

УДК 622.765+621.385.6+533.1

И.Ж. Бунин

**МОЩНЫЕ НАНОСЕКУНДНЫЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ
ИМПУЛЬСЫ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ В ПРОЦЕССАХ
ДЕЗИНТЕГРАЦИИ МИНЕРАЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ***

Семинар № 25

В процессах обогащения минерального сырья около 70 % энергии расходуется на дробление и измельчение руды. Расход электроэнергии на процесс измельчения в зависимости от типа руд составляет от 20 до 60 кВт·ч/т. Причем, в ряде случаев, увеличение тонины помола не приводит к повышению степени раскрытия минералов, в то же время увеличивается количество тончайших частиц (< 10 мкм). Анализ основных потерь в процессах первичной переработки руд показывает, что 35-40 % связано со сростками и 30-35 % – с тонкими частицами менее 40 мкм [1-3]. Чтобы снизить эти потери при переработке тонковкрапленных руд без образования сростков и одновременно без излишнего переизмельчения, неселективные традиционные процессы дробления и измельчения в щековых, конусных дробилках и шаровых мельницах должны быть заменены процессом селективной дезинтеграции.

В процессах обогащения полезных ископаемых значение дезинтеграции заключается в полном раскрытии минеральных сростков с образованием свободных зерен компонентов для последующего их разделения по физико-химическим характеристикам [4].

Физический смысл перехода к селективной дезинтеграции [5] заключается в организации процесса таким образом, чтобы разрушение происходило не по случайным направлениям сжимающих усилий, а преимущественно по границам минеральных зерен в результате развития на их границах сдвиговых и растягивающих нагрузок. При такой физической реализации процесса разрушению могут подвергаться материалы с предельно высокими механическими свойствами без излишнего переизмельчения кристаллитов, и, следовательно, с минимальными энергозатратами.

К основным принципам рационализации процесса селективного разрушения относятся следующие положения [4]:

1. Обеспечение условий всестороннего объемного сжатия частиц измельчаемого материала;
2. Комбинированное нагружение кусков руды (с элементами сдвига, изгиба, кручения и, желательного, растяжения), обеспечивающее возникновение напряжений на границах кристаллов;
3. Достижение необходимого уровня энергетического воздействия, приводящего к накоплению необратимых деформаций на межзеренных границах

*Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ «Научная школа акад. В.А.Чантурия» НШ-4918.2006.5 (РИ-112/001/028) и РФФИ (гранты № 05-05-64039-а и № 06-05-96082-р-восток-а).

каждого куска минерала;

4. Снижение потерь энергии на пластическую деформацию (высокая частота и скорость нагружения для тонковкрапленной руды);

5. Относительная подвижность и переориентация частиц руды в промежутках между циклами нагружения;

6. Ограничения максимального и минимального уровней усилий, необходимых для создания стартовых напряжений, вызывающих развитие микротрещин в макротрещину;

7. Оптимизация соотношения сжимающих и комбинированных видов нагружений и их параметров в зависимости от типа измельчаемого материала.

Эти принципы реализуются в мельницах динамического самоизмельчения, конусных виброинерционных дробилках [6], газоструйных и пружинных мельницах для сверхтонкого измельчения (АО «Механобр»), обеспечивающих энерго-, ресурсосбережение, повышенное извлечение полезных компонентов и получение продуктов высокого качества.

Однако, гораздо более селективными (структурно-чувствительными) являются нетрадиционные способы энергетического воздействия на минеральные комплексы, обеспечивающие разрушение по межфазным границам за счет образования микротрещин при электрохимической обработке пульпы или создания каналов пробоя при высокоэнергетических воздействиях. Так называемая «физическая» упорность минеральных комплексов (руд) преодолевается как традиционными энергоемкими способами измельчения руд до класса крупности частиц –40 мкм (~90 %), термической обработкой сульфидных концентратов, так и нетрадиционными методами вскрытия минералов (сульфидов, кварцитов) за счет энергетических воздействий: элек-

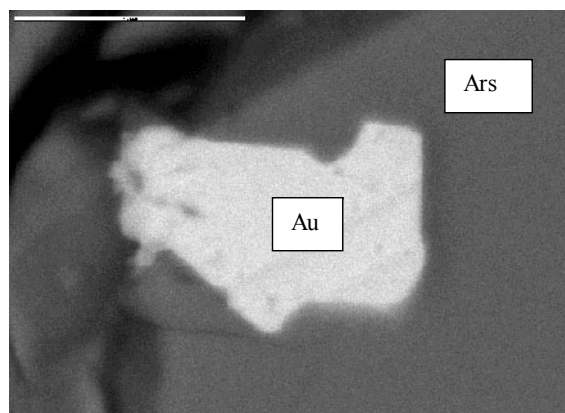
трохимическое окисление [7], поток ускоренных электронов [8, 9], СВЧ-нагрев [10, 11], электроимпульсное [12] и электрогидродинамическое [13] воздействие, магнитно-импульсная обработка [14, 15] и др. Каждый из указанных способов энергетического воздействия характеризуется физическими процессами и механизмами взаимодействия концентрированных потоков энергии со сложноструктурированными минеральными средами.

