

Оптимизация технологических параметров хлорирующего обжига окисленной составляющей изгари

¹**ДОСМУХАМЕДОВ Нурлан Калиевич**, к.т.н., профессор, nurdos@bk.ru,

^{1*}**ЖОЛДАСБАЙ Ержан Есенбайулы**, PhD, доцент, zhte@mail.ru,

²**КАПЛАН Аркадий Валериевич**, директор, arkadyc@gmail.com,

¹НАО «Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева», ул. Сатпаева, 22а, Алматы, Казахстан,

²ТОО «Arvak Technologies», ул. А-Нофар, 14/4, Ришон-ле-Цион, Израиль,

*автор-корреспондент.

Аннотация. На сегодняшний день в мировом производстве цинка основная доля потребления цинка, до 50%, приходится на процессы оцинкования изделий. Важным фактором, влияющим на эффективность процесса горячего оцинкования, являются потери цинка, связанные с образованием поверхностных (изгарь цинка) и донных (гартцинк) отходов. Большой интерес для переработки изгари представляет использование технологии хлорирования металлов. В работе установлены оптимальные технологические параметры процесса обжига, где была достигнута глубокая возгонка металлов-примесей с получением чистого оксида цинка, пригодного для использования в качестве минеральной добавки в корм для животных и птиц. Установлено, что использование смеси хлорирующих реагентов с расходом CaCl_2 и NH_4Cl , 3% и 7% соответственно, обеспечивает получение товарного оксида цинка высокого качества с минимальным содержанием примесей, % масс: 0,02 Pb; 0,04 Fe; 0,01 Ni; 0,01 Cu; Cd – следы. Установлены оптимальные технологические параметры и режимы процесса обжига: температура – 1000°C; продолжительность – 60 минут; хлорирующий реагент – смесь ($\text{CaCl}_2 + \text{NH}_4\text{Cl}$): расход CaCl_2 – 3% от веса исходной навески; расход NH_4Cl – 7% от веса исходной навески; расход воздуха – 0,1 л/мин. В настоящей работе полученные результаты будут использованы для проведения балансовых опытов по обжигу окисленной составляющей изгари совместно с хлорирующими реагентами.

Ключевые слова: изгарь, цинк, оксид цинка, хлорид кальция, хлорид аммония, обжиг, расход реагентов, примеси.

Введение

В мировом производстве цинка, составляющем ~14 млн тонн в год [1, 2], основная доля потребления цинка, до 50%, приходится на процессы оцинкования изделий [3]. Значимым условием, оказывающим большое влияние на результативность процесса горячего оцинкования, считаются потери цинка, взаимосвязанные с формированием поверхностных (изгарь цинка) и донных (гартцинк) отходов. При классической общепринятой организации процесса горячего оцинкования до 15% цинка необратимо пропадает в виде отходов [4]. Установление задач обеспечения качества напылений и оптимального применения цинка считается значимой текущей проблемой, взаимосвязанной с повышением производительности

работы предприятий, осуществляющих горячее оцинкование деталей.

Проведенный нами SWOT-анализ известных работ [5] по переработке изгари показал, что они обладают рядом недостатков и требуют изыскания новых высокоэффективных технологий переработки изгари.

Огромное внимание с целью обработки изгари представляет применение технологических процессов хлорирования металлов, которое основано на невысокой температуре плавления, значительно высокой летучести и растворимости хлоридов в воде, что дает возможность получить ценные металлы из разных отходов в виде их хлоридов [6, 7, 8].

В работе [9] на основании термодинамического анализа поведения металлов-примесей в условиях обжига изгари совместно

с хлорирующими реагентами (CaCl_2 , NH_4Cl) установлена высокая вероятность протекания реакций взаимодействия Pb, Fe, Cu, Ni, Cd с CaCl_2 и NH_4Cl , и их возгонки в виде хлоридов. Показана принципиальная возможность получения оксида цинка высокого качества.

