ОСОБЕННОСТИ ЦЕМЕНТАЦИИ ЗОЛОТА ЭЛЕКТРОЛИЗНЫМИ ЦИНКОВЫМИ ПОРОШКАМИ В РЕЖИМЕ ПЕРКОЛЯЦИИ

© 2020 г. **К.Д. Наумов, В.Г. Лобанов**

Уральский федеральный университет (УрФУ)
им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург

Статья поступила в редакцию 18.06.19 г., доработана 02.09.19 г., подписана в печать 05.09.19 г.

Изучены физико-химические особенности дендритных цинковых порошков и их влияние на показатели цементационного осаждения золота из цианистых растворов. В лабораторных условиях получены 3 цинковых порошка методом электроэкстракции при различных условиях, различающиеся по крупности и площади удельной поверхности. Свойства полученных цинковых порошков и порошка, применяемого для цементации золота в настоящее время, оценены методами SEM (Jeol JSM-6390LA), BET (Gemini VII 2390) и лазерной дифракцией (Sympatec HELOS & RODOS). Показано, что электролизные порошки обладают высокой удельной площадью поверхности (в 1,3–2,6 раз больше) и низкой насыпной плотностью (в 3,1–3,8 раз меньше) относительно цинкового порошка, используемого сейчас для цементации золота. Обнаружено, что за счет особых физических свойств электролизные порошки имеют низкое гидравлическое сопротивление, что дает возможность отказаться от внесения инертных добавок при цементации, увеличить производительность агрегатов и уменьшить нагрузку на оборудование. Отказ от применения инертных добавок дополнительно обеспечит повышение содержания золота в получаемом цементате. Дендритная форма полученных цинковых порошков компенсирует высокую крупность, что позволяет осаждать золото с высокой эффективностью. При длительном цикле цементации участок эффективного осаждения золота (извлечение более 97 %) у электролизного порошка оказался короче, чем у мелкодисперсного, используемого в данное время. Однако на практике цикл цементации всегда ограничен пропускной способностью мелкодисперсного порошка, и полностью реализовать потенциал цинка не представляется возможным. В разгружаемом цементате, как правило, содержится 25–35 % неизрасходованного цинка. Проведенные исследования показывают эффективность применения электролизного цинкового порошка для цементации золота из цианистых растворов.

Ключевые слова: золото, цинк, дендритный порошок, цементация, электроэкстракция, Меррилл-Кроу, перлит.

Наумов К.Д. — инженер кафедры металлургии цветных металлов (МЦМ) УрФУ
(620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19). E-mail: naumov.konstantin@urfu.ru.

Лобанов В.Г. — канд. техн. наук, доцент кафедры МЦМ УрФУ. E-mail: lobanov-vl@yandex.ru.

Для цитирования: Наумов К.Д., Лобанов В.Г. Особенности цементации золота электролизными цинковыми порошками в режиме перколяции. *Известия вузов. Цветная металлургия*. 2020. No. 1. С. 19–26.
DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2020-1-19-26.

Naumov K.D., Lobanov V.G.

Features of gold cementation in percolation mode by electrolytic zinc powders

The study covers physicochemical features of dendritic zinc powders and their effect on gold cementation from cyanide solutions. Three zinc powders were obtained in a laboratory environment by electroextraction at different conditions, and these powders featured various particle size and specific surface area. The properties of zinc powders obtained and powder currently used for gold cementation were evaluated using SEM (Jeol JSM-6390LA), BET (Gemini VII 2390) and laser diffraction (Sympatec HELOS & RODOS) methods. It is shown that electrolytic powders have high specific surface area (1.3–2.6 times more) and a low bulk density (3.1–3.8 times less), relative to zinc powder currently used for gold cementation. It was found that due to specific physical properties electrolytic powders have low hydraulic resistance, which eliminates the need for inert additives introduced during cementation, increases unit capacity and reduces the load on equipment. Inert additives elimination will additionally increase the gold content in the resulting product. The dendritic morphology of zinc powders obtained compensates high particle size resulting in the high efficiency of gold precipitation. At the long cementation cycle the effective gold deposition area (with gold extraction of more than 97 %) turned out to be shorter for electrolytic powder compared to fine powder currently used. However, in practice, the cementation cycle is always limited by fine powder throughput and it is not possible to achieve the full zinc potential. The resulting cementation

product usually contains 25–35 % of unused zinc. These studies show the effectiveness of using electrolytic zinc powder for gold cementation from cyanide solutions.