Для оценки перспектив использования различных энергетических воздействий в процессах рудоподготовки в ИПКОН РАН [2, 3] впервые проведен анализ известных нетрадиционных методов обработки минерального сырья, направленных на повышение эффективности процессов дезинтеграции тонковкрапленных минеральных комплексов, вскрытия сульфидов (и/или кварцитов и др.) и извлечения микро- и наночастиц благородных металлов в последующих гидрометал-лургических и гравитационных процессах (табл. 1). Следует отметить, что практически все вышеперечисленные методы воздействия обладают следующими недостатками: сравнительно высокие энергетические затраты, избыточный нагрев обрабатываемого материала, интенсификация процесса выщелачивания сульфидов и неконтролируемый переход ионов металла в жидкую фазу. В ИПКОН РАН совместно с ИРЭ РАН, ФГУП ЦНИГРИ и ООО НПП «ФОН» (г. Рязань) разработан метод, характеризующийся отсутствием вышеперечисленных недостатков, а именно, нетрадиционный, высокоэффективный и экологически безопасный метод обработки материалов,

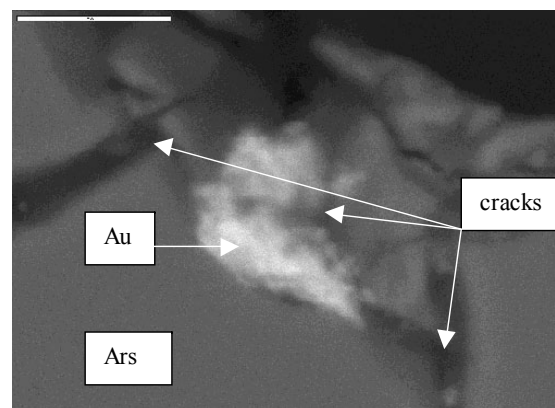
Таблица 1
**Нетрадиционные энергетические методы дезинтеграции
 минеральных комплексов**

Вид воздействия; процессы (операции) перера- ботки; технологический эффект	Ограничения (побочный эффект)	Расход электро- энергии, кВт·ч/т	Внедрение (стадия реализации); вид сырья	Авторы метода, год
Электрохимическая обработка				
Процессы выщелачивания; повышение извлечения Au и Ag на 10–25 %	Повышенный расход электро- энергии; торможение процесса дезинтеграции за счет образования S ⁰ ; пассивация электродных систем; необходимость сочетания с химическим воздействием для повышения электропроводности среды	50–60 (вод- ная среда); 20–30 (ще- лочная или кислая сре- да)	Лабораторные и опытно- промышленные испытания; сульфидные руды, содержащие благородные металлы	В.А.Чантурия, В.Е.Вигдергауз, Т.В.Чекушина, 1993
Поток ускоренных электронов				
Дезинтеграция минеральных комплексов; повышение: про- изводительности цикла из- мельчения в 1,5–2 раза; из- влечения Zn, Cu, Pb при фло- тации на 5–10 %; извлечения Au и Ag при цианировании на 25– 30 %	Высокие капитальные затраты; технические трудности внедрения в действующие схемы обо- гащения; повышенный расход электроэнергии; нагрев образца, изменение поверхностных и объемных свойств	5–10	Лабораторные и полу- промышленные испытания на установке непрерывного действия производи- тельностью 40 кг/ч; суль- фидные, железные руды и др.	Г.Р.Бочкарев, В.И.Ростовцев, Ю.П.Вейгельт, В.А.Чантурия, В.Е.Вигдергауз, 1983
СВЧ–обработка				
Разупрочнение минеральных комплексов; сокращение про- должительности измельчения на 20–25 %; повышение извлечения Au на 10 %	Сложность реализации в про- мышленных условиях; нагрев образца, оплавление, возможность обработки только сухих образцов; изменение поверхностных и объемных свойств минералов	5–7	Лабораторные исследова- ния; золотосодержащие кварц-полевошпатовые ру- ды; пиритные флотокон- центраты, золото-мышья- ковые гравитационные концентраты, руды, со- держащие МПГ	К.Е.Наque et al. 1999; А.В.Хван, В.И.Соловьев, В.М.Петров, Г.В.Седельникова и др. 2001-2004