Предварительные лабораторные исследования по обжигу окисленным элементом изгари вместе с CaCl_2 и NH_4Cl [10] дали возможность выявить чистый оксид цинка, подходящий для применения его в качестве минеральной присадки в корм животных и птиц. Настоящая работа является продолжением работ и направлена на получение новых данных по установлению оптимальных параметров разрабатываемой технологии переработки изгари в условиях ее масштабирования и использования различных вариантов (комбинаций) хлорсодержащих реагентов.

Цель работы – изучение влияния температуры на распределение металлов между продуктами обжига окисленной составляющей изгари совместно со смесью CaCl_2 и NH_4Cl , и установление оптимальных технологических параметров процесса.

Материалы и методы исследования

Приготовление проб к химическому анализу осуществлялось следующим образом: 10 мг материала разводили в 65% (об.) азотной кислоте, уже после этого выполняли анализ. Структуру материала определяли при помощи атомно-абсорбционного спектрофотометра с графитовой камерой сгорания (PerkinElmer 5100).

Порошковая дифракция рентгеновских лучей (XRD) осуществлялась на дифрактометре Ultima III (Rigaku Corporation, Япония) с количественным фазовым анализом с применением программного обеспечения Jade_10 (MDI, Cal.) и базы данных ICSD. Энергодисперсионная рентгеновская флуоресцентная спектроскопия велась с применением сканирующего электронного микроскопа (SEM) LEO Supra.

Каждый отдельно взятый после экспериментов образец два раза подвергался элементной структуре на содержание металлов-примесей в нем. Окончательную элементную структуру устанавливали, отталкиваясь от среднего значения, полученного согласно итогам двух самостоятельных замеров путем химического анализа.

В проведенных опытах использована окисленная составляющая изгари, полученная предварительным выделением из изгари, путем ситового анализа. Дисперсность исходного материала – 35 меш. В результате комплексных исследований установлено, что исходный материал содержит, % масс:

0,34 Pb; 0,54 Fe; 0,3 Ni; 0,06 Cu; 0,002 Cd.

Результаты и их обсуждение

Результатами лабораторных опытов определено, что применение 6% расхода от веса окисленного компонента CaCl_2 , дает возможность основательно очистить исходный материал от Pb, Cu, Ni, Cd. При этом достигнуть максимального уменьшения содержания железа не представляется возможным. Содержание металлов-примесей в огарке, полученном при температуре обжига 1000°C , составило, масс: 0,03 Pb, 0,37 Fe, 0,01 Cu, 0,1 Ni, Cd-сл [10].

На наш взгляд, использование CaCl_2 при обжиге и чрезмерный его расход отрицательно влияют на общий выход оксида цинка. Повышенного выхода оксида цинка следует ожидать в случае минимизации возгонки цинка вместе с пылью. В окисленной составляющей изгари наряду с оксидом цинка присутствует незначительное количество металлического цинка.

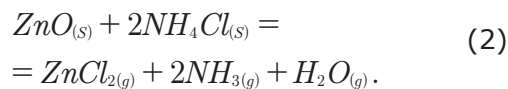
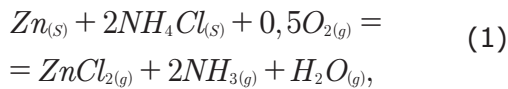
В условиях окислительной атмосферы обжига следует ожидать активного хлорирования металлического цинка хлоридом кальция с формированием хлорида цинка [9]. Большие отрицательные величины свободной энергии Гиббса, составляющие при температуре 973 и 1373 K, $\Delta G_{973\text{K}} = -165,07$ кДж/моль и $\Delta G_{1373\text{K}} = -123,79$ кДж/моль, указывают на возможность образования газообразного хлористого цинка и твердого оксида кальция в огарке. При этом увеличивается возгонка хлористого цинка вместе с пылью, что приведет к потерям цинка при обжиге и снижению его выхода в товарный продукт (ZnO). С другой стороны, полученный товарный оксид цинка будет загрязняться дополнительным количеством оксида кальция.

