© С.А. Гончаров, Г.В. Седельникова, Г.С. Крылова, П.П. Ананьев, Ю.А. Мартынов, С.Ф. Лесков, 2006

УДК 622.342:622.788.002.28

С.А. Гончаров, Г.В. Седельникова, Г.С. Крылова, П.П. Ананьев, Ю.А. Мартынов, С.Ф. Лесков

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МАГНИТНО–ИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКИ ЗОЛОТОСОДЕРЖАЩИХ РУД В ПРОЦЕССЕ ИХ ЦИАНИРОВАНИЯ

Для повышения показателей извлечения золота при цианировании золотосодержащих руд и концентратов может применяться технология магнитно-импульсной обработки (МИО), заключающаяся в пропускании руды или концентрата через отрезок диэлектрического трубопровода, на котором размещена система электромагнитных катушек, генерирующая в непрерывном автоматическом режиме импульсы электромагнитного поля.

В схеме гидрометаллургической технологии переработки золотосодержащих руд и концентратов МИО может осуществляться как непосредственно в процессе цианирования (на перетоках пульпы) так и перед цианированием.

При использовании МИО следует учитывать следующую особенность. Развитие микротрещин в руде и концентратах при МИО сопровождается возникновением квазиустойчивых остаточных механических напряжений, которые могут релаксировать во времени под действием внешних воздействий (слабые механические нагрузки, температурные воздействия и т.п.). Это может привести к снижению эффекта раскрытия, поэтому применять МИО целесообразно непосредственно в процессе цианирования, так как растворы обладают хорошим расклинивающим эффектом (рис. 1).

Механизм воздействия импульсного электромагнитного поля на рудный материал может быть представлен следующим образом. При воздействии на руду внешнее электромагнитное поле распространяется по всему объему руды. При наличии в руде минералов - пъезоэлектриков (например – кварца, турмалина и иных сегнетоэлектриков), или магнитных зерен (например – сульфидов, окислов и иных магнитных соединений железа, никеля, хрома), МИО вызывает в этих зернах эффекты магнитострикции и пъезострикции, характеризуемые возникновением деформаций и напряжений в отдельных минералах и, особенно, на их границах.

За счет неоднородности магнитоэлектрических и механических свойств минералов, входящих в состав руды, а также наличия воды в порах, на границах зерен возникает концентрация полей и усилий.

Наибольший эффект МИО возникает при обеспечении условий резонанса, когда частотные характеристики внешнего

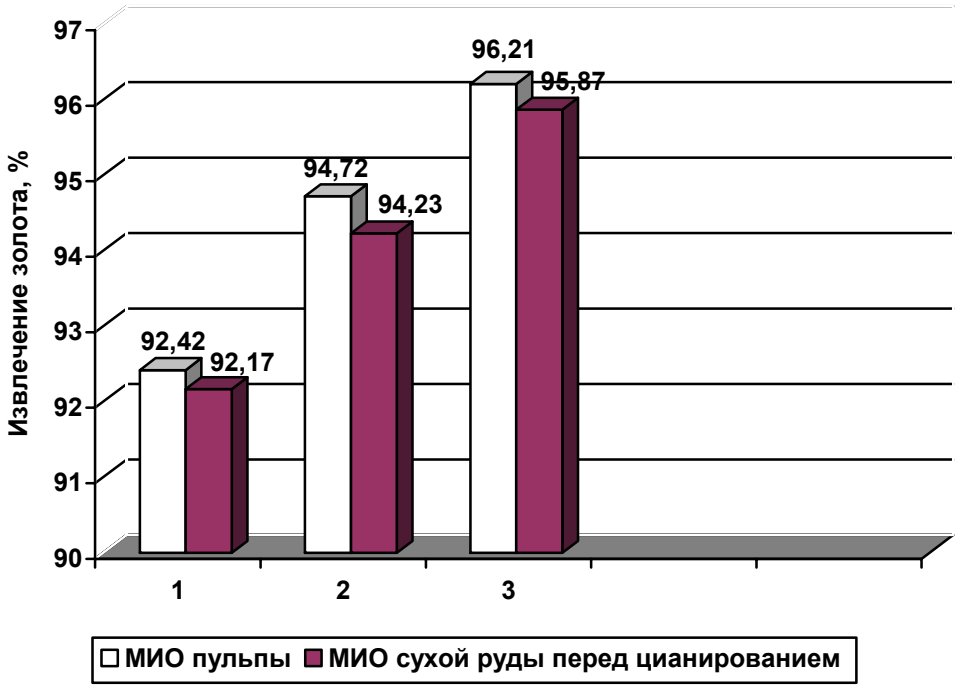

Рис. 1 Извлечение золота при МИО золотосодержащей кварц-полевошпатной руды различной крупности: *1* – для руды крупностью 90 % -0,074 мм; *2* - для руды крупностью 95 % -0,074 мм; *3* - для руды крупностью 95 % -0,050 мм

поля соответствуют собственным частотным спектрам зерен руды.