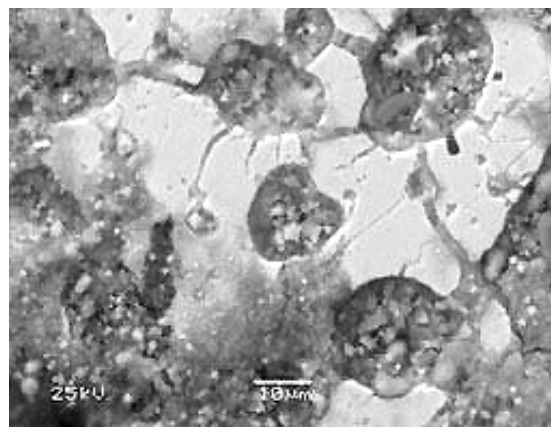
Электроимпульсная обработка				
Разрушение вследствие электрического взрыва в объеме материала; повышение степени раскрытия сростков минералов	Высокие энергозатраты; ограничения на возможность обработки тонкодисперсного минерального сырья перед цианированием	Энергия в импульсе 0,5–20 кДж	Лабораторные исследования; дробильно-измельчительные промышленные установки; все виды сырья	В.И.Курец, А.Ф.Усов, В.А.Цукерман, 1970-1990
Электрогидродинамическое воздействие				
Наносекундный пробой воды, содержащей взвешенные микрочастицы; повышение извлечения Au при цианировании на 60–70 %	Неконтролируемое изменение ионного состава жидкой фазы; невозможность обработки сухого или увлажненного (на 10–15 %) материала; крупность материала должна быть не менее 90–100 % класса –74 мкм	3–5	Опытно-лабораторная установка; золотосодержащие хвосты переработки медно-цинковых руд	Ю.А.Котов, Г.А.Месяц, А.Л.Филатов и др., 2000
Магнитно-импульсная обработка (МИО)				
Образование трещин	Применим только для минералов-ферромагнетиков; малый прирост извлечения	Уменьшение суммарных энергозатрат на 3–5 кВт·ч/т	Лабораторные и опытно-промышленные испытания; железистые кварциты	С.А.Гончаров и др., 2000-2005
Мощные наносекундные электромагнитные импульсы (МЭМИ)				
Дезинтеграция и вскрытие тонковкрапленных минеральных комплексов; повышение извлечения: благородных металлов при цианировании на 10–80 %; МПГ в операциях обогащения в центробежных концентраторах на 5–6 % при доводке черновых концентратов и на 60–70 % при дообогащении хвостов	Минимальный размер образца ~100 мкм; необходимость защитной экранизации зоны размещения генератора импульсов; влажность материала не должна превышать 30 %	2–3	Лабораторные испытания; полупромышленные испытания на установке непрерывного действия производительностью до 100 кг/ч; сульфидные руды, кварциты, продукты обогащения (концентраты, хвосты), содержащие благородные металлы и МПГ	В.А.Чантурия, Ю.В.Гуляев, И.Ж.Бунин, В.Д.Лунин и др., ИПКОН РАН, ИРЭ РАН, ЦНИГРИ, ООО НПП «ФОН», ГМК «Норильский Никель» 1997-2006



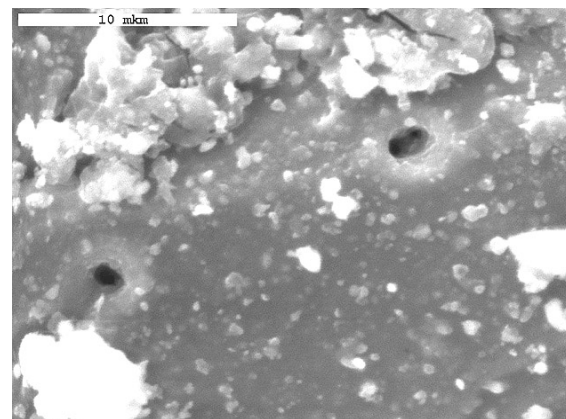
a



б



в



г

Рис. 1. Зерно самородного золота (Au) в матрице арсенипирита (Ars) до (а) и после (б) воздействия мощными электромагнитными импульсами (масштабная линейка 10 мкм). Образование каналов электрического пробоя (в) и их выход на поверхность арсенипирита (в) и пирита (г)

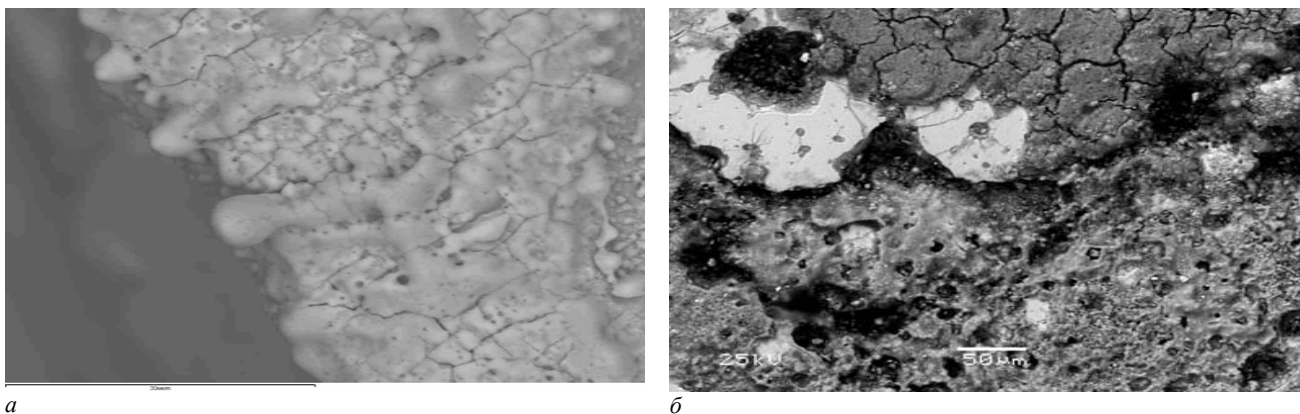


Рис. 2. Новообразования на халькопирите (а) и особенности микроструктуры поверхности арсенопирита (месторождение Нерчинское, Забайкалье) (б) и после воздействия МЭМИ

