нами на стальном электроде (рисунок 3).

Увеличение скорости развертки от 4 до 40 мВ/с способствует повышению высоты максимумов при потенциалах $\sim +0,1$ и $-0,2$ В соответственно, а также смещению потенциалов пика в более отрицательную область.



1 – 50 г/дм³; 2 – 100 г/дм³; 3 – 150 г/дм³

Рисунок 2 - Влияние концентрации серной кислоты (г/дм³) на катодное восстановление CuO на электроде из нержавеющей стали



1 – 4 мВ/с; 2 – 10 мВ/с; 3 – 20 мВ/с; 4 – 40 мВ/с

Рисунок 3 - Влияние скорости развертки потенциала (мВ/с) на высоту волны восстановления CuO

Так как оксид меди (II) восстанавливается по электронному механизму, то становится понятным увеличение высоты первой волны.

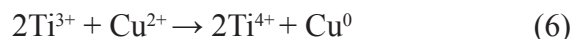
Первый слой оксида, находящийся в соприкосновении с поверхностью катода, восстанавливается до металлической меди и работает в дальнейшем как медный электрод, на котором идет восстановление следующего слоя частиц оксида меди (II). То есть происходит наращивание поверхности электрода, и восстановление CuO протекает глубже с увеличением скорости развертки потенциала.

В сернокислых растворах, наряду с катодным восстановлением оксида меди (II) протекает реакция побочного выделения водорода:



Вследствие этого выход по току порошка меди снижается до 70 %, т.е. до 30 % тока затрачивается на выделение водорода.

В работе [7] были рассмотрены другие варианты получения порошка меди, например, химическим восстановлением ионов меди трехвалентным титаном:



Авторами [8] было установлено, что повышение выхода по току порошка меди на 15-18 % достигается при совмещении двух процессов: непосредственного разряда ионов меди и окислительно-восстановительной реакции (6). В присутствии титана (IV) на катоде, помимо реакции восстановления

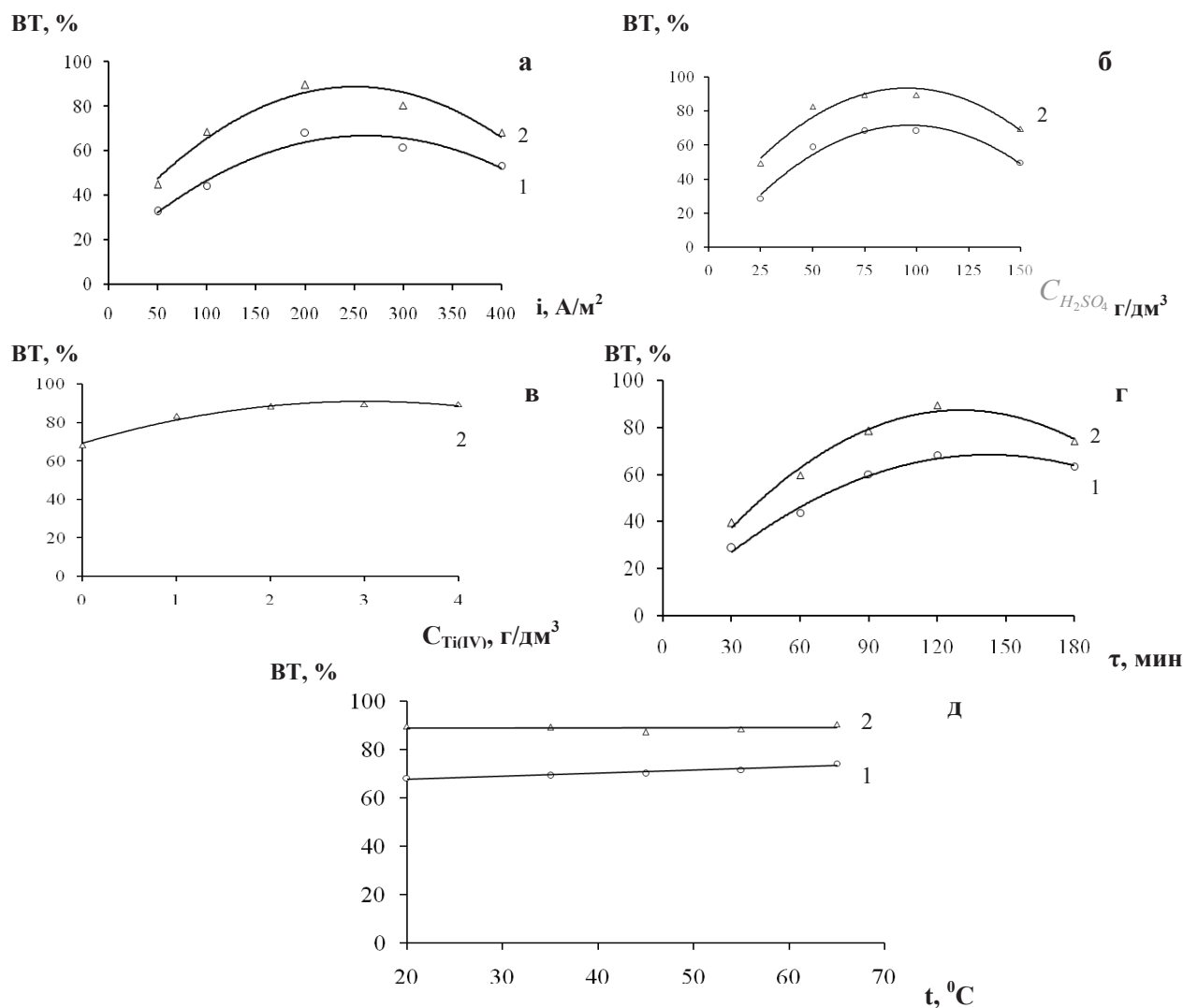
ионов Cu^{2+} и реакции (5), протекает процесс его восстановления:



