2. *Мастюгин С. А., Жуков В. П., Волкова Н. А.* Электролитическое рафинирование и переработка промпродуктов. — Верхняя Пышма ; Екатеринбург : АМБ, 2018. — 303 с.

УДК 622.765

Выбор выщелачивающей системы для извлечения золота из клинкера

Р. Э. Хабибулина, В. Г. Лобанов, О. Б. Колмачихина, С. М. Савельев, О. В. Нечвоглод

Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия

Аннотация. Работа посвящена проблеме извлечения золота из техногенного материала (клинкера) методами, альтернативными традиционному цианированию. В работе показана возможность использования хлоридных растворов для извлечения золота из отходов цинкового производства, а также рассмотрение проблемы низкого извлечения золота традиционными методами. Данный метод показал высокое извлечение золота в раствор, по сравнению с уже известными методами. Особенностью рассмотренного способа является применение экологичного реагента, с помощью которого возможно извлекать не только золото, но и металлы платиновой группы.

Ключевые слова: золото, серебро, выщелачивание, кокс, клинкер.

Введение

При производстве металлов из минерального сырья за многолетнюю историю, накопились миллионы тонн отходов, содержащих ценные компоненты. Такие отходы принято называть техногенным сырьем. При переработке техногенного сырья появляется возможность решать экологические проблемы с получением дополнительной товарной продукции. Важнейшей задачей, стоящей перед исследователями, является выбор рациональной технологии, обеспечивающей достижение указанных целей.

Выщелачивание золота из отходов цинкового производства

В металлургии цинка наиболее проблемным техногенным сырьем является клинкер. Он образуется при вельцевании цинковых кеков — остатка после выщелачивания огарков — с добавлением коксика. Клинкер содержит 1–3 % меди, до 5 % цинка, 1–5 г/т золота и до 200 г/т серебра [1]. Такой ма-

© Хабибулина Р. Э., Лобанов В. Г., Колмачихина О. Б., Савельев С. М., Нечвоглод О. В., 2023

териал расценивается как весьма богатый и перспективный для извлечения указанных металлов. Единственным вариантом практической переработки клинкера в современных условиях является плавка совместно с медными концентратами. Из-за существенных недостатков такого подхода весьма актуален поиск гидрометаллургических способов.

При извлечении золота из минерального и техногенного сырья в мировой и отечественной практике безальтернативным является процесс цианирования [2, 3]. Технологии, основанные на использовании данного процесса, эффективны в экономическом плане, но характеризуются серьезными экологическими проблемами. Поиск альтернативных, экологически чистых реагентов для выщелачивания золота имеет большую практическую значимость.

С целью замены цианированию на кафедре МЦМ УрФУ в течение нескольких лет изучается процесс выщелачивания золота, основанный на использовании органических соединений, содержащих активный хлор. В качестве выщелачивающего реагента предлагается использование хлорсодержащих производных циануровой кислоты ($C_3H_3N_3O_3$). Они относятся к разряду органических кислот [4–7]. Важнейшей особенностью хлоризоциануратов является их экологическая безопасность, реагенты подобного типа относятся к III классу опасности химических веществ, что является показателем предельно низкой токсикологической опасности реагента. При растворении хлоризоциануратов в воде выделяется активный хлор, который и обеспечивает окислительную функцию реагента.

В данной работе метод хлоридного выщелачивания был опробован при извлечении золота из клинкера. Основной проблемой в решении этой задачи является повышенное содержание в клинкере кокса, добавляемого к цинковому кеку при вельцевании. По технологическим причинам кокс вводится в избытке, значительная его часть не сгорает и остается в клинкере. Содержание органического углерода в свежеобразованном клинкере может составлять от 5 до 30 %. В процессе складирования и длительного хранения клинкера углистая часть под действием природных факторов проявляет склонность к медленному окислению, протекающему в режиме «тления». Содержание углерода в результате снижается.

В опытах использовали частную пробу из отвала клинкера длительного складирования АО «Электроцинк» г. Владикавказ. Химический состав клинкера представлен в табл. 1.

Наличие большой доли углерода в клинкере негативно влияет на извлечение золота, что проявляется в эффекте «прег-роббинг». Данный эффект заключается в сорбции переходящего в раствор золота и, как следствие, резком снижении извлечения. В опытах стояла задача оценить последствия наличия углерода и цветных металлов. С этой целью параллельно с выщела-

чиванием золота из исходного клинкера проводили выщелачивание клинкера, из которого углистую часть из пробы удаляли. Наиболее очевидный метод обезуглероживания — флотация — положительного результата не дал. Содержание углерода в флотоконцентрате и в хвостах флотации при использовании типовых режимов отличалось незначительно. Кроме того, золото также практически равномерно распределялось по продуктам флотации.

Таблица 1

Химический состав клинкера

Компонент	Fe	Zn	Pb	Cu	C	SiO_2	CaO
Содержание, %	22,1	4,9	1,1	0,7	10,0	23,5	1,5
Компонент	Al_2O_3	Ba	Mg	Mn	Ti	Au	Ag
Содержание, %	6,5	1,4	0,3	1,8	0,3	2,7 г/т	195 г/т

Для сравнения показателей выщелачивания хлорорганическим соединением были проведены опыты с использованием нескольких альтернативных выщелачивающих систем. Конкретной целью проведенных исследований являлось сравнение извлечения золота из клинкера.