Величина собственной частоты зерна (f) может быть оценена по формуле:

$$f = \frac{1}{4 \cdot l}\sqrt{\frac{G}{\rho}}, Гц , \qquad (1)$$

где ρ - плотность, $\frac{кг}{м^3}$; G - модуль упругости, $Па$; l - средний размер зерна, $м$.

Учитывая, что плотность минералов золотосодержащих руд составляет (2 – 20)x10^3 кг/м^3, модуль упругости –(1-10)x10^{10} Па, размер зерен (10 –100)x10^{-6} м, можно определить диапазон частот оптимального электромагнитного воздействия, он равен (5-500) МГц.

Область эффективного применения МИО во многом обусловлена минеральным составом сырья. Желательно, чтобы минеральный состав руд или концентратов соответствовал хотя бы одному из нижеприведенных требований:

- минералы, входящие в состав руды (концентрата) обладают резко отличающимися магнито-электрическими и механическими свойствами;
- один или несколько минералов обладают магнитными свойствами;
- один или несколько минералов обладают электропроводностью;
- один или несколько минералов являются пьезоэлектриками.

Кристаллические вещества, в которых при сжатии или растяжении в определенных направлениях возникает электрическая поляризация даже в отсутст-

вии электрического поля (прямой пьезоэффект) называются пьезострикторами. Следствием прямого пьезоэффекта является обратный пьезоэффект – появление механической деформации под действием электрического поля. Связь между механическими и электрическими переменными (деформацией и электрическим полем) носит в обоих случаях линейный характер. Обратный пьезоэффект следует отличать от электрострикции. Первое подробное исследование пьезоэффектов было проведено в 1880 году французскими физиками братьями Ж. и П. Кюри на кристалле кварца.

Пьезоэффекты наблюдаются только в кристаллах, не имеющих центра симметрии. Справедливо общее утверждение: в кристаллах, обладающих центром симметрии, пьезоэффект не возможен.

Пьезоэффект, в отличие от электрострикции, зависит от направления поля. Поэтому, приложив к граням кристалла переменные электрические поля, можно вызвать вибрацию кристалла.

Амплитуда колебаний кристалла бывает наиболее значительной в случае, когда частота поля соответствует резонансной частоте кристалла.

В случая прямого пьезоэффекта, при приложении механической нагрузки, величина поляризации Рэ пьезоэлектрика прямо пропорциональна механическим напряжениям σ.

$$P_э = \xi \cdot \sigma, \frac{К}{м^2}, \qquad (2)$$

где ξ – пьезоэлектрический модуль, $\frac{К}{Н}$.

Для характеристики пьезоэффекта горных пород пользуются отношением пьезомодуля породы к величине ξ монокристалла кварца. Так, наиболее сильным пьезоэффектом обладает жильный кварц (10 % от модуля монокристалла); у кварцитов пьезомодуль составляет 1 %; у гнейсов и гранитов 0,2–0,5 %

Учитывая, что величина поляризации при воздействии на вещество электрического поля определяется общеизвестным выражением:

$$P_э = \varepsilon_0 (\varepsilon - 1) \cdot E, \frac{К}{м^2}, \qquad (3)$$

где ε_0 - диэлектрическая постоянная, равная 8,85х 10^{-12} $\frac{Ф}{м}$; ε - относительная диэлектрическая проницаемость; E - напряженность электрического поля $\frac{В}{м}$;

Из выражений (2) и (3) можно оценить величину механических напряжений, возникающих при воздействии электрического поля (обратный пьезоэффект):

$$\sigma = \frac{\varepsilon_0 (\varepsilon - 1) E}{\xi}, Па \qquad (4)$$

Возникновение механических напряжений в поликристалле при воздействии электрическим полем, вызывает преобразование энергии электромагнитного поля в упругую энергию (W) в объеме сплошного материала

$$W = \frac{\sigma^2 (1 - C_0)}{2G}, \frac{Дж}{м^3} \qquad (5)$$

или с учетом выражения, (4)

$$W = \frac{\varepsilon_0^2 (\varepsilon - 1)^2 \cdot E^2 (1 - C_0)}{\xi^2 2G}, \frac{Дж}{м^3}, \qquad (6)$$

где C_0 - начальная объемная доля пор.