Образующийся трехвалентный титан взаимодействует с медью по реакции (6), за счет протекания которой образуется дополнительное количество порошка меди, и выход по току соответственно возрастает. Одновременно регенерируются ионы титана (IV), которые вновь восстанавливаются на катоде и участвуют в следующем акте процесса, то есть в данном случае ионы $\text{Ti}^{(IV)}$ являются катализатором. Таким образом, та часть тока, которая в известных электрохимических способах получения порошка меди расходуется на вы-

деление водорода, при введении титана (IV) в раствор расходуется на его восстановление и, фактически, на образование порошка меди.

Методом Зейделя-Гаусса-Малышева исследовано влияние плотности тока, концентрации серной кислоты, титана (IV), продолжительности электролиза и температуры электролита на выход по току порошка меди. Для исключения побочного процесса выделения водорода при получении порошка меди из оксида меди (II) нами использована каталитическая система $\text{Ti}^{(IV)}/\text{Ti}^{(III)}$. Были построены точечные графики частных зависимостей, которые приведены на рисунке 4.



Точки – экспериментальные данные; линии – рассчитанные по уравнениям (11) и (12);
 факторы: а – плотность тока; б – концентрация серной кислоты; в – концентрация титана (IV);
 г – продолжительность; д – температура электролита
 1 – без титана (IV), уравнение (10); 2 – с добавлением титана (IV), уравнение (11)

Рисунок 4 – Зависимость выхода по току порошка меди из оксида меди (II) от заданных факторов

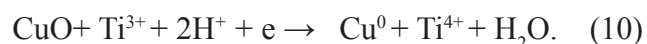
Из рисунка 4а видно, что с ростом плотности тока выход по току порошка меди первоначально повышается, а затем снижается. В присутствии Ti (IV) наблюдается такая же тенденция, однако выход по току при этом гораздо выше. Мы полагаем, что в присутствии титана (IV) помимо основного твердофазного процесса катодного восстановления CuO [9] по реакции:



протекает реакция восстановления ионов меди, образующихся за счет взаимодействия CuO с серной кислотой [6], по реакции:



Образовавшиеся по реакции (7) ионы Ti (III) в прикатодном пространстве взаимодействуют с ионами двухвалентной меди по реакции (6) и оксидом меди (II):



Ионы Ti (IV) вновь восстанавливаются на катоде до Ti (III) и снова участвуют в процессе восстановления Cu²⁺, CuO.