Результаты лабораторных опытов по обжигу окисленной составляющей совместно с хлоридом кальция показали, что при незначительном добавлении CaCl_2 в состав шихты, до 5% от веса исходной навески, обеспечивается значительное удаление всех примесей, кроме железа [10]. Исходя из полученных данных и с учетом минимизации возгонки цинка с пылью, а также снижения содержания оксида кальция в огарке, по-видимому, можно принять и меньший расход CaCl_2 .

Результаты лабораторных опытов для случая обжига окисленной составляющей с применением NH_4Cl с расходом 15% от веса исходной навески, также установили полное удаление металлов-примесей из исходного материала. Определено, что при температуре обжига 1000°C обеспечивается полная сублимация примесей, обеспечивающая получение чистого оксида цинка, подходя-

щего для применения в качестве минеральной присадки в корм для животных и птиц. Состав металлов-примесей в полученном оксиде цинка следующий, % масс: 0,02Pb; 0,05Fe; 0,02Ni; 0,01Cu; Cd – следы. Несмотря на полученные положительные результаты, в процессе обжига наблюдался рост потерь цинка с пылью.

Механизм взаимодействия цинка и его оксида с NH_4Cl можно представить протеканием реакций:



В результате термодинамических расчетов установлено, что расчетные значения свободной энергии Гиббса и констант скорости реакций (1), (2) почти в пять раз больше значения реакции взаимодействия металлического цинка с CaCl_2 . При температуре обжига равной 1000°C значения свободной энергии Гиббса реакций (1), (2), составляют: $\Delta G_{1273\text{K}} = -630,2$ кДж/моль и $\Delta G_{1273\text{K}} = -402,7$ кДж/моль, соответственно [9].

Полученные результаты свидетельствуют о том, что в случае обжига окисленной составляющей совместно с NH_4Cl вероятность возгонки цинка с пылью увеличивается. Общий выход цинка с пылью формируется не только за счет хлорида цинка, получаемого в результате протекания реакции (1), как в случае обжига с CaCl_2 , но и за счет образования дополнительного количества хлорида цинка, получаемого в результате протекания реакции (2). Следовательно, рост общего количества хлорида цинка и его возгонка с пылью приведет к снижению выхода товарного продукта (ZnO).

Наряду с этим следует обратить внимание на то, что результаты лабораторных опытов показывают глубокое удаление примесей, включая свинец и железо, при расходе NH_4Cl , равном 5% от веса исходной навески [10]. При этом наблюдается резкое снижение свинца с 0,38 до 0,04%, и железа – с 0,57 до 0,11%. Дальнейшее увеличение расхода NH_4Cl на возгонку примесей оказывает лишь незначительное влияние. Это свидетельствует о том, что чрезмерное повышение расхода NH_4Cl не представляется эффективным.

В целях оптимизации технологии предлагается использовать при хлорирующем обжиге окисленной составляющей изгари смесь CaCl_2 и NH_4Cl , что, на наш взгляд, даст синергетический эффект и достижение по-

ставленной цели. Для проверки выдвинутого предположения нами проведены лабораторные опыты с использованием хлорсодержащих реагентов с расходом: CaCl_2 – 3%; NH_4Cl – 7% от веса исходной навески.

Выбор указанных расходов хлорсодержащих реагентов обусловлен тем, чтобы максимально использовать действие каждого из них на удаление металлов-примесей с обеспечением минимального выноса цинка.

Расход CaCl_2 выбран из соображения, в 1,2 раза превышающий его расход, необходимый для возгонки свинца по стехиометрии реакции взаимодействия свинца с CaCl_2 . Выбор расхода NH_4Cl , равный 7% от веса исходной навески, обоснован исходя из его количества, превышающего его расход в 1,3 раза от стехиометрически необходимого количества, требуемого на хлорирование железа и его оксида (III), а также оставшихся примесей и их оксидов по стехиометрии реакций взаимодействия с NH_4Cl .

