

**Ф.Д. Золотарев, Т.Н. Александрова, В.В. Львов, Б.С. Иванов**  
**ПРИМЕНЕНИЕ СВЕРХТОНКОГО ПОМОЛА УПОРНОГО**  
**ЗОЛОТОСОДЕРЖАЩЕГО ФЛОТОКОНЦЕНТРАТА**  
**В ТЕХНОЛОГИИ АВТОКЛАВНОГО ОКИСЛЕНИЯ\***

Представлены результаты экспериментов по сверхтонкому измельчению золото-содержащего флотоконцентрата на энергоэффективной мельнице IsaMill с последующим автоклавным окислением. Исследования проводились на сульфидном золотосодержащем флотоконцентрате одного из месторождений России. Анализ результатов исследования автоклавного окисления флотоконцентрата с применением предварительного сверхтонкого измельчения показал, что механическая активация минеральных веществ, позволяет сократить время выщелачивания и расход кислорода, затрачиваемых на окисление в автоклаве перед металлургическими операциями. Повышение эффективности достигается за счет увеличения удельной поверхности и частичного вскрытия на стадии сверхтонкого измельчения минералов сульфидов.

Ключевые слова: упорное золото, сульфидный флотоконцентрат, автоклавное окисление, сверхтонкое измельчение, механическая активация, энергоэффективная мельница, интенсификация.

**П**роблемы, связанные с переработкой упорного сульфидного сырья, является из наиболее важных в золотодобывающей промышленности. Особое место занимают золотопиритные и золотомышьяковистые руды и их концентраты. Для того, чтобы извлечь золото в операции цианирования, необходимо разрушить кристаллическую решетку минерала-носителя [1]. Традиционный метод извлечения золота из упорных руд заключается во флотационном обогащении, обжиге и последующем цианировании огарка. С конца восьмидесятых годов прошлого века произошло внедрение гидрометаллургических технологий, включающих автоклавное и бактериальное вскрытие руд и концентратов в кислой среде [2]. По ряду причин в Российской Федерации, наиболее перспективной является технология предварительного автоклавного окисления (АО) с после-

дующим выщелачиванием раствором цианида натрия. Однако, технология АО является достаточно дорогостоящей и не всегда рентабельной. Это положение определяется аппаратным оформлением и режимами ведения процесса: температурой 200–230 °С, давлением 25–30 атм., использовани-ем в процессе окисления кислорода из собственной кислородной станции [3]. Одним из методов интенсификации гидрометаллургических операций, является механическая активация минеральных веществ измельчением [4, 5]. Механическая активация представляет собой изменение физического состояния и химических свойств минеральных веществ за счет воздействия на них интенсивных механических нагрузок. Происходит повышение его химической активности вследствие увеличения поверхностной энергии и энергии внутреннего строения [6, 7].

\* Работа выполнена в рамках государственного задания № 5.1284.2014/К.

Одной из первых в производственные процессы была внедрена мельница тонкого измельчения Vertimill компании Metso Minerals. Из аналогов на рынке хорошо зарекомендовала себя бисерная мельница для ультратонкого измельчения компании FLSmidth – VXPmill. Среди отечественных разработок стоит отметить мельницу для тонкого и сверхтонкого измельчения БФК (производитель «Бакор-ФильтрКерамика»). Среди горизонтальных решений следует выделить мельницу для тонкого и сверхтонкого измельчения – IsaMill (Xstrata Technology). Мельница IsaMill является энергоэффективным аппаратом и по сравнению со стандартными шаровыми мельницами обеспечивает значительное снижение энергопотребления в циклах доизмельчения. Эксплуатация IsaMill происходит в многопроходном режиме, при котором продукт одного непрерывного прохода становится питанием для следующего прохода. IsaMill установлена на более чем 200 предприятиях по всему миру. Мельница работает в открытом цикле, благодаря используемому при разгрузке внутреннему сепаратору, который является ноу-хау компании XstrataTechnology [8, 9].

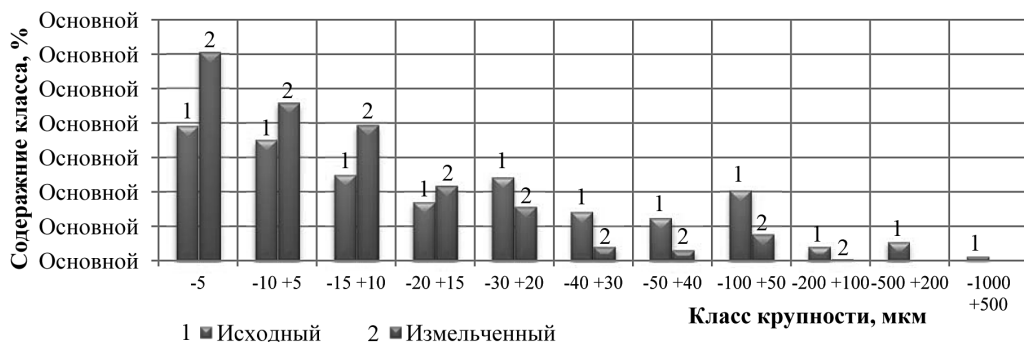
Целью исследований являлось повышение эффективности АО суль-

фидного золотосодержащего флотоконцентрата за счет механической активации и увеличения удельной поверхности минералов сульфидов, предопределяющей скорость сернокислотного выщелачивания.

Исследования проводились на сульфидном золотосодержащем флотоконцентрате одного из месторождений России. Основной причиной технологической упорности первичной руды и флотоконцентратов является тонкая вкрапленность золота в сульфиды. По результатам химического и минерального анализа было определено, что содержание сульфидов во флотоконцентрате составляет 41%. В основном сульфиды представлены в виде пирита, арсенопирита и пирротина. Породообразующие представлены в виде литофильных минералов. Содержание Fe – 30,7%, S – 21,8%, As – 3,8%. Содержание золота во флотоконцентрате составило 46 г/т, серебра 0,41 г/т.

Серия экспериментов по сверхтонкому измельчению сульфидного флотоконцентрата проводились на мельнице модели IsaMillM4, с целью изучения возможности использования данного типа мельниц в цикле доизмельчения.

Данная мельница работает в соответствии с принципом перемешивающих бисерных мельниц, где мелюшие



**Рис. 1. Гранулометрическая характеристика исходного и измельченного флотоконцентратов**

тела ускоряются в емкости при помощи приводного штока. Получаемая телами энергия передается на твердые частицы через столкновение и замедление, специальный привод создает равномерное движение мелющих тел по всему внутреннему пространству. Продукт поступает в виде суспензии и обрабатывается в одну стадию. Приток продукта регулируется подающим насосом, что определяет время пребывания в камере и как следствие конечную крупность. В качестве измельчающей среды в исследованиях применялись высококачественные инертные бисерные шары, с содержанием  $ZrO_2$  не менее 94%, масса измельчаемой пробы 20 кг. Результаты анализа проведенных исследований представлены на рис. 1.

Гранулометрический анализ производился на лазерном анализаторе Malvern Mastersizer 2000. По результатам анализа удельная поверхность частиц измельченного флотоконцентрата составила  $0,677 \text{ см}^2/\text{г}$ , а исходного  $0,947 \text{ см}^2/\text{г}$ .

Поверхностная энергия Гиббса рассчитывалась по формуле:

$$\Delta G_{\text{пов}} = \sigma \Delta S \quad (1)$$

где  $\sigma$  – удельная поверхностная энергия,  $\Delta S$  – изменение удельной поверхности [6].

$\Delta G_{\text{пов}}$  составила для не измельченного флотоконцентрата  $0,49 \text{ кДж/моль}$ , а для измельченного  $0,68 \text{ кДж/моль}$ , что свидетельствует о повышении его химической активности.

Эксперименты по автоклавному окислению проводились при  $t = 220 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $PO_2 = 0,7 \text{ мПа}$ ,  $pH = 1-2$ , Ж:Т = 3:1. Данные полученные в ходе эксперимента представлены на рис. 2.



**Рис. 2. Результаты автоклавного окисления пробы исходного и измельченного флотоконцентрата**

Исследования по сверхтонкому измельчению с последующим АО показали, что время окисления исходного флотоконцентрата составило 91 мин., окисление измельченного концентрата составило 44 мин.

Для уточнения вида кинетических зависимостей и параметров полуэмпирических уравнений кинетики, применен интегральный метод обработки экспериментальных данных, который предусматривает определение вида кинетических уравнений в форме зависимости концентрации реагентов от времени [10]. Так как подобного рода зависимость трудно получить непосредственно, то чаще всего выдвигается гипотеза о дифференциальной форме кинетического уравнения, которое интегрируется при некоторых значениях параметров. Метод используется при обработке экспериментальных данных, полученных в интегральных реакторах (периодический реактор идеального смешения (РИС-П)), к которым можно отнести автоклав. Линеаризация кинетических кривых (рис. 2) в координатах, соответствующих различным порядкам реакции позволила установить порядок реакции по кислороду.

Уравнения кинетики в дифференциальном виде имеют вид:

## Уравнения кинетических кривых

№	Характеристика	Вид уравнения	Коэффициент регрессии, $R_2$
1	Исходный флотоконцентрат	$V_{O_2} = 3,796 + 0,068t$	0,94
2	Измельченный флотоконцентрат	$V_{O_2} = 2,904 + 0,035t$	0,89

$$\frac{dV_{O_2}}{dt} = -kV_{O_2}^{0,5} \quad (2)$$

$$\frac{dV_{O_2}}{dt} = -kV_{O_2}^1 \quad (3)$$

Формула (2) – для исходного флотоконцентрата, (3) – для измельченного флотоконцентрата.

Интегральным методом установлены уравнения кинетических кривых, представленные в таблице.

Из результатов интегральной обработки экспериментальных данных, полученных в ходе АО видно, что при окислении исходного флотоконцентрата порядок реакции составил  $n = 0,5$ , а при АО измельченного флотоконцентрата  $n = 1$ , что свидетель-

ствует о интенсификации процесса и увеличении скорости реакции.

Анализ результатов исследования автоклавного окисления сульфидного золотосодержащего флотоконцентрата с применением предварительного сверхтонкого измельчения показал, что активация минеральных веществ позволяет сократить время выщелачивания и расход кислорода затрачиваемых на окисление в автоклаве перед металлургическими операциями. Повышение эффективности, достигается за счет увеличения удельной поверхности и частичного вскрытия на стадии сверхтонкого измельчения минералов сульфидов, а технология измельчения IsaMill позволяет справиться с поставленной задачей.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Набойченко С.С., Шнеерсон Я.М., Чугаев Л.В., Калашникова М.И. Автоклавная гидрометаллургия цветных металлов. Т. 1. – Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2008. – 376 с.

2. Лодейшиков В.В. Технология извлечения золота и серебра из упорных руд. Т. 2. – Иркутск: ОАО «Иргиредмет», 1999. – С. 17.

3. Аксенов Б.В., Воробьев-Десятовский Н.В. Золото: Автоклавное окисление против биологического. Преимущества и недостатки / Сборник материалов: Международное совещание «Современные методы технологической минералогии в процессах комплексной и глубокой переработки минерального сырья» (Плаксинские чтения–2012). – Петрозаводск, 2012. – С. 395–396.

4. Aleksandrova T.N., Gurman M.A., Kantarat'ev S.A. Some approaches to gold extraction from rebellious ores on the south of Russia's Far East. – Journal of Mining Science. – 2011. – 47(5). – pp. 684–694.

5. Mamaev Ya.A., Yatlukova N.G., Aleksandrova T.N., Litvinova N.M. On gold extraction

from rebellious ores. – Journal of Mining Science. – 2009. – 45(2). – pp. 187–193.

6. Молчанов В.И., Селезнева О.Г., Жирнов Е.Н. Активация минералов при измельчении. – М.: Недра, 1988. – 208 с.: ил.

7. Перов В.А., Андреев Е.Е., Биленко Л.Ф. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых. – М.: Недра, 1990. – 301 с.

8. Xstrata-IsaMill: [Электронный ресурс]. Xstrata Technology Europe. URL: <http://www.isamill.com/EN/Pages/default.aspx> (Дата обращения: 20.07.2013).

9. Николаева Н.В., Ромашев А.О., Александрова Т.Н., Фадинова А.В. Интенсификация технологий разупрочнения и дезинтеграции полидисперсных минеральных комплексов различного генезиса с использованием мельниц IsaMill // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2013. – № 10. – С. 97–101.

10. Шмид Р., Сапунов В.Н. Неформальная кинетика. В поисках путей химических реакций: Пер. с англ. – М.: Мир, 1985. – 264 с. **ГИАБ**

Золотарев Филипп Дмитриевич – аспирант, e-mail: fzolot@mail.ru,  
Александрова Татьяна Николаевна – доктор технических наук, зав. кафедрой,  
e-mail: aleksandrova\_tn@spmi.ru,  
Львов Владислав Валерьевич – кандидат технических наук, доцент, e-mail: opilvv@mail.ru,  
Иванов Баир Станиславович – аспирант, e-mail: bercho@bk.ru,  
Национальный минерально-сырьевой университет «Горный».