Концентрация серной кислоты, как видно из рисунка 4б, оказывает существенное влияние на выход по току порошка меди. Так, с увеличением кислотности растворов до 100 г/дм³ в присутствии катализатора выход по току CuO - 89,6 %, тогда как выход по току CuO при той же концентрации в отсутствие титана (IV)

всего лишь 68,42 %. Относительно высокий выход по току в присутствии Ti (IV) обусловлен протеканием помимо основных процессов также протеканием реакции (10).

С повышением концентрации Ti (IV) (рисунок 4 в) выход по току увеличивается, а при достижении концентрации 3 г/дм³ выход по току практически не меняется, т.е. имеется тенденция к «насыщению», это свидетельствует о каталитическом действии ионов Ti (IV).

С увеличением продолжительности электролиза в интервале 30 – 120 минут наблюдается повышение выхода по току (рисунок 4 г), при этом установлено, что без Ti (IV) выход по току с 28,64 % увеличивается только до 68,3 %, а с его участием - с 39,5 % до 89,63 %. Дальнейшее увеличение времени электролиза приводит к снижению выхода по току порошка, что объясняется окончанием процесса восстановления, то есть исчерпанием запасов CuO, а также усилением побочного процесса выделения водорода.

Как видно из рисунка 4д, в интервале температур 20-65 °С выход по току порошка меди в присутствии Ti (IV) составляет 88,0 %, тогда как без ионов титана - 67-71 %.

Адекватность полученных частных зависимостей определяли по коэффициенту корреляции R и его значимости t_R (таблицы 1, 2).

Таблица 1 – Коэффициент корреляции R и его значимость t_R для частных функций выхода по току порошка меди при катодном восстановлении оксида меди (II) без титана (IV)

Функция выхода по току, %	R	Условие t _R >2	Значимость
$BT = -0,0008i^2 + 0,401i + 14,046$	0,942	36,50>2	значима
$BT = -0,008C_{\text{H}_2\text{SO}_4}^2 + 1,537C_{\text{H}_2\text{SO}_4} - 2,515$	0,968	5,347>2	значима
$BT = -0,003\tau^2 + 0,931\tau + 2,289$	0,989	2,346>2	значима
$BT = 0,126t + 65,11$	0,902	1,04<2	не значима

Таблица 2 – Коэффициент корреляции R и его значимость t_R для частных функций выхода по току порошка меди при катодном восстановлении оксида меди (II) с титаном (IV)

Функция выхода по току, %	R	Условие t _R >2	Значимость
$BT = -0,0016i^2 + 0,511i + 24,58$	0,938	36,50>2	значима
$BT = -0,008C_{\text{H}_2\text{SO}_4}^2 + 1,578C_{\text{H}_2\text{SO}_4} + 18,31$	0,944	5,347>2	значима
$BT = -2,435C_{\text{Ti(IV)}}^2 + 14,617C_{\text{Ti(IV)}} + 69,284$	0,973	9,597>2	значима
$BT = -0,0049\tau^2 + 1,287\tau + 3,467$	0,984	2,346>2	значима
$BT = -0,006t + 88,75$	0,007	0<2	не значима

Полученные уравнения для выхода по току порошка меди из оксида меди (II) без каталитической системы Ti (IV)/Ti (III) и в при-

сутствии ионов титана с учетом значимости обобщаются по центральному экспериментальному значению [10-12].