Опыты проведены с использованием лабораторной установки, подробно описанной в работе [10]. В опытах использовали предварительно выделенную из изгари оксидную фракцию, которая была использована при проведении экспериментов по обжигу с использованием CaCl_2 с расходом 6% и расходом NH_4Cl – 15%, следующего состава: Pb – 0,38%; Fe – 0,57%; Ni – 0,33%; Cu – 0,08%; Cd – 0,004%.

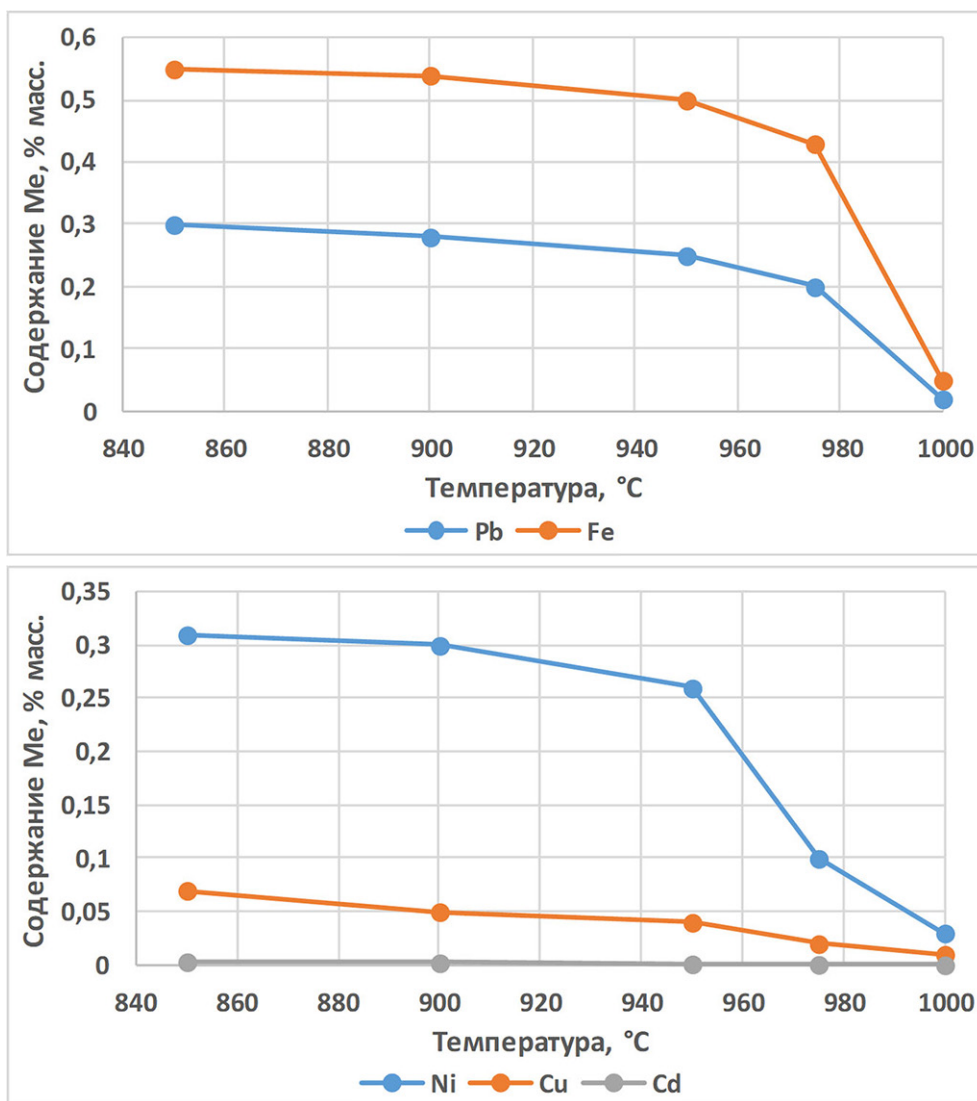
В проведенных опытах оценивалось влияние температуры обжига на возгонку металлов-примесей при следующих режимах и параметрах процесса: продолжительность – 60 мин, расход воздуха – 0,1 л/мин, расход CaCl_2 – 3%; расход NH_4Cl – 15% от веса окисленной составляющей. Количество исходной навески во всех опытах было постоянным и составляло 50 г.

