



© Фузайлов О.У., Сайфуллаев Ф.И., Мажидова И.И., Жабборова С.Г.

ИССЛЕДОВАНИЕ СПОСОБОВ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ПРОЦЕССА ОБЖИГА СУЛЬФИДНЫХ ЗОЛОТОСОДЕРЖАЩИХ КОНЦЕНТРАТОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ МИКРОВОЛНОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Фузайлов О.У. - доцент кафедры «Металлургия» Навоийского государственного горно-технологического университета, **Сайфуллаев Ф.И.** - магистрант кафедры «Металлургия» Навоийского государственного горно-технологического университета, **И.И.Мажидова** - магистрант кафедры «Металлургия» Навоийского государственного горно-технологического университета, **С.Г.Жабборова**, магистрант кафедры «Металлургия» Навоийского государственного горно-технологического университета.

Аннотация. В статье приведены результаты исследований по интенсификации процесса обжига упорных золотосодержащих концентратов с использованием микроволновой энергии. Показано, эффективность процесса обжига за счет установки устройства непрерывной подачи нагретого воздуха с температурой 300°C. Результаты показали, что достаточное время горения на воздухе можно сократить до 14 минут, что является эффективным результатом с точки зрения скорости процесса

Ключевые слова: золото, упорная золотосодержащая руда, флотационный концентрат, микроволновый обжиг, сульфидные минералы, удаление углерода, микроволновая мощность, пирит, арсенопирит, органический углерод, окисление.

Annotation. The paper presents the results of studies on the intensification of the roasting process of refractory gold-bearing concentrates using microwave energy. It is shown that the efficiency of the process due to the installation of a device for continuous supply of heated air with a temperature of 300°C. The results showed that a sufficient burning time in air can be reduced to 14 minutes, which is an effective result in terms of process speed.

Keywords: gold, refractory gold ore, flotation concentrate, microwave roasting, sulfide minerals, carbon removal, microwave power, pyrite, arsenopyrite, organic carbon, oxidation.

Annotatsiya. Maqolada mikroto'lqinli energiyadan foydalangan holda murakkab tarkibli oltin konsentratlarini kuydirish jarayonini jadallashtirish bo'yicha tadqiqotlar natijalari keltirilgan. 300°C haroratli isitiladigan havoni uzluksiz etkazib berish uchun qurilmani o'rnatish hisobiga kuydirish jarayonining samaradorligi ko'rsatilgan. Natijalar shuni ko'rsatdiki, havoda yetarli darajada yonish vaqtini 14 daqiqagacha qisqartirish mumkin, bu jarayon tezligi bo'yicha samarali natija bo'lib hisoblanadi.

Kalit so'zlar: oltin, o'tga chidamli oltin rudasi, flotatsion konsentrat, mikroto'lqinli pechda kuydirish, sulfidli minerallar, uglerodni oksidlash, mikroto'lqin quvvati, pirit, arsenopirit, organik uglerod, oksidlanish.

Введение. В упорных золотосодержащих рудах золото находится в виде мелко-дисперсных частиц размером от нанометра до нескольких микрометров. В некоторых других случаях через химические связи золота сульфиды образуют твердые растворы в решетке [1, 2]. Упорные Au-содержащие руды трудно поддаются гидрометаллургическому