Для оксида меди (II):

без $C_{Ti(IV)}$:

$$BT = \frac{[65,5521(-0,0008i^2 + 0,401i + 14,046)(-0,008C_{H_2SO_4}^2 + 1,537C_{H_2SO_4} - 2,515)]}{281150,3[(-0,003\tau^2 + 0,931\tau + 2,289)]^{-1}}, \quad (11)$$

с $C_{Ti(IV)}$:

$$BT = \frac{[89,8998(-0,0016i^2 + 0,511i + 24,58)(-0,008C_{H_2SO_4}^2 + 1,578C_{H_2SO_4} + 18,316)]}{62410372,0[(-2,435C_{Ti(IV)}^2 + 14,617C_{Ti(IV)} + 69,284)(-0,0049\tau^2 + 1,287\tau + 3,467)]^{-1}} \quad (12)$$

Значения коэффициента корреляции и его значимость, полученные для CuO, $R=0,51$, $t_R=2,41 > 2$ и $R=0,9711$, $t_R=72,222$ подтверждают адекватность описания данных эксперимента уравнениями (11) и (12). Доверительный интервал, вычисленный через

t_R [11], составляет 8,6020 %. С использованием полученной модели процесса (12) была построена номограмма для выхода по току медного порошка из оксида меди (II) (таблица 3). С помощью номограммы определены оптимальные области ведения процесса.

Таблица 3 – Номограмма выхода по току (%) порошка меди из оксида меди (II) от заданных факторов

$i, A/m^2$		50				150				300				450			
$C_{Ti(IV)}, g/dm^3$	$\frac{C_{H_2SO_4}}{\tau, мин}$	30	60	90	120	30	60	90	120	30	60	90	120	30	60	90	120
0	15	6,0	8,6	9,6	9,1	9,9	14,2	15,9	15,1	11,1	15,9	17,8	16,8	6,6	9,4	10,6	10,0
	60	17,5	25,0	28,0	26,5	28,9	41,3	46,2	43,8	32,3	46,1	51,7	48,9	19,2	27,4	30,7	29,1
	120	24,2	34,6	38,7	36,7	40,0	57,2	64,1	60,7	44,7	63,9	71,6	67,8	26,6	38,0	42,6	40,3
	150	23,9	34,2	38,3	36,2	39,6	56,5	63,3	60,0	44,2	63,1	70,7	67,0	26,3	37,5	42,1	39,8
1,5	15	7,43	10,6	11,9	11,3	12,3	17,6	19,7	18,6	13,7	19,6	22,0	20,8	8,2	11,7	13,1	12,4
	60	21,6	30,9	34,6	32,8	35,8	51,1	57,2	54,2	40,0	57,1	64,0	60,6	23,8	33,9	38,0	36,0
	120	30,0	42,8	47,9	45,4	49,5	70,8	79,3	75,1	55,4	79,1	88,6	83,9	32,9	47,0	52,7	49,9
	150	29,6	42,3	47,4	44,9	48,9	69,9	78,3	74,2	54,7	78,1	87,5	82,9	32,5	46,5	52,0	49,3
3	15	7,9	11,3	12,7	12,0	13,1	18,7	20,9	19,8	14,6	20,9	23,4	22,1	8,69	12,4	13,9	13,2
	60	23,0	32,9	36,8	34,9	38,0	54,3	60,9	57,7	42,5	60,7	68,0	64,4	25,3	36,1	40,5	38,3
	120	31,9	45,5	51,0	48,3	52,7	75,3	84,4	79,9	58,9	84,2	94,3	89,3	35,0	50,0	56,1	53,1
	150	31,5	45,0	50,4	47,7	52,1	74,4	83,3	78,9	58,2	83,1	93,1	88,2	34,6	49,4	55,4	52,4
5	15	7,1	10,1	11,3	10,7	11,7	16,7	18,7	17,7	13,1	18,6	20,9	19,8	7,76	11,1	12,4	11,8
	60	20,5	29,4	32,9	31,1	34,0	48,6	54,4	51,5	38,0	54,3	60,8	57,6	22,6	32,3	36,1	34,2
	120	28,5	40,7	45,6	43,2	47,1	67,3	75,4	71,4	52,6	75,2	84,2	79,8	31,3	44,7	50,1	47,4
	150	28,1	40,2	45,0	42,6	46,5	66,5	74,5	70,5	52,0	74,3	83,2	78,8	30,9	44,2	49,5	46,9