Результаты опытов по изучению влияния температуры обжига на содержание металлов-примесей в огарке, полученного после обжига окисленной составляющей в смеси с 3% CaCl_2 и 7% NH_4Cl , показаны на рисунке.

На рисунке видно, что рост температуры с 850°C до 950°C существенного влияния на снижение содержания металлов-примесей не оказывает. При повышении температуры с 950°C до 1000°C наблюдается резкое снижение железа с 0,27 до 0,03%.

Содержание меди, никеля и кадмия в интервале температур с 850°C до 950°C показывает монотонное снижение в огарке.

Содержание свинца в огарке с ростом температуры с 950°C до 1000°C также показывает резкий спад – с 0,55 до 0,015%. При этом наблюдается резкое снижение содержания никеля с 0,26 до 0,01%. Содержание меди показывает монотонное снижение с



Влияние температуры обжига на содержание металлов-примесей в огарке

0,02 до 0,01%. Кадмий в интервале указанных температур обжига практически полностью возгоняется.

Сравнительный анализ результатов опытов по содержанию металлов-примесей, полученных в условиях обжига окисленной составляющей с различными хлорсодержащими реагентами при $T = 1000^{\circ}\text{C}$ и продолжительности, $t = 60$ мин, показан в таблице.

Как видно из результатов сравнительного анализа, приведенных в таблице, наилучшие показатели по удалению металлов-примесей из оксида цинка достигнуты в условиях обжига окисленной составляющей с использованием смеси хлорирующих реагентов. Это свидетельствует о том, что установленная комбинация количественных соотношений CaCl_2 и NH_4Cl с их расходами 3% и 7%, соответственно, от веса исходной навески, полностью подтверждают выдвинутые нами ранее предположения о высокой

эффективности использования смеси CaCl_2 и NH_4Cl для глубокой возгонки металлов-примесей из окисленной составляющей изгари.

Сокращение расхода CaCl_2 и NH_4Cl существенно снижает их расход, что благоприятно скажется на снижении материальных затрат на технологию в целом.

На основании проведенных опытов и полученных положительных результатов, а также учитывая, что максимальные содержания основных примесей – свинца и железа, в изгари, получаемой на производстве, не превышают 0,4 и 0,6%, соответственно, для процесса хлорирующего обжига окисленной составляющей изгари рекомендуются следующие оптимальные технологические параметры и режимы процесса:

- температура обжига – 1000°C ;
- продолжительность – 60 минут;
- хлорирующий реагент – смесь ($\text{CaCl}_2 + \text{NH}_4\text{Cl}$);

Сравнительный анализ результатов опытов по содержанию металлов-примесей, полученных в условиях обжига окисленной составляющей с различными хлорсодержащими реагентами

Условия опыта	Содержание металлов, %				
	Pb	Fe	Ni	Cu	Cd
Исходная навеска	0,38	0,57	0,33	0,08	0,004
Расход CaCl ₂ , 6% от веса навески*	0,03	0,37	0,1	0,01	Сл.
Расход NH ₄ Cl, 15% от веса навески*	0,02	0,05	0,02	0,01	Сл.
Расход CaCl ₂ , 3% от веса навески; Расход NH ₄ Cl, 7% от веса навески	0,015	0,03	0,01	0,01	Сл.

*по данным работы [12].

- расход CaCl₂ – 3% от веса исходной навески;
- расход NH₄Cl – 7% от веса исходной навески;
- расход воздуха – 0,1 л/мин.