Проба клинкера была измельчена до крупности минус 0,1 мм.

В первой серии опытов проводили выщелачивание золота из исходного клинкера. Во второй серии перед выщелачиванием золота клинкер обрабатывали раствором серной кислоты с целью извлечения меди и цинка. В третьей серии опытов после обезмеживания из клинкера удаляли углистую часть длительным прокаливанием в муфеле при температуре 700 °С.

Для опыта навески обожженного клинкера массой по 20 г подвергали выщелачиванию при одинаковых условиях Ж : Т = 3 : 1, при температуре 25 °С в герметичном бутылочном агитаторе:

— цианидное выщелачивание проводили при концентрации реагента 5 г/дм^3,

— заменитель цианида «Цикада» (производство КНР) — 5 г/дм^3,

— тиомочевинное выщелачивание с окислителем Fe (III) — 20 г/дм^3, серная кислота, 10 г/дм^3 тиомочевины и 5 г/дм^3 железа (III),

— хлоридный процесс проводили при добавлении соляной кислоты 15 г/дм^3 с добавлением хлорсоединения 5 г/дм^3. Процесс протекал двое суток. Полученные растворы анализировали методом атомной абсорбции. На основании полученных результатов рассчитывали извлечение золота в раствор. Результаты опытов приведены в табл. 2.

Заключение

1. Наличие углерода в клинкере крайне негативно влияет на извлечение золота при использовании различных выщелачивающих систем.

Таблица 2

Результаты выщелачивания золота

Выщелачивающая система	Извлечение золота в раствор, %		
	Исходный клинкер	Обезмеженный клинкер	Клинкер после обезмеживания и обжига
NaCN	23,5	37,2	58,2
«Цикада»	26,2	35,9	56,4
CH_4N_2S	42,4	58,6	68,1
Хлорирование	35,7	49,8	75,3

2. Характер выщелачивающего раствора существенно влияет на извлечение золота. Наиболее низкое извлечение, которое может быть следствием сорбционной активности кокса в отношении золота, наблюдается в цианистых растворах. При использовании кислых тиомочевинных растворов, а также при хлорировании, предполагаемый эффект «прег-роббинг» заметно меньше, чем в цианистых растворах.

3. Предварительное удаление меди и цинка из клинкера обработкой сернокислым раствором позволяет при последующем выщелачивании золота повысить извлечение в 1,3–1,5 раз. Причины данного факта требуют дополнительного исследования.

4. Предварительный обжиг клинкера положительно влияет на переход в раствор золота при выщелачивании всеми выбранными растворителями. Максимальное извлечение золота достигнуто при использовании раствора, содержащего изоциануровую кислоту.

Библиографический список

1. Изучение влияния углерода в составе клинкера на показатели гидрометаллургической переработки / В. Г. Лобанов, О. Б. Колмачихина и др. // Вестн. Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г. И. Носова. — 2023. — Т. 21, № 2. — С. 5–12. — DOI: https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-2-5-12.

2. *Стрижко Л. С.* Металлургия золота и серебра : учеб. пособие. — М. : МИСИС, 2001. — 332 с.

3. *Минеев Г. Г., Панченко А. Ф.* Растворители золота и серебра в гидрометаллургии : учеб. пособие. — М. : Металлургия, 1994. — 241 с.

4. Использование производных изоциануровой кислоты для выщелачивания золота из техногенного сырья / Р. Э. Хабибулина, В. Г. Лобанов, О. Б. Колмачихина и др. // Фундаментальные исследования и прикладные разработки процессов переработки и утилизации техногенных образований. — Екатеринбург : Альфа Принт, 2021. — С. 120–122. — DOI: 10.34923/technogen-ural.2021.49.25.033.

5. *Хабибулина Р. Э., Лобанов В. Г.* Экологически чистая технология выщелачивания золота из техногенного сырья // Актуальные проблемы развития технических наук : сб. ст. участников XXIV Област. конкурса науч.-исслед. работ «Научный Олимп» по направлению «Технические науки». — Екатеринбург : УрФУ, 2021. — С. 31–35.

6. Извлечение золота из концентратов экологически чистым способом / Р. Э. Хабибулина, В. Г. Лобанов, О. Б. Колмачихина и др. // Современные технологии производства цветных металлов : материалы Международ. науч. конф., посвящ. 80-летию С. С. Набойченко, Екатеринбург, 24 марта 2022 года. — Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2022. — С. 192–196.

7. Патент № 2758915 C2 Российская Федерация, МПК C22B 11/00, C22B 3/04, C22B 3/16. Способ извлечения золота из золотосодержащего сырья : № 2020109339 : заявл. 03.03.2020 : опубл. 03.11.2021 / В. Г. Лобанов, К. Д. Наумов, О. Б. Колмачихина и др. ; заявитель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина».