



Санъат ШАРИПОВ,

заведующий кафедрой, PhD., доцент Навоийский государственный горно-технологический университет

E-mail:element_2993@mail.ru

Кувандик САНАКУЛОВ,

д.т.н., профессор АО Навоийский горно-металлургический комбинат

Баходир МУХИДДИНОВ,

д.х.н., профессор Навоийский государственный горно-технологический университет

THE IMPORTANCE OF OXIDATIVE ROASTING FOR THE OXIDATION OF RESISTANT CARBON-CONTAINING SULFIDE ORES

Annotation

The article discusses the application of oxidative roasting for processing refractory carbonaceous sulfide ores. The impact of carbon on metal recovery reduction and its oxidation mechanisms are analyzed. The key technological parameters of the process, its effect on the efficiency of subsequent hydrometallurgical metal extraction, and measures to minimize environmental impact are presented.

Key words: oxidative roasting, refractory ores, carbonaceous trap, sulfide ores, gold-bearing ores, hydrometallurgy.

ВАЖНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ОКИСЛИТЕЛЬНОГО ОБЖИГА ДЛЯ ОКИСЛЕНИЯ УПОРНЫХ УГЛЕРОДСОДЕРЖАЩИХ СУЛЬФИДНЫХ РУД

Аннотация

В статье рассматривается применение окислительного обжига для переработки упорных углеродсодержащих сульфидных руд. Обсуждены влияние углерода на снижение извлекаемости металлов, а также механизмы его окисления. Приведены основные технологические параметры процесса, его влияние на эффективность последующего гидрометаллургического извлечения металлов и меры по снижению негативного воздействия на окружающую среду.

Ключевые слова: окислительный обжиг, упорные руды, углеродная ловушка, сульфидные руды, золотоносные руды, гидрометаллургия.

UGLEROD SAQLOVCHI MURAKKAB TARKIBLI SULFIDLARI MA'DANLARNI OKSIDLASHDA OKSIDLAB KUYDIRISHNI QO'LLASHNING AHAMIYATI

Annotation

Maqolada qiyin qayta ishlanadigan uglerod saqlovchi sulfidli ma'danlarni qayta ishlash uchun oksidlab kuydirish usuli ko'rib chiqilgan. Uglerodning metall ajratish samaradorligini pasaytirishga ta'siri va uning oksidlanish mexanizmlari tahlil qilingan. Jarayonning asosiy texnologik parametrлari, ularning keyingi gidrometallurgik metall ajratish samaradorligiga ta'siri va atrof-muhitga salbiy ta'sirni kamaytirish choralariga oid ma'lumotlar keltirilgan.

Kalit so'zlar: oksidlab kuydirish, qiyin qayta ishlanadigan ma'dan, uglerodli tuzoq, sulfidli ma'danlar, oltinli ma'danlar, gidrometalluriya.

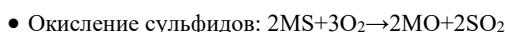
Введение. Актуальность темы окислительного обжига упорных углеродсодержащих сульфидных руд обусловлена необходимостью повышения эффективности извлечения драгоценных и цветных металлов из минерального сырья, обладающего сложным составом. В современных условиях истощения легкодоступных запасов полезных ископаемых все большую долю добываемых руд составляют упорные, низкосортные и труднообогатимые материалы, содержащие значительное количество органического углерода. Углерод в таких рудах играет негативную роль, поскольку он может связывать ценные металлы, снижая их извлечение традиционными методами, такими как цианирование. Этот эффект известен как "углеродная ловушка", при которой углерод активно адсорбирует растворенные соединения золота и серебра, препятствуя их переходу в раствор и последующему осаждению. Поэтому разработка и внедрение эффективных методов обработки таких руд является важной задачей современной металлургии и обогатительной промышленности [1].

Окислительный обжиг позволяет разрушить органический углерод и перевести сульфиды в оксины или сульфаты, обеспечивая более эффективное последующее выщелачивание металлов. Этот процесс особенно актуален при переработке золотоносных и серебросодержащих руд, в которых углерод и сульфидные соединения являются основными факторами, затрудняющими гидрометаллургическое извлечение ценных компонентов. Окисление углерода и сернистых соединений не только способствует увеличению извлекаемости металлов, но и снижает потребность в использовании большого количества реагентов при дальнейших этапах переработки [2-3].