Таблица 2

Основные параметры мощных электромагнитных импульсов и возможные механизмы дезинтеграции минеральных комплексов

Режимы и параметры импульсного воздействия	Физические процессы в минеральном веществе
$E_A > E_{пр}, E_A \geq 10^7 \text{ В/м},$ $\tau_1 < \tau_2, \tau_1 \approx 1-5 \text{ нс},$ <i>(для видеоимпульсов:</i> $\tau_1 = 1 \text{ нс}, \lambda = 30 \text{ см}, f = 1 \text{ ГГц};$ $\tau_1 = 5 \text{ нс}, \lambda = 150 \text{ см}, f = 2 \text{ ГГц}),$ $t_{имп} \ll t_{heat}, t_{имп} \sim 5-200 \text{ нс},$ $W \sim 100 \text{ ГВт/м}^2$	Электрической пробой (шнурование тока): испарение вещества материала; повышение давления в локальных областях; образование сквозного канала пробоя в местах неоднородности среды, связывающего частицы благородных металлов между собой и с поверхностью; разупрочнение минеральной матрицы; Воздействие серии импульсов – образование множественных каналов пробоя и микротрещин
Отрицательные эффекты $E_A \geq E_{пр},$ $\tau_1 < \tau_2,$ $t_{имп} \approx t_{heat}, 10^{-3} \text{ с (мс)}$	Электротепловой пробой: перераспределение тепла по объему материала, приводящее к перегреву минерального агрегата; оплавление и спекание частиц; закрытие каналов пробоя
$E_A \leq E_{пр}, \tau_1 \geq \tau_2, 10^{-6} \text{ с (мкс)}$	Искровой разряд в воздушном зазоре между электродами

содержащих благородные металлы, за счет нетеплового воздействия на руды и продукты обогащения мощными электромагнитными импульсами (МЭМИ) наносекундной длительности [16-19], защищенный патентами РФ 2139142, 2176558, 2226560 и 2264865.

В статье рассмотрены основные параметры мощных наносекундных электромагнитных импульсов применительно к обработке тонкодисперсных минеральных сред и результаты их использования в процессах обогащения и гидрометаллургии.

Феноменологическая модель процесса дезинтеграции минеральных комплексов при воздействии МЭМИ.

Возможные механизмы дезинтеграции частиц минералов (табл. 2) обуславливаются следующими физическими процессами, возникающими при воздействии на данную среду электромагнитного импульса с высокой напряженностью электрического поля (E) [16, 17, 19]. При напряженности электромагнитного поля, превышающей критическую величину, называемую электрической прочностью $E_{пр}$ (например, для кварца $(2-3) \cdot 10^7$ В/м), в твердом диэлектрике (полупроводнике) развивается электрический пробой, сопровождающийся возникновением электрического тока в узком канале (токовой нити). Процесс образования нити или шнурование тока обусловлен сильной нелинейностью вольт-амперной характеристики среды в условиях электрического пробоя. Так как среда, подвергаемая электромагнитному импульсному воздействию, состоит из отдельных несвязанных частиц, возможна ситуация, когда основной ток разряда пойдет по воздушным зазорам между частицами, не затрагивая их внутренний объем. Этого можно избежать при использовании импульсов с коротким (~ 1 нс) фронтом τ_1 и амплиту-

дой E_A , существенно превосходящей электрическую прочность вещества в статическом поле. При таком воздействии пробой по газовым (воздушным) зазорам между частицами не успевает развиться из-за значительного времени τ_2 , необходимого для ионизации газа вдоль узкого сильно искривленного пути. Основным каналом протекания тока станет менее инерционный пробой минеральной матрицы (рис. 1).

При протекании тока по токовому шнуру происходит выделение энергии. В начальный момент ($\sim 1-50$ нс) процесс можно считать адиабатическим, и энерговыделение в шнуре приводит к испарению вещества, резкому повышению давления и, в конечном итоге, к разрушению вещества с образованием сквозного канала пробоя. Если разряд поддерживается и дальше, выделяющееся тепло начинает перераспределяться по объему вещества, и может привести к отрицательным эффектам (табл. 2): к перегреву, спеканию частиц, оплавлению поверхности частиц, формированию структур поверхностных новообразований (рис. 2, а) и закрытию образовавшихся микроповреждений (рис. 2, б), что в дальнейшем затруднит доступ выщелачивающего раствора ^{внутри частиц.}

Электрическая прочность материалов, близких к тем, которые могут входить в состав подвергаемых воздействию минеральных компонентов, изменяется в широких пределах: кварц – $(2-3) \cdot 10^7$, слюда – $5 \cdot 10^7-2 \cdot 10^8$, мрамор $6 \cdot 10^6-3 \cdot 10^7$ В/м. Она может существенно уменьшаться в десятки раз из-за наличия неоднородностей. Неоднородность среды, особенно наличие электропроводящих включений, существенно облегчает развитие пробоя из-за повышения напряженности электрического поля в областях локализа-

ции неоднородностей. Поэтому образующиеся каналы будут преимущественно связывать примеси благородных металлов между собой (рис. 1, б), (рис. 3) и с поверхностью (рис. 1, в, г), что существенно повысит эффективность последующей обработки химическими реагентами. Для образования достаточного количества каналов потребуется воздействие большого числа импульсов. При повторяющемся воздействии частичных разрядов в твердых диэлектриках вследствие развития диссипативных процессов образуются дендриты – древовидные фрактальные структуры (рис. 4), ветви которых представляют собой области нарушения сплошности (повреждаемости) разрушаемого от импульса к импульсу материала.