Keywords: gold, zinc, dendritic powder, cementation, electroextraction, Merrill-Crowe, perlite.

Naumov K.D. – engineer of the Department of metallurgy of non-ferrous metals (MNFM), Ural Federal University (UrFU) (620002, Russia, Yekaterinburg, Mira str., 19). E-mail: naumov.konstantin@urfu.ru.

Lobanov V.G. – Cand. Sci. (Tech.), associate prof. of the Department of MNFM, UrFU. E-mail: lobanov-vl@yandex.ru.

Citation: Naumov K.D., Lobanov V.G. Features of gold cementation in percolation mode by electrolytic zinc powders. *Izvestiya Vuzov. Tsvetnaya Metallurgiya (Universities' Proceedings. Non-Ferrous Metallurgy)*. 2020. No. 1. P. 19–26 (In Russ.). DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2020-1-19-26.

Введение

Цианистое выщелачивание остается самым распространенным методом извлечения золота в отечественной и мировой практике переработки золотосодержащего сырья. Важнейшая стадия этой технологии — извлечение золота из продуктивных растворов. Одним из распространенных подходов является цементация, в качестве преимуществ которой можно выделить высокую скорость процесса и возможность за одну стадию получить продукт, содержащий металлическое золото. Совершенствование процессов цементации должно быть направлено на разработку условий использования более дешевых цементирующих металлов и дисперсных систем на их основе, снижение удельных расходов, получение более кондиционных цементных осадков.

Технологическое исполнение процесса цементации, как правило, основано на перколяционной модели взаимодействия цементирующего металла и золотосодержащего раствора. Наибольшее распространение получил процесс Меррилл-Кроу [1, 2], предусматривающий фильтрацию продуктивного раствора через смесь освинцованного тонкодисперсного цинкового порошка и инертной пористой добавки (перлит, диатомовая земля, кизельгур).

При анализе особенностей технологии цементации тонкодисперсным цинковым порошком необходимо отметить ряд негативных аспектов. Цементация на установках Меррилл-Кроу проводится в циклическом режиме. Принудительную подачу на пресс-фильтр продуктивного раствора с внесенными в него освинцованным цинком и инертной добавкой осуществляют до тех пор, пока по производственным причинам не появляется необходимость остановки и разгрузки цементата. Чаше остановка происходит при чрезмерном нарастании гидравлического сопротивления осадков на фильтрующей поверхности. Самозапирание сис-

темы ограничивает толщину слоя и продолжительность цикла цементации. Вместе с тем периодически, в связи с операционными ошибками при дозировании перлита и смешении его с цинковым порошком, возникают ситуации, когда фильтры запираются уже на первые сутки процесса цементации. После снятия цементата и регламентной регенерации фильтроткани установку вновь приводят в рабочее состояние и возобновляют подачу раствора. Указанный характер работы обуславливает повышенные трудозатраты на обслуживание и расход электроэнергии (для работы нагнетающих насосов).

Важной особенностью рассматриваемой технологии является необходимость большой площади фильтрования и значительных габаритов установки. Большая площадь фильтрования обусловлена малой толщиной слоя цементного осадка, которая на практике не превышает 5–10 мм.

При использовании тонкодисперсных порошков указанные проблемы неустранимы. Крупнодисперсные порошки, получаемые методами дистилляции или диспергации расплава, имеют существенно меньшую удельную площадь поверхности, скорость цементации и полнота осаждения золота при их применении недопустимо малы.

Использование крупнодисперсных порошков, обладающих при этом высокой удельной площадью поверхности, может решить проблему самозапирания цементирующего слоя. Получить такие цинковые порошки возможно электроэкстракцией из щелочных растворов. Щелочное выщелачивание с последующей электроэкстракцией цинка в последнее время изучается применительно к переработке техногенного сырья (пыли сталеплавильных агрегатов, вельц-возгоны) [3–7]. За счет этого может быть достигнуто снижение стоимости металла-цементатора.