Выводы:

1. В результате оптимизации технологических параметров процесса достигнута глубокая возгонка металлов-примесей с получением чистого оксида цинка, пригодного для использования в качестве минеральной добавки в корм для животных и птиц.

2. Установлено, что использование смеси хлорирующих реагентов с расходом CaCl₂ и NH₄Cl 3% и 7%, соответственно, обеспечивает получение товарного оксида цинка высокого качества с минимальным содержанием примесей, % масс: 0,02 Pb; 0,04Fe; 0,01Ni; 0,01 Cu; Cd – следы.

3. Установлены оптимальные технологические параметры и режимы процесса обжига: температура – 1000°C; продолжительность – 60 минут; хлорирующий реагент – смесь (CaCl₂ + NH₄Cl): расход CaCl₂ – 3% от веса исходной навески; расход NH₄Cl –

7% от веса исходной навески; расход воздуха – 0,1 л/мин.

4. Полученные результаты будут использованы для проведения балансовых опытов по обжигу окисленной составляющей изгари совместно с хлорирующими реагентами. По результатам проведенных испытаний будут определены окончательные технологические параметры и режимы технологии, и выданы рекомендации по выбору основного оборудования, необходимого для успешного внедрения технологии.

Исследования проводились в рамках грантового финансирования Комитета науки Министерства образования и науки Республики Казахстан на 2021-2023 годы по приоритетному направлению «Геология, добыча и переработка минерального и углеводородного сырья, новые материалы, технологии, безопасные изделия и конструкции» проекта № AP09058297 «Разработка новой безотходной технологии утилизации отходов горячего оцинкования с комплексным извлечением ценных компонентов».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Saramak D., Krawczykowski D., and Gawenda T. Investigations of zinc recovery from metallurgical waste. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018. 427 (1).
2. Trpcevska J., et al., Leaching of Zinc Ash with Hydrochloric Acid Solutions. Polish Journal of Environmental Studies, 2018. 27 (4). Pp. 1785-1771.
3. Stubbe G., Hillmann C., and Wolf C. Zinc and Iron Recovery from Filter Dust by Melt Bath Injection into an Induction Furnace. Erzmetall, 2016. 69 (3). Pp. 5-12.
4. Takáčová Z., Hluchánová B., and Trpcevska J. Leaching of zinc from zinc ash originating from hot-dip galvanizing. Metall, 2010. 64 (12). Pp. 517-519.
5. Койшина Г.М., Жолдасбай Е.Е., Курмансеитов М.Б., Тажиев Е.Б. Выбор и обоснование технологии

- комплексной переработки изгари с получением товарных продуктов // Труды университета. – Караганда: Изд-во КарТУ, 2021. № 3 (84). С. 87-93.
6. Wang H., Feng Y., Li H., and Kang J. Simultaneous extraction of gold and zinc from refractory carbonaceous gold ore by chlorination roasting process. *Trans. Nonferrous Met. Soc. China* 2020, 30 (4), P. 1111.
 7. Guo X., Zhang B., Wang Q., Li Z., Tian Q. Recovery of Zinc and Lead from Copper Smelting Slags by Chlorination Roasting. *JOM* 2021, 73, Pp. 1861-1870.
 8. Bai S., Bi Y., Ding Z., Li C., and Wen S. Innovative methodology for the utilization of low-grade pyrite cinder containing heavy metals via hydrothermal alkali melting followed by chlorination roasting, *J. Alloys Compd.* 2020, 840, P. 155722.
 9. Koishina G.M., Zholdasbay E.E., Kurmanseitov M.B., Tazhiev E.B., Argyn A.A. Study on the behavior of zinc and associated metal-impurities in the process of chlorinating roasting of dross. *Complex Use of Mineral Resources.* 2021. Volume 3, Issue 318. Pp. 71-80.
 10. Досмухамедов Н.К., Жолдасбай Е.Е., Койшина Г.М., Каплан А.В., Курмансеитов М.Б., Тажиев Е.Б. Хлорирующий обжиг окисленной составляющей, полученной из изгари, при $T=1000^{\circ}\text{C}$. – Москва: Изд-во Металлург, 2022. № 3. С. 85-91.