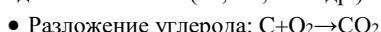
С развитием технологий и ростом требований к экологической безопасности обжига возникает необходимость оптимизации процесса, направленной на минимизацию выбросов диоксида серы и углекислого газа. Для этого применяются различные типы печей, в том числе печи кипящего слоя, вращающиеся печи и многоподовые агрегаты, позволяющие регулировать температурный режим и уровень окисления [4]. Современные методы очистки отходящих газов и улавливания сернистых соединений способствуют снижению негативного воздействия процесса на окружающую среду, что делает окислительный обжиг не только эффективным, но и более экологически безопасным способом обработки сложного минерального сырья.

Таким образом, актуальность применения окислительного обжига для переработки углеродсодержащих сульфидных руд заключается в его способности повышать эффективность извлечения драгоценных и цветных металлов, снижать потери полезных компонентов и минимизировать использование агрессивных химических реагентов на последующих стадиях обработки. Совершенствование технологий обжига и интеграция экологически чистых решений делают этот метод перспективным и востребованным в современной металлургической промышленности [5-6].

Окислительный обжиг позволяет разрушить органический углерод и перевести сульфиды в оксиды или сульфаты, обеспечивая дальнейшую эффективность гидрометаллургической переработки. Основные химические реакции включают:



где ММ – металл (Fe, Cu, Zn и др.).



Окисление углерода снижает его влияние на извлечение драгоценных металлов и улучшает селективность последующего выщелачивания.

Применение окислительного обжига для переработки упорных углеродсодержащих сульфидных руд играет ключевую роль в металлургии драгоценных и цветных металлов. Этот процесс способствует разрушению углеродных компонентов, улучшая эффективность последующего извлечения металлов и снижая негативное воздействие углерода на гидрометаллургические технологии [7].

На свете вышесказанного весьма актуальным является определение форм нахождения углерода и путей ее переработки.

Объект и методика исследования. Объектом исследования служили образцы проб гидрометаллургического завода №-5 АО Навоийского горно-металлургического комбината.

Определение основных показателей процесса обжига выполняли по стандартным методикам [8-10].

Полученные результаты и их обсуждение. Нами для установления оптимальных температурных режимов обжига выполнены следующие эксперименты. Для этого исходный материал флотоконцентрат гидрометаллургического завода №-5 подвергали обжигу в разных температурных интервалах от 300 °C до 800°C. Процесс выполняли в муфельной печи марки SNOL 8,2/1100 LSM01. Время эксперимента во всех случаях составил 2 часа с перемешиванием материала каждые 10 мин. Перед началом опыта определяли основные показатели исходного флотоконцентрат (Табл.). При этом исходный флотоконцентрат имел следующие показатели:

$$\text{Au} = 20,0 \text{ г/тн}$$

$$\text{S}_s = 17,64 \text{ \%}$$

$$\text{C}_{\text{opr}} = 2,98 \text{ \%}$$

$$\text{влаж.} = 9,79 \text{ \%}$$

Таблица

Результаты процесса обжига флотоконцентрат при разных температурах

№	Температурный режим	Состав огарка			Au в хвостах сорбции, г/тн	Извлечение, %
		Au, г/тн	Ss, %	Copr, %		
1	300 °C	22,3	15,83	2,62	8,5	61,8
2	400°C	24,2	7,44	2,38	8,9	63,2
3	500 °C	27,2	0,31	0,54	4,4	86,3
4	600 °C	25,9	0,09	0,17	4,25	83,5
5	700 °C	26,6	0,1	0,16	9,15	65,6
6	800°C	26,8	0,013	0,09	13,85	48,0

В ходе обжига тщательно наблюдали над видоизменениями материала и выделением газовых потоков. По результатам эксперимента можно констатировать что при 300 °C время эксперимента 2 часа, выделение газов не наблюдалось, проба в конце опыта имел буро серый цвет, при 400 °C с подачей воздуха, время эксперимента 2 часа, в конце опыта наблюдается выделение запахов, цвет пробы серый, при 500°C с подачей воздуха, через 15 мин наблюдается накаливание пробы, через 1 час накаливание не наблюдается, но изменяется цвет пробы в коричневый, при 600 °C с подачей воздуха, через 10 мин начинается накаливание пробы, через 40 мин накаливание не наблюдается, выделение газов не наблюдается, цвет пробы изменяется на коричневый, при 700 °C с подачей воздуха, через 7 мин начинается накаливание пробы, но после часа и 2 часов пробы еще была накалена, выделение газов не наблюдается, цвет пробы красновато коричневый, при 800 °C с подачей воздуха, через 5 мин начинается накаливание пробы, но после часа и 2 часов пробы еще была накалена, с образованием больших окатышей, цвет пробы красно-коричневый, выделение газов не наблюдалось.