Ранее показана эффективность осаждения золота дендритными цинковыми порошками из растворов выщелачивания гравитационных концентратов [8, 9]. Цель настоящей статьи — исследование физико-химических особенностей дендритных порошков в сравнении с мелкодисперсными, применяемыми в настоящее время, а также изучение влияния этих особенностей на показатели цементационного осаждения золота.

Физико-химические свойства изучаемых цинковых порошков

В рамках работы были исследованы следующие порошки:

— цинковый марки ПЦР-0, используемый в промышленных условиях для цементации золота на золотоизвлекательных фабриках, полученный конденсацией паров при дистилляции цинка марки Ц0 (далее обозначен как традиционный порошок);

— цинковый, полученный по технологии электроэкстракции из щелочных растворов (далее указывается как электролизный или дендритный).

Физические свойства электролизных порошков могут значительно варьироваться в зависимости от условий электроэкстракции и состава исходного раствора [10—21]. Для составления картины влияния физических свойств электролизных порошков на показатели осаждения золота были получены 3 образца при различных режимах электроэкстракции (табл. 1). В качестве электродов использовали магниевую (катод) и стальную (анод) пластины. Выбор материала катода обусловлен высоким перенапряжением выделения водорода и отсут-

Таблица 1

Режимы получения электролизных порошков

Электролизный порошок	Концентрация в растворе, моль/дм ³		Плотность тока, кА/м ²
	цинка	щелочи	
1	0,15	10,0	2,0
2	0,15	10,0	0,5
3	0,15	2,5	0,5

ствием компактного слоя первоначально восстанавливающегося цинка [22].

Морфология порошков определена методом сканирующей электронной микроскопии (JSM-6390LA, Jeol, Япония). Электролизные порошки имеют характерную дендритную форму (рис. 1). Гранулометрические характеристики порошков оценивали на лазерном анализаторе частиц «HELOS & RODOS» (Sympatec, Германия).

Поверхностные характеристики порошков определяли методом БЭТ на автоматическом анализаторе площади поверхности и пористости «Gemini VII 2390» (Micromeritics, США). Измерение насыпной плотности было выполнено на волюметре Скотта. Содержание металлического цинка оценивали растворением в соляной кислоте навески порошка и анализом полученного раствора. Свойства полученных порошков представлены в табл. 2.

Наиболее значимым отличительным признаком электролизных порошков является их высокая удельная площадь поверхности — в 1,3—2,6 раз больше, чем у традиционного порошка, несмотря на превосходящую среднюю крупность частиц.

Рис. 1. Микрофотоснимки цинковых порошков (увеличение 1000×)

a — традиционный порошок; *б* — электролизный ($d = 39$ мкм)

Таблица 2

Физико-химические свойства изучаемых порошков

Порошки	Насыпная плотность ρ , г/см ³	Средний размер частиц порошка d , мкм	Удельная площадь поверхности $S_{уд}$, м ² /г	Содержание металлического цинка в порошке, %
Традиционный	2,51	5	1,16	98,5
Электролизные:				
1	0,81	39	3,02	91,0
2	0,77	71	2,10	91,3
3	0,66	108	1,46	91,5

Для оценки непродуктивной активности цинковых порошков была изучена динамика растворения навески цинка (0,1 г) при температуре 25 °С и интенсивном перемешивании в модельном щелочном растворе объемом 0,1 дм³ при отсутствии кислорода (рис. 2). Кислород удаляли из раствора добавлением Na₂SO₃.

Скорость растворения электролизных порошков, превосходящая таковую традиционного порошка, в данных условиях может быть объяснена, в первую очередь, большим содержанием окисленного цинка. Повышенная концентрация окисленного цинка в дендритных порошках в рамках настоящих исследований, по-видимому, обусловлена особенностями его хранения. При изучении закономерностей получения цинковых порошков методом электроэкстракции указанному фактору следует уделить дополнительное внимание. Растворение металлического (не окисленного) цинка в данных условиях затруднительно, поскольку

окислительный потенциал системы снижен за счет удаления растворенного кислорода и отсутствия ионов цветных металлов.