Күйіндінің тотыққан бөлігін хлорлап күйдірудің технологиялық параметрлерін оңтайландыру

¹**ДОСМУХАМЕДОВ Нурлан Калиевич**, т.ф.к., профессор, nurdos@bk.ru,

^{1*}**ЖОЛДАСБАЙ Ержан Есенбайұлы**, PhD, доцент, zhte@mail.ru,

²**КАПЛАН Аркадий Валериевич**, директор, arkadyc@gmail.com,

¹«Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті» КеАҚ, Сәтбаев көшесі, 22а, Алматы, Қазақстан,

²«Arvak Technologies» ЖШС, А-Нофар көшесі, 14/4, Ришон-ле-Цион, Израиль,

*автор-корреспондент.

Аңдатпа. Бүгінгі таңда мырыштың әлемдік өндірісінде мырышты тұтынудың негізгі үлесі 50%-ға дейін бұйымдарды мырыштау процестеріне тиесілі. Ыстықтай мырыштау процесінің тиімділігіне әсер ететін маңызды фактор – мырыштың беткі (мырыш) және төменгі (гартцинк) қалдықтардың пайда болуымен байланысты жоғалуы. Металды хлорлау технологиясын қолдану күйіндіні өңдеуге үлкен қызығушылық тудырады. Жұмыста күйдіру процесінің оңтайлы технологиялық параметрлері белгіленді, жануарлар мен құстардың жеміне минералды қоспа ретінде пайдалануға жарамды таза мырыш оксидін алатын қоспа металдардан терең тазалауға қол жеткізілді. CaCl_2 және NH_4Cl шығыны 3% және 7% тиісінше, хлорлаушы реагенттер қоспасын пайдалану, қоспалардың ең аз мөлшері бар жоғары сапалы мырыш оксидін алуды қамтамасыз етеді, % масса: 0,02 Pb; 0,04 Fe; 0,01 Ni; 0,01 Cu; Cd – іздері. Күйдіру процесінің оңтайлы технологиялық параметрлері мен режимдері белгіленді: температура – 1000°C ; ұзақтығы – 60 минут; хлорлаушы реагент – қоспа ($\text{CaCl}_2 + \text{NH}_4\text{Cl}$): CaCl_2 шығыны – бастапқы өлшенді салмағынан 3%; NH_4Cl шығыны – бастапқы өлшенді салмағынан 7%; ауа шығыны – 0,1 л/мин. Осы жұмыста алынған нәтижелер хлорлаушы реагенттермен бірге күйіндінің тотыққан бөлігін күйдіру бойынша теңгерімдік тәжірибелер жүргізу үшін пайдаланылатын болады.

Кілт сөздер: күйінді, мырыш, мырыш оксиді, кальций хлориді, аммоний хлориді, күйдіру, реагенттер шығыны, қоспалар.

Optimization of Technological Parameters of Chlorinating Roasting of the Oxidized Component of Dross

¹**DOSMUKHAMEDOV Nurlan**, Cand. of Tech. Sci., Professor, nurdos@bk.ru,

^{1*}**ZHOLDASBAY Erzhan**, PhD, Associate Professor, zhte@mail.ru,

²**KAPLAN Arkady**, Director, arkadyc@gmail.com,

¹NCJSC «Kazakh National Research Technical University named after K.I. Satpayev»,
Satpayev Street, 22a, Almaty, Kazakhstan,

²Arvak Technologies LLC, Ha-Nofar Street, 14/4, Rishon LeZion, Israel,

*corresponding author.