Анализ данных лабораторных испытаний по обжигу флотоконцентрат при разных температурах показывает, что оптимальный температурный диапазон составляет 500–600°C. При температуре 500°C достигается наилучшее извлечение золота (86,3%) при эффективном окислении серы ($S_s = 0,31\%$) и углерода ($C_{\text{opr}} = 0,54\%$). При 600°C углерод практически полностью окисляется ($C_{\text{opr}} = 0,17\%$), но извлечение золота незначительно снижается до 83,5%. В низкотемпературном диапазоне (300–400°C) извлечение золота остается на низком уровне (61,8–63,2%), а содержание серы и углерода остается высоким, что указывает на недостаточную степень разложения сульфидов и органических соединений. В высокотемпературном диапазоне (700–800°C) наблюдается снижение извлечения золота до 65,6% и 48,0% соответственно, что связано с возможным спеканием материала и образованием плотной корки, препятствующей дальнейшему окислению. В частности, при 800°C углерод практически полностью окисляется ($C_{\text{opr}}=0,09\%$), но извлечение золота резко снижается, что указывает на негативное влияние высоких температур на процесс.

Результаты опыта показывают, что в промежутке 500–600 °C происходит активное окисление сульфидных минералов. А относительно низких температурах (<500–600°C) окислительные реакции протекают медленно и при этом сульфиды частично могут окисляться. Полученные результаты по извлечению металла только подтверждают данный факт. По мере увеличения температуры обжига окисления сульфидных минералов протекает интенсивно, с образованием оксидов металлов (например, Fe_2O_3 , CuO), наблюдается интенсивное выделение газовых потоков-продуктов реакции. Кроме того, температурный режим способствует протеканию фазовых превращений. Особенно низких температурах при

обжиге сульфидных минералов образуется пирротины и соответствующие сульфаты элементов. При условиях стыковки температурного режима и температур плавления собственных, породообразующих и акцессорных минералов может протекать спекания продуктов реакции. Образующие промежуточные продукты и окислы металлов покрывают поверхность материала, будут ограничивать доступ кислорода, закрывая пористость массы, что в конечном итоге приводить к уменьшению извлечения металла.

Заключение. Таким образом, оптимальным является температурный диапазон 500–600°C, при котором достигается эффективное разложение углерода и сульфидов без существенного снижения извлечения металлов. Для предотвращения спекания при температурах выше 600°C возможно применение регулирования газового потока или добавление инертных материалов, предотвращающих агломерацию. Дополнительные исследования могут быть направлены на изучение влияния времени обжига на процесс окисления, что позволит определить наиболее эффективные параметры для переработки конкретных руд. Совершенствование технологий обжига и интеграция экологически чистых решений делают этот метод перспективным и востребованным в современной металлургической промышленности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Fernández, R.R., Sohn, H.Y. & LeVier, K.M. Process for treating refractory gold ores by roasting under oxidizing conditions. *Mining, Metallurgy & Exploration* **17**, 1–6 (2000). <https://doi.org/10.1007/BF03402822>
2. Berezowsky, M.G.S., and Weir, D.R., 1989, "Factors affecting the selection of pressure oxidation for the pretreatment of refractory gold ores," Paper Presented at the E&MJ International Gold Expo and Conference, Reno, NV, Sept. 7–9.
3. Karimi Darvanjoooghi, M.H., Magdouli, S. & Brar, S.K. Recent challenges in biological cyanidation and oxidation of sulfide-based refractory gold ore. *World J Microbiol Biotechnol* **40**, 67 (2024). <https://doi.org/10.1007/s11274-024-03887-2>
4. Санакулов К.С., Сагдиева М.Г., Тагаев И.А. "Биогидрометаллургия: реалии и перспективы при решении проблем." Научная монография. Изд-во «Муҳаррир нashriyoti» Ташкент. 415 с.
5. Ahtiainen R, Lundstrom M (2016) Preg-robbing of gold in chloride-bromide solution. *Physicochem Probl Miner Process* **52**:244–251
6. Yang H. et al. Research status of carbonaceous matter in carbonaceous gold ores and bio-oxidation pretreatment //Transactions of Nonferrous Metals Society of China. – 2013. – Т. 23. – №. 11. – С. 3405-3411.
7. Yang H. et al. Research status of carbonaceous matter in carbonaceous gold ores and bio-oxidation pretreatment //Transactions of Nonferrous Metals Society of China. – 2013. – Т. 23. – №. 11. – С. 3405-3411.
8. ГОСТ 23581.20-81
9. Аналитический контроль благородных металлов Коллективная монография под ред. Карпова Ю.А., Барановской В.Б., Житенка Л.П. Москва: ТЕХНОСФЕРА, 2019. – 400 с.
10. Иванюк Б.О. Приборный анализ горных пород, руд и минералов. – Магадан:Магаданская книжное изд. 1986, -79с.