Методика проведения исследований по цементации

В лабораторных исследованиях использовали модельные и реальный (производственный) растворы. Модельные растворы приготовлены растворением навески чистого золота в щелочном цианистом растворе. Реальный производственный раствор является продуктом выщелачивания золотосодержащих концентратов.

Анализ исходных и маточных растворов на содержание золота, цинка и сопутствующих цветных металлов проводили на атомно-абсорбционном спектрофотометре «novAA 300» (Analytic Jena, Германия). Значение pH контролировали прибором pH-410(Аквилон, г. Москва).

В соответствии с практикой цементации, для предотвращения повышенного расхода цинка из растворов удаляли растворенный кислород (добавлением Na₂SO₃). Изучаемые цинковые порошки освинцовывали перед загрузкой в лабораторную установку. Освинцевание проводили путем цементационного осаждения свинца на поверхности цинка. Свинец вводили в щелочной раствор виде ацетата свинца (Pb(CH₃COO)₂) при расходе 10 % от массы цинка.

К традиционному порошку на стадии освинцевания добавляли перлит, для того чтобы сравнить высоту цементирующего слоя и обеспечить проницаемость слоя для раствора. В опытах с порошками, полученными электроэкстракцией из щелочных растворов, перлит не добавляли.

Лабораторные исследования проводили на цилиндрической установке с ложным днищем, ими-

Рис. 2. Динамика растворения цинковых порошков в щелочном растворе (0,04 моль/дм³ NaCN, pH = 11)

1–3 – электролизные порошки; 4 – традиционный d , мкм: 1 – 39, 2 – 71, 3 – 108

тирующей работу технологий, основанных на перколяции раствора через слой цинка.

Раствор в лабораторную установку подавали непрерывно перистальтическим насосом, в результате чего он просачивался через слой цинка и вытекал из нижней части цементатора. Через заданные промежутки времени отбирали исходящий из установки маточный раствор и анализировали его на содержание металлов.

Результаты цементации

Обнаружено, что электролизный порошок обладает значительно меньшим гидравлическим сопротивлением.

Замеры пропускной способности порошков проводили на установке с пористостью ложного днища 16–40 мкм и диаметром 20 мм при постоянном давлении продуктивного раствора 0,01 МПа (рис. 3). Масса навески порошка составляла 1 г. Применяли раствор с высоким содержанием цветных металлов. При пропускании щелочного раствора, содержащего ионы золота, серебра, меди, состояние порошка меняется по причине протекания реакций растворения и контактного вытеснения, что увеличивает гидродинамическое сопротивление цементирующего слоя. Для сравнения с традиционным цинковым порошком использовали наиболее мелкодисперсный из име-

ющихся электролизных порошков (крупностью 39 мкм), поскольку он характеризуется наибольшей вероятностью к закириванию фильтровальной поверхности.

В условиях производства удельная производительность установок (скорость фильтрации раствора) варьируется вблизи значения $1,5 \text{ м}^3/(\text{ч}\cdot\text{м}^2)$, при этом давление раствора в системе при необходимости может нагнетаться до 1 МПа, а общее содержание ионов цветных металлов составляет 5–10 ммоль/дм³. На практике цикл эффективной работы установок Меррилл-Кроу длится до недели; в конце цикла фильтры снижают пропускную способность, производительность установок падает. Продление кампании цементаторов не является актуальной задачей, поскольку своевременное снятие товарного цементата необходимо по экономическим причинам. Однако за счет применения дендритного порошка можно добиться роста производительности агрегатов, увеличив толщину слоя порошка, без повышения нагрузки на насосное оборудование. Гидравлическая проницаемость электролизного порошка в начальной стадии превышает пропускную способность традиционного порошка с перлитом в 1,3 раза, что также дает возможность применять аппаратуру меньшей мощности (как следствие и меньшей стоимости) для создания требуемого давления в системе.