извлечению и требуют использование способов предварительной обработки для дезинтеграции золотых частиц и увеличения степени извлечения. Наиболее распространенные методы первичной обработки включают окислительный обжиг, биоокисление, автоклавная обработка и др. В качестве альтернативных способов, применения микроволновой энергии широко исследуется и показывает многообещающие показатели. При использовании микроволновой энергии в качестве источника энергии для сжигания трудноизвлекаемых золотосодержащих концентратов, нагрев минералов с высоким значением диэлектрической проницаемости происходит немедленно и по всему объёму частицы [3]. Микроволновой обжиг комплексных золотосодержащих руд изучался в ряде исследований. Первые опыты проводил Naque (1987) [4, 5], где изучался микроволновый обжиг обогащенного золотом и серебром флотоконцентрата, содержащего ряд сульфидов. Мощность микроволновой печи составляла 6 кВт, а максимальная температура достигала 550°C. Цианирование обожженных образцов показало значительное сравнительное улучшение при последующем выщелачивании. Nanthakumar (2007) в своей работе отмечает, что прямой микроволновый нагрев богатой золотом пиритной руды (включая кварц, доломит и мусковит) невозможен из-за ее низкой проводимости [6]. Обжиг руды в микроволновой печи осуществлялся путем добавления частиц преобразователей тепловой энергии во время микроволновой обработки. Было обнаружено, что сульфидная руда, обожженная в микроволновой печи (в течение 40 минут), показывает степень извлечения золота 98% при цианировании. Схожие результаты были достигнуты при обычном обжиге при 580°C в течение 12 часов в печи сопротивления, что свидетельствует о значительном снижении энергопотребления в микроволновых печах. К. Санакулов и др. [7,8] проводили исследования по микроволновому обжигу золотосодержащих концентратов содержащих сульфид и органический углерод,

где за 45 минут достигли полное окисления сульфидов и степень извлечения увеличилась от 27% до 74,5%. В настоящей работе изучен окислительный обжиг пирит-арсенопиритового концентрата в микроволновой печи. Исследованы способы интенсификации путем интенсивной аэрации. Фазовые изменения минералов происходящие в процессе обжига, исследовали методами термогравиметрии, и рентгеноструктурного анализа. В предыдущих опытах [7], концентрат периодически перемешивался и наблюдалось снижение температуры при перемешивании, при этом образец не перемешивался при обжиге, что приводило к недостаточному контакту частиц с окисляющим кислородом воздуха. Эти два фактора несколько замедлили скорость реакции.

Методы исследования. В данной работе мы поставили перед собой задачу устранить эти негативные факторы и создали специальные условия для процесса обжига флотоконцентрата в микроволновой печи. Для этого в тигель засыпали 2 г образца. Для обеспечения максимальной выдержки концентрата на воздухе, флотоконцентрат засыпали в тигель толщиной -2 мм и изолировали со всех сторон стекловатой. Печь нагревали и на тигель устанавливали термостойкую трубку для подачи воздуха, нагретого до 300 °С (рис. 1). Образцы сжигали при следующих интервалах мощности: 200; 400; 600; 800; 1000 Вт. Каждый образец обработали в течение 5, 8, 11 и 14 минут с введением воздуха в через трубку. Для предотвращения спекания образца в процессе обжига печь периодически отключали. Для выбора наиболее подходящей мощности при 1000 Вт мощность снижали до 500 Вт, затем до 400 Вт и, наконец, до 200 Вт, когда температура образца достигала 650 °С. Температуру измеряли каждые 2 минуты.

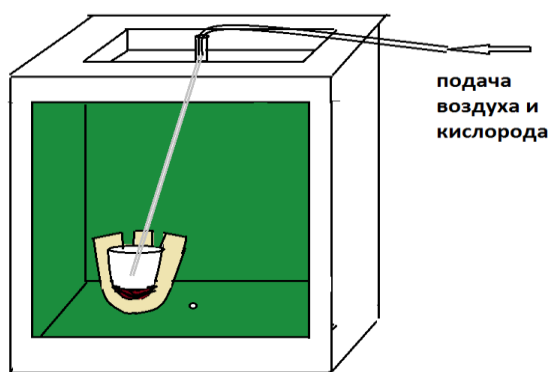


Рис. 1. Вид микроволновой печи с подачей нагретого воздуха.

Все образцы были подвергнуты химическому анализу на содержание Собщ, Сорг, Собщ, СС, As и железа. Рентгенофазовый анализ образцов также проводился для определения изменения минерального состава концентрата при подаче воздуха и кислорода.

Обсуждение результатов. Флотационный концентрат минералов пирита и арсенопирита находится в виде тонкодисперсных частиц, трудно отделяемых от золота. Такие концентраты не переходят в раствор золота из-за слабого растворяющего действия сульфидных минералов на кристаллическую решетку при сорбционном цианировании. Поэтому для разрушения кристаллической решетки сульфидов используются различные методы [9]. Одним из методов является термическая обработка для обнажения поверхности драгоценного металла.