Упругая энергия расходуется на работу по увеличению поверхности пор в руде. Эта работа равна:

$$A = \frac{\gamma \cdot (C - C_0)}{r}, \frac{Дж}{м^3}, \qquad (7)$$

где γ – удельная энергия вновь образованной поверхности, $\frac{Дж}{м^2}$; C - объемная доля пор в руде после воздействия электрического поля; r - величина раскрытия пор, $м$.

Преобразование упругой энергии (W) в работу по увеличению площади пор происходит с некоторым коэффициентом полезного действия:

$$A = \eta \cdot W \qquad (8)$$

Или, с учетом выражений (6) и (7), следует взаимосвязь прироста пор в породах, содержащих минералы пьезострикторы, при электромагнитном воздействии:

$$\frac{\gamma \cdot (C - C_0)}{r} = \eta \cdot \frac{\varepsilon_0^2 (\varepsilon - 1)^2 E^2 (1 - C_0)}{2\xi^2 G}, \frac{Дж}{м^3}, \qquad (9)$$

где η - коэффициент полезного действия процесса преобразования упругой энергии в работу по развитию поверхности пор.

Разделив левую и правую часть уравнения (9) на величину начальной объемной доли пор и, проведя соответствующие преобразования, получим:

$$\frac{C - C_0}{C_0} = \eta \cdot \frac{\varepsilon_0 \cdot E^2 (\varepsilon - 1)}{2} \cdot \frac{r \cdot \varepsilon_0}{\gamma \cdot \xi \cdot G} \cdot \frac{1 - C_0}{C_0} \qquad (10)$$

или

$$\Delta \overline{C} = k \cdot \frac{1 - C_0}{C_0}, \qquad (11)$$

где ΔC - относительный прирост объемного содержания пор, определяемый выражением:

$$\Delta \overline{C} = \frac{C - C_0}{C_0}; \qquad (12)$$

где k - коэффициент пропорциональности, зависящий от энергии электрического поля в материале, а также механических и пьезоэлектрических свойств материала и численно равный:

$$k = \eta \cdot \frac{\varepsilon_0 \cdot E^2 (\varepsilon - 1)}{2} \cdot \frac{r \cdot \varepsilon_0}{\gamma \cdot \xi \cdot G}. \qquad (13)$$

Анализ выражения (11) показывает, что величина относительного прироста пор за счет МИО прямо пропорциональна отношению объема сплошного материала ($1 - C_0$) к объему пор (C_0).

Кроме того, величина относительного прироста пор при МИО прямо пропорциональна энергии электрического поля в веществе рудного материала, с учетом его диэлектрической проницаемости (ε).

Предположив, что извлечение золота (ε_u) при цианировании прямо пропорционально объемному содержанию пор, можно, в первом приближении, представить выражение (11) в виде:

$$\Delta \overline{\varepsilon}_u \sim \frac{100\% - \varepsilon_{u0}}{\varepsilon_{u0}}, \qquad (14)$$

где ε_{u0} - начальный показатель извлечения золота при цианировании (без МИО), %; $\Delta \overline{\varepsilon}_u$ - показатель извлечения золота при цианировании с МИО, %;

Анализ выражения (14) показывает, что эффективность применения МИО при цианировании (по критерию относительного прироста извле-

Таблица 1

Экспериментальные результаты извлечения золота из руды

Содержание класса -0,071 мм, %	**50**	**70**	**90**	**95**
Базовое извлечение (без МИО) (ε_{u0}), %	84,34	88,95	92,42	94,23
Потери в хвостах (без МИО) ($1-\varepsilon_{u0}$), %	15,66	11,05	7,58	5,77
Извлечение при использовании МИО (ε_u), %	87,72	92,06	94,74	95,44
Относительный прирост извлечения, $\Delta\bar{\varepsilon}_u$ %	4,01	3,50	2,51	1,28

Таблица 2

Экспериментальные результаты извлечения золота из концентрата

Содержание класса -0,044 мм	**25%**	**60%**	**80%**	**98%**
Базовое извлечение (без МИО) (ε_{u0}), %	87,90	89,50	91,60	92,10
Потери в хвостах (без МИО) ($1-\varepsilon_{u0}$), %	12,10	10,50	8,40	7,90
Извлечение с МИО (ε_u), %	89,60	91,60	92,60	92,60
Прирост извлечения, $\Delta\bar{\varepsilon}_u$ %	1,93	2,35	1,09	0,54