Зависимость мощности P , выделяющейся в разряде, от напряженности поля E носит существенно нелинейный характер $P = \alpha E^n$, где $n = 10-16$ в зависимости от конкретного вещества. Если пробой происходит в режиме частичного разряда, когда протекающий заряд определяется поляризацией обрабатываемого вещества, полная выделяющаяся энергия в отдельной частице вещества пропорциональна квадрату средней напряженности поля $W \cong \beta E^2$, где β зависит от размеров, формы и диэлектрических свойств частицы. Образование повреждений произойдет, если этой энергии хватит для сублимации вещества в канале, а время, за которое она выделяется, будет существенно меньше необходимого для теплопередачи и рассеяния тепла в окружающих областях. В случае режима сквозного пробоя, необходим подбор оптимального сочетания величин напряженности поля и длительности протекания тока, которые должны обеспечивать установку.

Таким образом, для обеспечения эффективности воздействия требуется соз-

дание источников электромагнитных импульсов с коротким (~1 нс) фронтом, длительностью порядка 1–50 нс и напряженностью электрической компоненты поля на уровне 107 В/м [16, 17]. При этом воздействие представляет собой либо видеоимпульс (табл. 2), либо радиоимпульс, т.е. имеет высокочастотное наполнение. Это может дать определенные преимущества благодаря простоте и разнообразию возможностей подвода энергии электромагнитного излучения СВЧ-диапазона к обрабатываемому веществу. Такие источники радиоимпульсов уже разработаны и имеют мощность до 1010 Вт. Оценка плотности мощности (W), необходимой для реализации данного способа воздействия при напряженности электрического поля 107 В/м, дает величину ~100 ГВт/м², что вполне реализуемо с помощью приборов релятивистской сильноточной электроники [20, 21].

Интенсификация процессов вскрытия и извлечения благородных металлов из сульфидных руд и продуктов обогащения в гидрометаллургических процессах за счет предварительного наносекундного импульсного воздействия. Использование мощных электромагнитных импульсных воздействий в технологии обогащения упорных золотосодержащих руд и продуктов обогащения привлекает возможностью обеспечения максимальной полноты вскрытия минеральных комплексов и получения прироста извлечения ценных компонентов (золота на 5–80 %, серебра – на 20–47 %) при уменьшении энергозатрат и снижении себестоимости готовой продукции. В связи с этим в ИПКОН РАН совместно со специалистами ИРЭ РАН, ЦНИГРИ и ООО НПП «ФОН» (г. Рязань) проведены работы, направленные на интенсификацию процессов рудоподготовки и

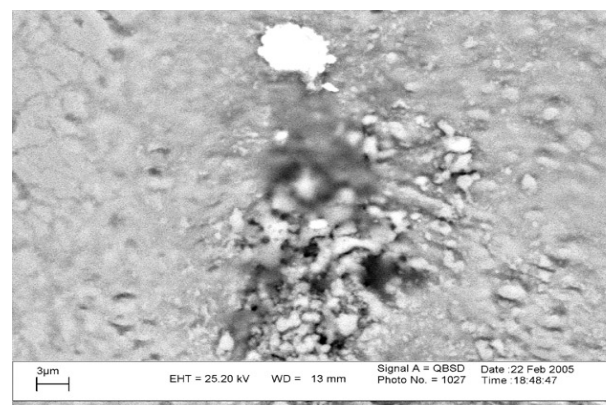
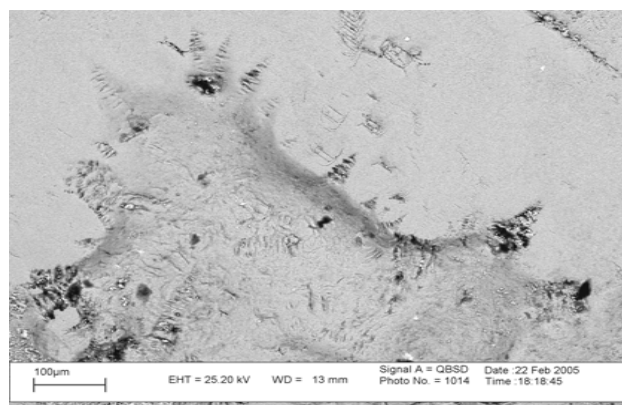