В ходе анализа были получены данные термического анализа в виде численных данных для определения изменения массы в диапазоне температур от 50 до 900 °С и затем обработаны для более точного определения потери массы в определенных частях диапазона температур. Термогравиметрический анализ (ТГА), представляющий изменение массы в зависимости от температуры. Как показано, потеря массы в интервале температур от 50 до 438 °С составила 0,97%, что связано с выделением внутренней и гигроскопической влаги. В интервале температур от 438 до 643 °С потеря массы достигала 10,72%. Максимальная потеря массы наблюдалась при температуре 568 °С, что свидетельствует о полном окислении сульфидов, при 684 °С происходило сгорание органического углерода и разложение карбонатов [10].

Для изучения тепловых эффектов, возникающих в процессе обжига флотоконцентрата, применялся метод дифференциального сканирующего калориметра (ДСК), который позволяет своевременно определять движение тепловой энергии по температурным функциям. Показано, что в начале процесса происходит интенсивное поглощение тепловой энергии, затем поглощение прекращается и его интенсивность падает до нуля при 390 °С. Как расчеты показали, что при обжиге флотоконцентрата процесс протекает с выделением тепловой энергии, которое показывает возможность автогенного протекания процесса.

Анализы показали, что содержание серы, углерода и мышьяка в необоженном концентрате составляет 2,4% 1,5% и 1,02% соответственно. Прокаливание флотационного концентрата в микроволновой печи в течение 8 минут показало снижение содержания органического углерода примерно на 70%, а степень удаления углерода за 11 минут составила 75,5%. За 14 минут лечения мышьяк уменьшился только на 24%, а остаток мышьяка остался в огарке. Это объясняется тем, что мышьяк в арсенопирите окисляется до летучего As_2O_3 при температуре 450-550 °С в обедненной кислородом атмосфере с образованием пирротина, а затем до магнетита. Избыток

кислорода приводит к образованию нелетучего As_2O_5 , растворяющегося при $315^\circ C$ (рис. 2).

На Рисунке 3 показана скорость восстановления общей и сульфидной серы при микроволновой обработке флотоконцентрата, которая показывает, что процесс окисления серы был намного быстрее, при этом около 50% всей серы окислялось в течение 5 минут обработки. При продолжительности процесса обжига 11 и 14 мин степени окисления сульфидной серы составили 95,6 и 97,8% соответственно.

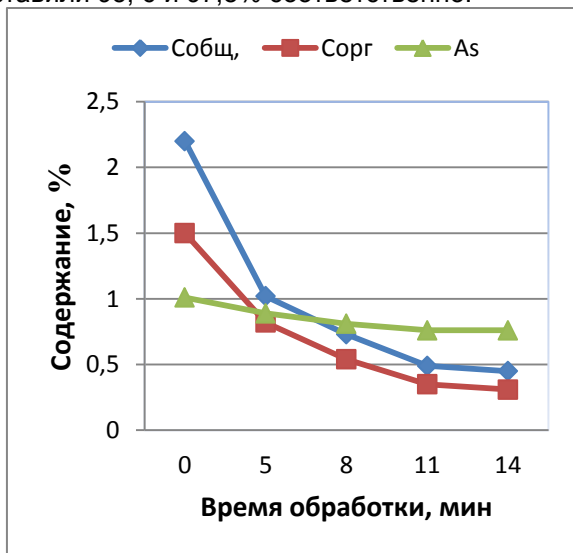


Рис. 2. Изменение содержания общего углерода, органического углерода и мышьяка при СВЧ-обработке флотоконцентрата

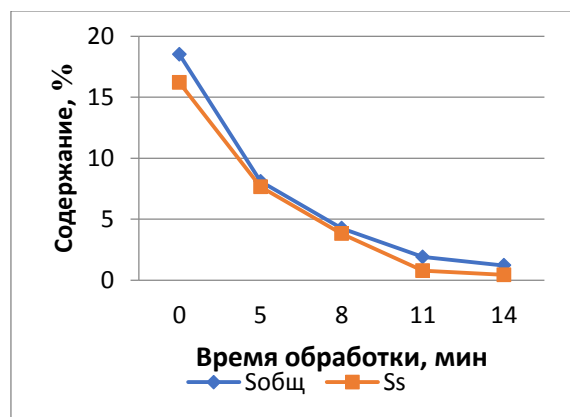


Рис. 3. Изменение содержания общей и сульфидной серы при СВЧ флотации флотоконцентрата