Выводы: Таким образом, в потенциодинамических условиях методом вольтамперометрии изучено катодное поведение оксида двухвалентной меди на медном, титановом и стальном электродах в растворах серной кислоты. Установлено, что восстановление CuO в сернокислой среде протекает на всех исследуемых электродах главным образом путем прямого переноса электронов, то есть только по твердофазному механизму - сначала до Cu_2O , который в дальнейшем разряжается до элементной меди. Полученные величины энергии активации свидетельствуют о протекании процесса катодного восстановления оксида меди как в диффузионном, так и в диффузионно-кинетическом режиме. Рассчитанное значение порядка реакции указывает на влияние концентрации электролита на скорость катодного восстановления оксида меди.

В гальваностатических условиях изучено влияние плотности тока ($50\text{--}400 \text{ А/м}^2$), концентрации серной кислоты ($25\text{--}150 \text{ г/дм}^3$), ионов титана (IV) ($0\text{--}4 \text{ г/дм}^3$), продолжительности электролиза ($30\text{--}180 \text{ мин.}$), температуры электролита ($20\text{--}65 \text{ }^\circ\text{C}$) на выход по току порошка меди при катодном восстановлении CuO . Определены оптимальные условия электролитического получения порошка меди из оксида меди с использованием электрокаталитической системы Ti (IV)/Ti (III) . Получена математическая модель выхода по току порошка меди, с помощью которой рассчитана номограмма.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Номберг М.И. Производство медного порошка электролитическим способом. – М.: Металлургия, 1971. 134с.
- 2 Брынза А.П., Кривун С.В. Электролизер для получения медного порошка // Порошковая металлургия. - 1962. - № 1. - С. 72-74.
- 3 Даушева М.Р., Сонгина О.А. Поведение суспензии труднорастворимых веществ на электродах // Успехи химии. - 1973. - Т. 42. - № 2. - С.323-342.
- 4 Завгородняя Е.Ф., Голушко В.П., Дорош Т.П. К вопросу о механизме катодного восстановления окиси меди // Укр. хим. журн. - 1961. - № 1. - С. 43 – 47.
- 5 Баешова А.К., Баешов А., Угорец М.З., Букетов Е.А. Катодная поляризация дисперсного селена в растворах гидроокиси натрия на твердых электродах // ЖПХ - 1980. - № 9. - С. 2122-2124.
- 6 Подчайнова В.Н. Определение закиси, окиси и металлической меди в медных порошках // ЖАХ. –1952. –Т.7. –№ 5. – С. 305-311.

7 Помосов А.В., Котовская Н.Л. Исследование электровосстановления сульфата титана (IV) при получении высокодисперсной порошковой меди // ЖПХ. - 1966. - Т. 39. -№ 9. - С. 1960-1965.

8 А.С. 1082066. СССР. Способ получения порошка меди. Баешов А., Кожакон Б.Е., Букетов Е.А. опубл. 1983.

9 Доспаев Д.М., Иванская Л.А. Перспективы электрохимических способов при переработке окисленных отходов производства порошковой меди // Беремжановский съезд по химии и химической технологии: Матер. VI Междунар. конф., Караганда, 2008. - С. 98-102.

10 Малышев В.П. Кинетический и технологический анализ обобщающих математических моделей химико-металлургических процессов // Доклады НАН РК. - 2008. - № 2. - С. 13-18.

11 Доспаев М.М. Влияние некоторых факторов электролиза на дисперсность и выход по току субмикронного порошка меди // Вестник КарГУ, сер.хим. - 2008. - № 1 (49). - С.26-29.

12 Малышев В.П. К определению ошибки эксперимента, адекватности и доверительного интервала аппроксимирующих функций // Вестник МОН РК, НАН РК.- 2000. - № 4. - С. 22-30.