Рис. 3. Развитие трещины поверхности пирита вблизи неоднородностей

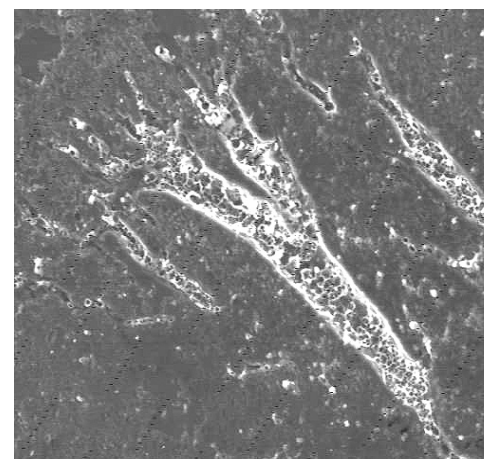
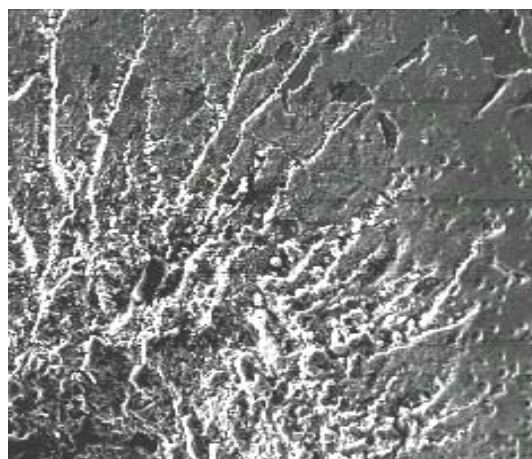


Рис. 4. Самоподобная структура разрядных каналов в арсенипирите, образующаяся в результате воздействия МЭМИ

основных операций первичной переработки золотосодержащего минерального сырья за счет использования нетеплового воздействия мощными электромагнитными импульсами наносекундной длительности. Исследования проводились на широком круге материалов, включающем образцы упорных руд, продуктов обогащения (гравитационных и флотационных концентратов), а также лежалых хвостов обогатительных фабрик.

Общей характерной особенностью выбранных материалов являлось наличие в них тонкодисперсного золота, значительная часть которого в большинстве случаев тесно ассоциирована с сульфидными минералами, главным образом с пиритом и арсенопиритом.

Методика проведения эксперимента включала в себя предварительную обработку минеральных частиц различных классов крупности серией МЭМИ с последующим цианированием для извлечения благородных металлов. Общее число импульсов в каждом эксперименте и параметры воздействия, а именно длительность и форму импульса (однополярные, биполярные импульсы), варьировали в зависимости от условий опыта. Регулировкой расстояния между электродами и их изоляцией устанавливали оптимальную величину амплитуды напряженности электрической компоненты электромагнитного поля (до 10 МВ/м) так, чтобы амплитуда напряженности превосходила электрическую прочность материала.

С целью исследования влияния МЭМИ на технологические показатели упорных золотосодержащих продуктов обогатительных фабрик Уральского региона образцы в виде навесок по 50–100 г в увлажненном состоянии (Т:Ж = 5:1) подвергались воздействию серией мощных наносекундных импульсов с амплитудой электрической компоненты поля до 50 кВ и частотой повторения импульсов 10–200 Гц.

Обработанный таким способом материал подвергали выщелачиванию, т.е. эффективность вскрытия золотосодержащих продуктов определялась по содержанию золота в продуктивных растворах и хвостах цианирования. Условия цианирования золотосодержащих хвостов обогащения по данным ЦНИГРИ следующие: соотношение Ж:Т=2:1, концентрация цианида натрия – 0,07–0,10 %, концентрация извести – 0,02–0,03 %, загрузка смолы – 3–5%, расход нитрата свинца – 0,3 г, продолжительность цианирования – 24 часа.

Эксперименты проводились на образцах золотосодержащих хвостов обогащения (см. табл. 3): Александринской обогатительной фабрики (Au – 2,34 г/т); Гайской ОФ (Au – 2,0 г/т); Узельгинской ОФ (Au – 2,24 г/т); Урупской ОФ (Au – 1,02 г/т); Учалинской ОФ (Au – 2,1 г/т).

Хвосты обогащения Александринской фабрики получены из пробы руды, являющейся результатом шихтовки трех типов руд: цинковая, медно-цинковая и медная руда.

В табл. 3 приведены данные о содержании основных компонентов в изучаемых образцах. Содержание золота в пробе хвостов Гайского ГОКа составляло 2 г/т, при этом 72,5 % золота ассоциировано с сульфидами (1,45 г/т), 10 % – с породой, 2,5 % – с кислоторастворимыми минералами и 15 % золота свободно цианируемо.

Содержание золота в пробе хвостов Урупского ГОКа составляло 0,94–1,02 г/т, большая часть которого – 77,9 % (0,79 г/т) ассоциирована с сульфидами. Остальная часть золота ассоциирована с породой – 5,8 % и с кислоторастворимыми минералами – 4,7 %; 11,6 % золота свободно цианируемо.