---

UDC 669.213.1

### ULTRAFINE GRINDING AS A METHOD OF INTENSIFYING PRESSURE OXIDATION REFRACTORY GOLD FLOTATION CONCENTRATE

Zolotarev F.D., Graduate Student, e-mail: fzolot@mail.ru,  
Aleksandrova T.N., Doctor of Technical Sciences, Head of Chair, e-mail: aleksandrova\_tn@spmi.ru  
Lvov V.V., Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor, e-mail: opilvv@mail.ru  
Ivanov B.S., Graduate Student, e-mail: bercho@bk.ru  
National Mineral Resource University «University of Mines».

---

*Pressure oxidation of sulphide gold flotation concentrate followed by cyanidation is one of the most pressing technology for the processing of raw materials for refractory gold in the Russian Federation. However, the technology pressure oxidation is quite expensive and not always profitable. This position is determined by the hardware design and operating modes of the process: a temperature of 200–230 °C, pressure of 25–30 atm., Using the oxidation of oxygen from its own oxygen plant. An important task for research is to find methods for intensifying pressure oxidation process. This paper presents the results of experiments on ultrafine grinding of gold flotation concentrate on energy-efficient mill IsaMill with followed by pressure oxidation. Research was done on sulphide gold flotation concentrate one of the deposits in Russia. Analysis of the results pressure oxidation flotation concentrate using preliminary ultrafine grinding showed that mechanical activation of minerals reduces leaching time and oxygen consumption spent on oxidation in an autoclave before metallurgical operations. Increased efficiency is achieved by increasing the specific surface area and a partial opening at the stage of fine grinding of minerals sulfides.*

*Key words: refractory gold, sulfide flotation concentrate, pressure oxidation, ultrafine grinding, mechanic activation, energy-efficient mill, intensification.*

### REFERENCES

1. Naboichenko S.S., Shneerson Ya.M., Chugaev L.V., Kalashnikova M.I. *Avtoklavnaya gidrometallurgiya tsvetnykh metallov*. T. 1 (Pressure hydrometallurgy of base metals, vol. 1), Ekaterinburg: GOU VPO UGTU-UPI, 2008, 376 p.
2. Lodeishchikov V.V. *Tekhnologiya izvlecheniya zolota i srebra iz upornykh rud*. T. 2 (Technology of gold and silver recovery from rebellious ore, vol. 2), Irkutsk: OAO «Irgiredmet», 1999, pp. 17.
3. Aksenov B.V., Vorob'ev-Desyatovskii N.V. *Sbornik materialov: Mezhdunarodnoe soveshchanie «Sovremennye metody tekhnologicheskoi mineralogii v protsessakh kompleksnoi i glubokoi pererabotki mineral'nogo syr'ya» (Plakinskie chteniya–2012)* (Proceedings: International Conference on Advanced Methods of Engineering Mineralogy in Integrated and High-Level Mineral Processing (Plaksin's Lectures)), Petrozavodsk, 2012, pp. 395–396.
4. Aleksandrova T.N., Gurman M.A., Kandrat'ev S.A. Some approaches to gold extraction from rebellious ores on the south of Russia's Far East. *Journal of Mining Scienc*, 2011, 47(5), pp. 684–694.
5. Mamaev Ya.A., Yatlukova N.G., Aleksandrova T.N., Litvinova N.M. On gold extraction from rebellious ores. *Journal of Mining Science*, 2009, 45(2), pp. 187–193.
6. Molchanov V.I., Selezneva O.G., Zhirnov E.N. *Aktivatsiya mineralov pri izmel'chenii* (Mineral activation in grinding), Moscow, Nedra, 1988, 208 p.
7. Perov V.A., Andreev E.E., Bilenko L.F. *Droblenie, izmel'chenie i grokhochenie poleznykh iskopaemykh* (Mineral crushing, grinding and screening), Moscow, Nedra, 1990, 301 p.
8. Xstrata-IsaMill. Xstrata Technology Europe, available at: <http://www.isamill.com/EN/Pages/default.aspx>, accessed: 20.07.2013.
9. Nikolaeva N.V., Romashev A.O., Aleksandrova T.N., Fadina A.V. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*, 2013, no 10, pp. 97–101.
10. Schmid R., Sapunov V.N. *Neformal'naya kinetika. V poiskakh putei khimicheskikh reaktsii* (Nonformal kinetics. Nosing for paths of chemical reactions: English–Russian translation), Moscow, Mir, 1985, 264 p.