Abstract. To date, in the world zinc production, the main share of zinc consumption up to 50% is accounted for by the processes of galvanizing products. An important factor affecting the efficiency of the hot-dip galvanizing process is the loss of zinc associated with the formation of surface (zinc burn) and bottom (gartzink) waste. Of great interest for the processing of dross is the use of metal chlorination technology. The optimal technological parameters of the firing process were established in the work, where deep sublimation of impurity metals was achieved to obtain pure zinc oxide, suitable for use as a mineral additive in animal and bird feed. It was found that the use of a mixture of chlorinating reagents with a consumption of CaCl_2 and NH_4Cl of 3% and 7%, respectively, provides high-quality commercial zinc oxide with a minimum content of impurities, % wt: 0.02 Pb; 0.04 Fe; 0.01 Ni; 0.01 Cu; Cd traces. Optimal technological parameters and firing process modes were established: temperature – 1000°C; duration – 60 minutes; chlorinating reagent – mixture ($\text{CaCl}_2 + \text{NH}_4\text{Cl}$): CaCl_2 consumption – 3% of the weight of the initial sample; NH_4Cl consumption – 7% of the weight of the initial sample; air consumption – 0.1 l/min. In this paper, the results obtained will be used to conduct balance experiments on firing the oxidized component of the dross together with chlorinating reagents.

Keywords: dross, zinc, zinc oxide, calcium chloride, ammonium chloride, roasting, reagent consumption, impurities.

REFERENCES

1. Saramak D., Krawczykowski D., and Gawenda T. Investigations of zinc recovery from metallurgical waste. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018. 427 (1).
2. Trpcevska J., et al., Leaching of Zinc Ash with Hydrochloric Acid Solutions. Polish Journal of Environmental Studies, 2018. 27 (4). Pp. 1785-1771.
3. Stubbe G., Hillmann C., and Wolf C. Zinc and Iron Recovery from Filter Dust by Melt Bath Injection into an Induction Furnace. Erzmetall, 2016. 69 (3). Pp. 5-12.
4. Takáčová Z., Hluchánová B., and Trpcevská J. Leaching of zinc from zinc ash originating from hot-dip galvanizing. Metall, 2010. 64 (12). Pp. 517-519.
5. Koishina G.M., Zholdasbay E.E., Kurmanseitov M.B., Tazhiev E.B. Vybor i obosnovanie tehnologii kompleksnoi pererabotki izgari s polucheniem tovarnykh produktov // Trudy universiteta. – Karaganda: Publ. KarTU, 2021. No. 3 (84). Pp. 87-93.
6. Wang H., Feng Y., Li H., and Kang J. Simultaneous extraction of gold and zinc from refractory carbonaceous gold ore by chlorination roasting process. Trans. Nonferrous Met. Soc. China 2020, 30 (4), P. 1111.
7. Guo X., Zhang B., Wang Q., Li Z., Tian Q. Recovery of Zinc and Lead from Copper Smelting Slags by Chlorination Roasting. JOM 2021, 73, pp. 1861-1870.
8. Bai S., Bi Y., Ding Z., Li C., and Wen S. Innovative methodology for the utilization of low-grade pyrite cinder containing heavy metals via hydrothermal alkali melting followed by chlorination roasting, J. Alloys Compd. 2020, 840, P. 155722.
9. Koishina G.M., Zholdasbay E.E., Kurmanseitov M.B., Tazhiev E.B., Argyn A.A. Study on the behavior of zinc and associated metal-impurities in the process of chlorinating roasting of dross. Complex Use of Mineral Resources. 2021. Volume 3, Issue 318. Pp. 71-80.
10. Dosmukhamedov N.K., Zholdasbay E.E., Koishina G.M., Kaplan A.V., Kurmanseitov M.B., Tazhiev E.B. Hloriruiushhii obzhig okislennoi sostavlyaiushei, poluchennoi iz izgari, pri T=1000°C. – Moscow: Publ. Metallurg, 2022. No. 3. Pp. 85-91.