Для определения степени отделения золота образцы, обработанные в микроволновой печи, подвергали 24-часовой сорбции цианидом при концентрации 3 г/л NaCN и 3% древесного угля. Результаты эксперимента представлены в табл. 2.

Таблица 2
Результаты сорбции цианидов флотоконцентрата до и после СВЧ-обработки

Наименование флотоконцентрата	Время обработки в СВЧ, мин	Извлечение Au, %
Флотоконцентрат ГМЗ-3 (Кокпатас, Даугызтау)	Исх, без обработки	29,8
	8	59,6
	11	73,2
	14	74,2

Результаты показывают, что микроволновая обработка флотоконцентрата способствует увеличению степени извлечения золота при последующем сорбционном цианировании.

Закключение. Результаты теплового воздействия показали, что количество энергии, выделяемой при термообработке, значительно превышает количество поглощаемой энергии. В процессе отжига тепловая энергия сначала поглощалась, а затем выделялась.

Показано, что при тех же технологических параметрах эффективность процесса обжига повышается за счет установки устройства непрерывной подачи нагретого воздуха с температурой $300^\circ C$. Результаты показали, что достаточное время горения на воздухе можно сократить до 14 минут, что является эффективным результатом с точки зрения скорости процесса.

Изучение изменения минерального состава при СВЧ-обработке показало, что сульфидные минералы полностью окисляются при СВЧ-обжиге с образованием магнетита, маггемита и гематита. По результатам анализа видно, что маггемита в основном образовалось больше, чем оксидов железа, и последующая обработка не показала существенного изменения маггемита в гематит.

Библиографический список:

- [1]. Fraser, K.S., Walton, R.H. and Wells, J.A. 1991, Processing of refractory gold ores, Miner. Engineer. 4 (7-11), pp. 1029-1041.
- [2]. Marsden, J., House, I. 1992, The Chemistry of Gold Extraction, ed: Spring (New York), pp. 40-178.
- [3]. Koleini, S.M.J., Kianoush, B.K. 2012, Microwave Heating Applications in Mineral Processing in: The Development and Application of Microwave Heating", book ed: Wenbin Cao.
- [4]. Haque, K.E. 1987, Gold leaching from refractory ores—literature survey, Min. Proc. Extv. Metall. Rev. 2, pp. 235-253.
- [5]. Haque, K.E. 1987, Microwave irradiation pretreatment of a refractory gold concentrate, Proc. Int. Symp. on Gold Metallurgy (Winnipeg, Canada) In: Salter, R.S, ed: Wyslouzil, D.M., Mc Donald G.W.
- [6]. Nanthakumar, B., Pickles, C.A., Kelebek, S. 2007, Microwave pretreatment of a double refractory gold ore, Miner. Engineer. 20, pp. 1109-1119.



[7]. Санакулов К., Фузайлов О.У., Кенбаева Ж.А. Микроволновая обработка сульфидных золотосодержащих концентратов 2020.

[8]. Санакулов К., Фузайлов О.У. Исследование инкапсуляции золота в маггемите при микроволновом обжиге флотоконцентрата.

[9]. Лодейщиков В.В. Технология извлечения золота и серебра из упорных руд: монография в

2 т. Иркутск: Изд-во Иргиредмет. Т. 1, 1999.– 342 с. Т. 2, 2000.-452с.

[10]. Ellwood B. B., Burkart, B., Rajeshwar K., Darwin R.L., Neeley R.A., McCall A.B., Long G.J., Buhl M.L., Hickcox C.W. Are the iron carbonate minerals, ankerite and ferroan dolomite, like siderite, important in paleomagnetism?// J. Geophys. Res.- 1989.- 94(B6) –P.7321-7331