Для месторождений Узельгинское и Учалинское обрабатывали образцы, представленные в виде проб цинковых хвостов флотации. Хвосты Учалинской

Таблица 3
Влияние МЭМИ на извлечение золота (%) цианированием из упорных золотосодержащих продуктов обогатительных фабрик Уральского региона*

Месторождение; содержание золота, г/т	Содержание основных минералов (основных компонентов), % (масс.)	Класс крупности, мкм	Прирост извлечения золота (с → до), %
Александринское, 2,34	В руде: 3,0 Cu; 2,5 Zn; 30 S; Ag – 30 г/т	–74	31,2 (52,56 → 83,76)
Гайское, 2	Кварц – 35-40; пирит – 40-45; кальцит – 3-4; группа слюд (серицит, парагонит, мусковит, иллит) – 7-8; полевые шпаты – 5-6 и др.	–315	80 (11 → 91)
Узельгинское, 2,24	0,45 Cu; 1,51 Zn; 35,8 S; Ag – 36,5 г/т	–74 (90-95%)	36,61 (6,25 → 42,86)
Урупское* (Кавказ), 1,02	Кварц – 35-40; пирит – 25-30; кальцит – 5-6; хлориты – 20-28 и др.	–315	71,1 (8,5 → 79,6)
Учалинское, 2,1	0,45 Cu; 1,84 Zn; 42,3 S; Ag – 8,7 г/т	–74 (90-95%)	30,14 (12,86 → 43)

Таблица 4
Влияние воздействия мощных электромагнитных импульсов на извлечение золота (%) цианированием из упорных золотосодержащих руд и продуктов обогащения

Месторождение; содержание золота, г/т	Содержание основных минералов (основных компонентов), % (масс.)	Класс крупности, мкм	Прирост извлечения золота (с → до), %
Исходная руда			
Ключус, 24,2	Сланцы – 43,6; полевые шпаты – 30,8; кварц – 17; лимонит – 3,1; антимонит – 2,6; арсенопирит – 2,3	–1000	12,1 (с 66,7 до 78,8)
Невское, 1,3-1,8	Серицит – 44; кварц – 39; карбонаты, полевые шпаты – 10-12; сульфиды – 5-6; 2,07 S _{общ.} ; 1,72 S _{сульф.} ; 3,8 S _{орг.}	–500	4,4 (91,2 → 95,6)
Олимпиадинское, 2,4	49,2 SiO ₂ ; 7,83 Al ₂ O ₃ ; 5,84 Fe ₂ O ₃ ; 5,84 FeO; 15,67 CaO; 2,53 MgO; 1,99 K ₂ O; 1,54 S _{общ.} Рудные минералы: арсенопирит, пирит, пирротин	–100	8,33 (60,0 → 68,33)

Концентраты			
<i>гравитационные</i>			
Нежданинское, 80 (90,4)	10,55 SiO ₂ ; 36,2 Fe _{общ} ; 22,3 S _{общ} ; 21,7 S _s ; 2,1 C _{орг} ; 18,6 As; 0,1 Sb; 0,05 Cu; 3,5 Pb; 0,7 Zn; Ag 318 (330,7) г/т. Арсенопирит – 38-39; пирит – 21-22 кварц – 8-10; углеродистые образования – 20 и др.	-50	6,4 (77 → 83,4)
		-500	31,08 (51,22 → 82,3)
<i>флотационные</i>			
Ключевское, пиритный, 29	Сульфидные минералы ~70; (пирит-марказит 65; халькопирит, арсенопирит, галенит – суммарно до 5). Глинисто-слюдистые минералы, турмалин, хлориты (суммарно 25), кварц – 6 и др.	-100	46,3 (40 → 86,3)
Кумтор (Киргизстан), пиритный, 45	Пирит – 70-80; арсенопирит (незначительно)	-20	5,7 (82 → 87,7)
		-140	7,9 (63,1 → 71)

Таблица 5
*Влияние энергетических воздействий на технологические показатели гравитационного
концентрата из упорной руды месторождения Нежданинское*

<i>Вид воздействия</i>	Извлечение, %	
	золота	серебра
Материал в исходном состоянии (без воздействия)		
класс – 50 мкм	79,42	44,00
класс – 500 мкм	51,22	21,80
Облучение ускоренными электронами		
класс – 50 мкм	82,43	51,68
класс – 500 мкм	66,81	42,92
Мощные электромагнитные импульсы		
класс – 50 мкм	83,40	73,66
класс – 500 мкм	82,30	68,85

фабрики содержат среди рудных компонентов: пирит, сфалерит, халькопирит, ковеллин, среди нерудных – кварц, полевой шпат, серицит, кальцит и др. Золото в хвостах Узельгинской и Учалинской фабрик ассоциировано с сульфидами – с халькопиритом, сфалеритом, блеклой рудой, ультратонкое золото – с пиритом.

В табл. 3 приведены данные по приросту извлечения золота в процессах цианирования из упорных золото-содержащих продуктов обогатительных фабрик Уральского региона после предварительной обработки мощными наносекундными импульсами.

Максимальный уровень извлечения золота (91 %) был достигнут в случае обработки однополярными импульсами хвостов обогащения Гайской ОФ; прирост извлечения составил 80 % (с 11 % без высокоимпульсной обработки до 91 % после обработки МЭМИ). Также высокий прирост извлечения золота 71,1 % (с 8,5 % до 79,6 %) был получен при обработке короткими однополярными МЭМИ хвостов обогащения Урупской ОФ.

Для хвостов Узельгинской ОФ прирост извлечения золота ~37 % (с 6,25 % – базовый опыт без воздействия до ~43 %) достигался значительно быстрее (при меньшем времени обработки) в случае воздействия биполярными импульсами.