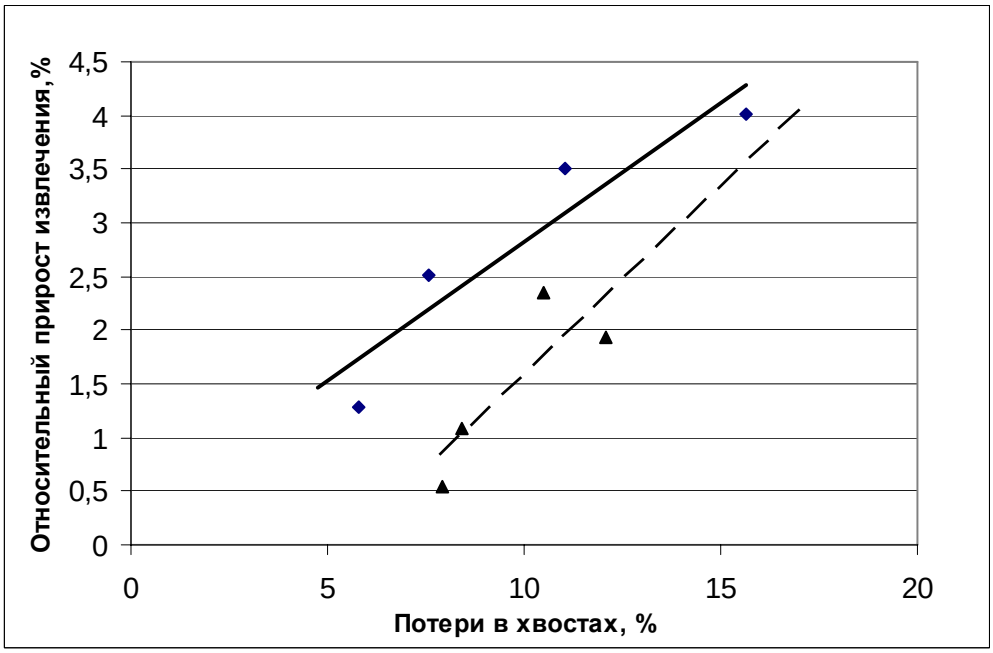

Рис. 2. Зависимость относительного прироста извлечения золота за счет МИО от потерь в хвостах цианирования базовой технологии:

———— МИО руды;

– – – – МИО концентрата

чения) прямо пропорциональна отношению потерь золота в хвостах при цианировании ($100\% - \varepsilon_{u0}$) к извлечению золота (ε_{u0}) при базовой технологии (без МИО).

Учитывая, что на практике базовая технология обеспечивает извлечение более 80 %, в первом приближении можно считать, что эффективность применения МИО прямо пропорциональна имеющимся потерям золота в хвостах цианирования при базовой технологии (без МИО).

Объектами экспериментальных исследований являлись золотосодержащая руда и концентрат, имеющие в своем составе более 50 % кварц.

В табл. 1 и 2 приведены результаты цианирования руды и концентрата разной крупности с использованием магнитно-импульсной обработки.

Теоретические и экспериментальные исследования по использованию магнитно-импульсной обработки золотосодержащих руд и продуктов их обогащения (концентратов) в процессе их цианирования показали, что эффективность использования МИО находится в прямой зависимости от потерь золота в хвостах цианирования при базовой технологии, что обуславливает целесообразность ее использования на золото извлекающих фабриках для повышения показателей извлечения золота.

Коротко об авторах

Гончаров Степан Алексеевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Физика горных пород и процессов»,
Седельникова Г.В. Крылова Г.С. Ананьев П.П. Мартынов Ю.А., Лесков С.Ф. –Московский государственный горный университет.

ТЕКУЩАЯ ИНФОРМАЦИЯ О ЗАЩИТАХ ДИССЕРТАЦИЙ ПО ГОРНОМУ ДЕЛУ И СМЕЖНЫМ ВОПРОСАМ

Автор	*Название работы*	*Специальность*	*Ученая степень*
МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГОРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ			
ГЛАДАРЕВСКИЙ Руслан Анатольевич	Разработка взрывного ресурсосберегающего способа разрушения железистых кварцитов при их рудоподготовке	25.00.20	к.т.н.
СОЛОВЬЕВ Сергей Валентинович	Разработка методов расчета и оптимизации технологических параметров мельниц мокрого самоизмельчения алмазосодержащих руд	25.00.13	к.т.н.