Одним из ключевых технологических параметров процесса цементации в проточном режиме является удельная скорость подачи раствора. Исследование влияния данного показателя на степень извлечения золота представлено на рис. 4. Высота слоя была зафиксирована для всех порошков (5 мм). Для определения степени извлечения золота отбирали пробу исходящего маточного раствора через 10 мин после начала эксперимента (после многократного обновления раствора в объеме установки).

Из данных, приведенных на рис. 4, следует, что все цинковые порошки при скоростях подачи раствора более чем $1,7\text{--}2,0 \text{ м}^3/(\text{ч}\cdot\text{м}^2)$ и низкой продолжительности контакта раствора с цинком начинают осаждать золото с меньшей эффективностью. Показано, что различие в остаточной концентрации золота коррелируется с удельной площадью поверхности изучаемых порошков. Наибольшее значение степени извлечения золота у электролизного порошка крупностью 39 мкм с $S_{уд} = 3,02 \text{ м}^2/\text{г}$ дало основание рассматривать дан-

Рис. 3. Пропускная способность порошков ($284,3 \text{ мкмоль/дм}^3 \text{ Au}^+$; $\Sigma C_{\text{цв.мет}} \sim 10 \text{ ммоль/дм}^3$; $0,05 \text{ моль/дм}^3 \text{ NaCN}$, $\text{pH} = 11,1$)

1 – традиционный порошок без перлита

2 – традиционный порошок с добавлением перлита

3 – электролизный порошок ($d = 39 \text{ мкм}$) без перлита

ный порошок как наиболее подходящий среди остальных электролизных порошков для цементации золота.

По мере осаждения золота и цветных металлов цинковые порошки расходуются, по этой причине равновесное извлечение золота (максимально достижимое в заданных условиях, при котором ведут цементацию на практике) со временем начинает снижаться, концентрация золота в исходящем маточном растворе увеличивается.

Рис. 4. Влияние удельной скорости подачи раствора при цементации в режиме перколяции на степень извлечения золота (50,8 мкмоль/дм³ Au⁺; 0,04 моль/дм³ NaCN, pH = 11)
1–3 – электролизные порошки, 4 – традиционный
d, мкм: 1 – 39, 2 – 71, 3 – 108

Рис. 5. Динамика цементации золота по мере расходования порошка (253,8 мкмоль/дм³ Au⁺; 0,04 моль/дм³ NaCN, pH = 11)
1 – электролизный порошок (d = 39 мкм), 2 – традиционный

Характер изменения концентрации золота в исходящем растворе при длительном цикле цементации электролизным ($d = 39$ мкм) и традиционным порошками представлен на рис. 5.

Удельную скорость подачи раствора для обоих порошков поддерживали на уровне $1 \text{ м}^3/(\text{ч} \cdot \text{м}^2)$ на протяжении всей продолжительности эксперимента. Как следует из приведенных данных, традиционный и электролизный цинковые порошки на первом этапе проявляют сопоставимые свойства: и в том и другом случаях степень осаждения золота в рабочем режиме (участки AB и AB') превышает 97 %. По мере срабатывания порошков выявляются отличия в динамике осаждения (участки BC и B'C'): при использовании традиционного порошка через 260 мин от начала эксперимента происходит резкий рост содержания золота в маточном растворе (проскок), после чего цементация прекращается, а при осаждении электролизным порошком повышение концентрации золота в растворе более плавное, однако снижение степени извлечения начинается раньше ($\tau = 200$ мин).

Резкий рост концентрации золота в маточном растворе, вероятно, связан с тем, что при использовании традиционного порошка, обладающего сферической формой и равномерным гранулометрическим составом (92 % частиц укладываются в диапазон $d = 2-10$ мкм), достигается состояние, при котором диффузия через продукты реакции полностью останавливает ход цементации практически одновременно по отношению ко всем частицам цинка. При этом остаются непрореагировавшие зерна цинка, заблокированные продуктами реакции и недоступные для реакции. В то же время дендриты электролизного порошка зарастают продуктами реакции неравномерно, как следствие, падение скорости реакции цементации происходит за более продолжительный период времени. Раннее увеличение концентрации золота в маточном растворе у электролизного порошка, по-видимому, связано с более интенсивным растворением цинка в щелочной среде и растворением оксида цинка (которого в электролизном порошке больше). После пропускания через навески порошков определенного объема раствора цементация полностью прекращается (участки CD и C'D).