REFERENCES

- 1 Nomberg M.I. M.: *Metallurgiya*. **1971**, 134 (in Russ.)
- 2 Brynza A.P., Krivun S.V. *Poroshkovaya metallurgiya*. **1962**, 1, 72-74 (in Russ.)
- 3 Dausheva M.R., Songina O.A. *Uspehi khimii*. **1973**, 42, 2, 323-342 (in Russ.)
- 4 Zavgorodyaya E.F., Golushko V.P., Dorosh T.P. *Ukr. khim. zhurn*. **1961**, 1, 43-47 (in Russ.).
- 5 Baeshova A.K., Baeshov A., Ugorets M.Z., Buketov E.A. *Zh. Prikl. khimii*. **1980**, 9, 2122-2124 (in Russ.).
- 6 Podchajnova V.N. *Zurn. analit. khimii*, **1952**, 7. 5, 305-311 (in Russ.).
- 7 Pomosov A.V., Kotovskaya N.L. *Zh. prikl. khimii*. **1966**, 39, 9, 1960-1965 (in Russ.).
- 8 A.S. 1082066 SSSR. *Sposob polucheniya poroshka medi*. Baeshov A., Kozhakov B.E., Buketov E.A. opubl. **1983** (in Russ.).
- 9 Dospaev D.M., Ivanskaya L.A. *VI Mezhdunar. Beremzhanovskij s'ezd po khimii i khimicheskoy tekhnologii*. Karaganda, **2008**, 98-102 (in Russ.).
- 10 Malyshev V.P. *Doklady NAN RK*. **2008**, 2, 13-18 (in Russ.).
- 11 Dospaev M.M. *Vestnik Kar.GU, ser.khim.* **2008**, 1 (49), 26-29(in Russ.).
- 12 Malyshev V.P. *Vestnik MON RK, NAN RK*. **2000**, 4. 22-30 (in Russ.).

Түйіндеме

Потенциодинамикалық жағдайда күкірт қышқылы ертіндісінде мыс, титан және құрыш электродтарында CuO ұнтағының катодтық қасиеті зерттелді. CuO барлық электродтарда тек қана қаттыфазалық механизм арқылы бастапқыда Cu_2O дейін одан кейін элементті мысқа айналады. Реакцияның реттік көрсеткіші және активациялау қуаты есептелді. Зейдель-Гаусс әдісімен тоқ тығыздығының (50-400 A/m^2), күкірт қышқылы (25-150 г/дм^3), титан (IV) иондарының (0-4 г/дм^3) концентрацияларының, электролиз ұзақтығының (30-180 мин.), электролит температурасының (20-65 $^{\circ}\text{C}$) эквивалентті мыс тотығын катодты тотықсыздандырғанда түзілетін мыс ұнтағының тоқ шығымына әсері анықталды. Мыс ұнтағы тоқ шығымының математикалық моделі алынды, соның көмегімен номограмма есептелді.

Түйінді сөздер: вольтамперограммалар, катодтық тотықсыздану, электролиз, мыс тотығы (II), титан (IV), мыс ұнтағы.

Summary

Cathodic behavior of CuO powder on copper, titanium and steel electrodes was studied in sulfuric acid solution in potential-dynamic conditions. It was found that the reduction of CuO proceeds on all investigated electrodes by only solid phase mechanism, firstly up to Cu_2O which subsequently discharges up to elemental copper. The values of the reaction order and the activation energy are calculated. Influence of current density (50-400 A/m^2), concentrations of sulfuric acid (25-150 g/dm^3) and titanium (IV) ions (0-4 g/dm^3), process duration (30-180 min) and electrolyte temperature (20-65 $^{\circ}\text{C}$) on the copper powder current yield at the cathodic reduction of copper oxide (II) was studied by Gauss-Seidel method. Mathematical model of the current yield of superfine copper powder was given. By using this mathematical model the nomogram was calculated.

Keywords: voltamperograms, cathodic reduction, electrolysis, copper oxide (II), titanium (IV), copper powder.

Поступила 27.03.2014.