Массы фактически осажденного золота и израсходованного цинка определяли растворением цементата с последующим анализом растворов.

Результаты свидетельствуют о том, что при одинаковой массе традиционного и электролиз-

Таблица 3

Результат анализа продуктов цементации

Порошок	Всего пропущено золота, мкмоль	Фактически осаждено золота за весь опыт, мкмоль	Фактический расход цинка, $\text{моль}_{\text{Zn}} / \text{моль}_{\text{Au}}$
Традиционный	2369	1364	29,5
Электролизный ($d = 39$ мкм)		1522	31,9

ного порошков, несмотря на меньшую длительность участка с максимальным извлечением золота, электролизным порошком, в общей сложности, осаждается золота больше, чем традиционным, за счет более плавного торможения цементации.

Выводы

1. Электролизные цинковые порошки обладают дендритной структурой, обеспечивающей их низкую насыпную плотность и высокую удельную поверхность.

2. Характерные для дендритных порошков физические свойства позволяют проводить цементационное осаждение золота в режиме перколяции без применения инертных пористых добавок, используемых на практике. Пропускная способность цементирующего слоя с использованием электролизного порошка в 1,3 раза больше, чем с применением традиционного порошка, смешанного с инертной добавкой.

3. Степень извлечения золота из раствора дендритным цинковым порошком на участке эффективной цементации сопоставима с показателем для традиционного порошка. При длительном цикле цементации, за счет более плавного повышения концентрации золота в маточном растворе, электролизный порошок позволяет на 5–10 % увеличить количество осажденного целевого металла.

4. Участок эффективной цементации золота с использованием электролизного порошка меньше, чем с применением традиционного порошка, однако по причине высокого гидравлического сопротивления традиционного порошка реализовать данное преимущество затруднительно.

Литература/References

- Marsden J.O., House C.I. The chemistry of gold extraction. 2-nd ed. Colorado: Society for mining, metallurgy, and exploration, 2006.
- Adams M.D. Developments in mineral processing. Vol. 15 (Advances in gold ore processing). Boston: Elsevier, 2005.
- Мамяченков С.В., Якорнов С.А., Анисимова О.С., Козлов П.А., Ивакин Д.А. Исследование влияния технологических параметров на эффективность электролиза цинка из щелочных растворов. *Известия вузов. Цветная металлургия*. 2018. No. 6. С. 12–19.
- Mamyachenkov S.V., Yakornov S.A., Anisimova O.S., Kozlov P.A., Ivakin D.A. Research of the influence of technological parameters on efficiency of zinc electrolysis from alkaline solutions. *Izvestiya Vuzov. Tsvetnaya Metallurgiya*. 2018. No. 6. P. 12–19 (In Russ.).
- Jiang J., Yang X., Zhao Y.Y. Recovery of zinc from EAF dust by alkaline extraction. *Adv. Mater. Res.* 2010. Vol. 113–116. P. 2299–2304.
- Youcai Z., Stanford R. Integrated hydrometallurgical process for production of zinc from electric arc furnace dust in alkaline medium. *J. Hazard. Mater.* 2000. Vol. 80. P. 223–240.
- Chairaksa-Fujimoto R., Maruyama K., Mikia T., Nagasaka T. The selective alkaline leaching of zinc oxide from Electric Arc Furnace dust pre-treated with calcium oxide. *Hydrometallurgy*. 2016. Vol. 159. P. 120–125.
- Dutra A.J.B., Paiva P.R.P., Tavares L.M. Alkaline leaching of zinc from electric arc furnace steel dust. *Miner. Eng.* 2006. Vol. 19. P. 478–485.
- Якорнов С.А., Наумов К.Д., Лобанов В.Г., Козлов П.А., Зелях Я.Д., Крутиков И.М., Скопин Д.Ю., Ивакин Д.А. Применение электролитических цинковых порошков для цементации золота из цианистых растворов. *Металлург*. 2018. No. 5. С. 50–55.
- Yakornov S.A., Naumov K.D., Lobanov V.G., Kozlov P.A., Zelyah Ya.D., Krutikov I.M., Skopin D.Yu., Ivakin D.A. Use of electrolytic zinc powder for cementation of gold from cyanide solutions. *Metallurgist*. 2018. Vol. 62. Iss. 5–6. P. 456–463.
- Naumov K.D., Lobanov V.G., Zelyah Y.D., Yakornov S.A., Skopin D.Y. Technogenic zinc usage possibilities investigation for gold cementation. In: *Materials science (Technogen-2017)*. Ekaterinburg: Knowledgee, 2017. P. 28–33.
- Youcai Z., Qiang L., Chenglong Z., Jiachao J. Production of ultrafine zinc powder from wastes containing zinc by

- electrowinning in alkaline solution. *Brazil. J. Chem. Eng.* 2013. Vol. 30. Iss. 4. P. 857–864.
11. Jiang J.C., Zhang C.L., Zhao Y.C. An experimental investigation of alkaline zinc electrowinning using magnesium alloy as cathode. *Adv. Mater. Res.* 2010. Vol. 113–116. P. 2208–2211.
12. Chandrasekar M.S., Srinivasan S., Pushpavanam M. Structural and textural study of electrodeposited zinc from alkaline non-cyanide electrolyte. *J. Mater. Sci.* 2009. Vol. 45. Iss. 5. P. 1160–1169.
13. Abbar A.H., Rushdi S.A., Al-Tameemi H.M. Electrochemical preparation of ultrafine zinc powder. *Int. J. Electrochem. Sci.* 2017. Vol. 12. Iss. 8. P. 7075–7088.
14. Pereira M.S., Barbosa L.L., Souza C.A.C., Moraes A.C.M., Carlos I.A. The influence of sorbitol on zinc film deposition, zinc dissolution process and morphology of deposits obtained from alkaline bath. *J. Appl. Electrochem.* 2006. Vol. 36. Iss. 6. P. 727–732.
15. Jiachao J., Jianli M., Xiaofu S., Yuan T., Pingl L., Youcai Z. Particle size refinement of Zn electrodeposits in alkaline zincate solutions with polyethylene glycol and tween 80. *Int. J. Electrochem. Sci.* 2017. Vol. 12. P. 917–927.
16. Carvalho M.F., Barbano E.P., Carlos I.A. Influence of disodium ethylenediaminetetraacetate on zinc electrodeposition process and on the morphology, chemical composition and structure of the electrodeposits. *Electrochim. Acta.* 2013. Vol. 109. Iss. 30. P. 798–808.
17. Li Q., Zhao Y., Zhang C. Influence of cetyltrimethylammonium bromide and sodium lauryl sulfate on production of zinc powders by alkaline electrowinning. *Russ. J. Non-Ferr. Met.* 2014. Vol. 55. Iss. 1. P. 65–72.
18. Ortiz-Aparicio J. L., Meas Y., Ortega G.T., Chapman T.W., Chainet E. Effects of organic additives on zinc electrodeposition from alkaline electrolytes. *J. Appl. Electrochem.* 2013. Vol. 43. Iss. 3. P. 289–300.
19. Qiang Li., Zhao Y., Jiang J., Zhang C. Optimized hydrometallurgical route to produce ultrafine zinc powder from industrial wastes in alkaline medium. *Procedia Environ. Sci.* 2012. Vol. 16. P. 674–682.
20. Gurmen S., Emre M. A laboratory-scale investigation of alkaline zinc electrowinning. *Miner. Eng.* 2003. Vol. 16. Iss. 6. P. 559–562.
21. Jiang J., Guo C., Zhao Y. Production of zinc powder by alkaline hydrometallurgy. *Appl. Mech. Mater.* 2010. Vol. 20–28. P. 1142–1146.
22. St-Pierre J., Piron D.L. Electrowinning of zinc from alkaline solutions. *J. Appl. Electrochem.* 1986. Vol. 16. P. 447–456.