В табл. 4 приведены данные по приросту извлечения золота в процессах цианирования из золотосодержащих руд и концентратов различных месторождений после предварительной обработки МЭМИ.

Проведенные технологические эксперименты подтвердили теоретические выводы о том, что максимальное раскрытие золотосодержащих продуктов при воздействии МЭМИ следует ожидать для сульфидов крупностью не менее 200–100 мкм

[3,22], причем эффект создания каналов пробоя и селективной дезинтеграции возрастает преимущественно при обработке влажных продуктов. Так, после воздействия серией МЭМИ на частицы Нежданинского гравитационного концентрата крупностью –500 мкм получен абсолютный прирост извлечения золота на 31,1 % и серебра на 47,05 % по сравнению с базовым опытом. Приблизительные расчеты показали, что расход электроэнергии при этом составил 2 кВт·ч в расчете на тонну перерабатываемого концентрата и 0,064 кВт·ч на грамм дополнительно извлекаемого золота, в то время как затраты электроэнергии при механическом измельчении руды класса –500 мкм до –50 мкм составляют более 20–25 кВт·ч/т руды (0,9 кВт·ч/г извлекаемого золота).

Сопоставление данных об извлечении золота и серебра цианированием из гравитационного концентрата (табл. 5) после воздействия МЭМИ и пучком ускоренных электронов подтверждает явное преимущество высокоимпульсного воздействия, что особенно наглядно проявляется на крупном классе –500 мкм. При воздействии ускоренных электронов показатели прироста извлечения благородных металлов значительно ниже: по золоту – 15,56 %, по серебру – 21,12 % [9].

Наличие поровой влаги с кислой или щелочной реакцией положительно влияет на эффективность обработки МЭМИ, интенсифицируя процесс раскрытия упорного материала, и в зависимости от вида сырья обеспечивает прирост извлечения благородных металлов от 2 до 40 % при снижении расхода энергии. Так как ни один из этих отдельно взятых факторов воздействия не дает возможности достичь полученных результатов извлечения без участия другого фактора, в данной неравновесной системе реализуется

синергетический эффект кооперативного взаимодействия [19, 23].

В целом можно констатировать, что в результате предварительной обработки МЭМИ с наносекундным фронтом и длительностью получен прирост извлечения золота при цианировании из упорных руд на 4–12 %, из концентратов (гравитационных – на 10–30 %, флотационных – 5–45 %), из хвостов ОФ – на 30–80 %.

Влияние высокоимпульсных воздействий на показатели гравитационного обогащения промпродуктов медно-никелевых руд. Сотрудниками ИПКОН РАН совместно со специалистами ОАО «ФОН» и ОАО ГМК «Норильский никель» была доказана перспективность данной высокоимпульсной технологии при переработке платиносодержащих продуктов обогащения НОФ: песковой фракции отвальных хвостов (содержание МПГ – 1 г/т) и первичного гравитационного концентрата рудного цикла (МПГ ~ 500 г/т). Ситовые характеристики данных продуктов [3] свидетельствуют о том, что данные минеральные продукты вполне пригодны для обогащения их в центробежных концентраторах «Knelson». Их доводка осуществляется по простой схеме: «доизмельчение – сепарация» в концентраторе «Knelson».

Анализ технологических базовых данных по извлечению Pt, Pd и Au свидетельствует о том, что они недостаточно высоки: при переработке хвостов извлечение данных компонентов находится на уровне 15 %, а при переработке гравитационного концентрата – на уровне 84 %. При содержании платиноидов ~500 г/т этот показатель желательно иметь выше. Если полагать, что основные потери платиноидов обусловлены их нахождением в сростках с сульфидами и силикатами, то вполне вероятно, что операция доизмельчения в мельнице, очевидно, недостаточно эффективна.

Оба продукта подвергались обработке МЭМИ в одинаковых условиях при интенсивности импульсного воздействия 200, 600 и 1000 импульсов в режиме непрерывной подачи материала в зону излучения. После импульсной обработки МЭМИ доизмельчались и тестировались на гравитационное дообогащение в концентраторе «Knelson-3» (работы по измельчению и гравитационному обогащению проводились в ГМОИЦ Заполярного филиала ОАО «ГМК «Норильский никель» к.х.н. Ю.В. Благодатиным и инж. В.Д. Чегодаевым).

Для исходных продуктов песковой фракции отвальных хвостов Норильской ОФ время предварительного измельчения в шаровой мельнице перед операцией гравитационного обогащения составляло 0, 40 и 75 мин. Для продуктов, подвергнутых воздействию МЭМИ 1,6 с (всего 200 импульсов), 4,8 с (600), 8 с (1000), время измельчения составило 15, 30, 40 мин соответственно.

В результате гравитационного обогащения в концентраторе «Knelson» в зависимости от режимов предварительной обработки МЭМИ и последующего механического измельчения по песковой фракции отвальных хвостов Норильской ОФ получен прирост извлечения (%) платины, палладия и золота во всех трех опытах (min-max): Pt – 32,37–66,86; Pd – 12,09–52,18; Au – 11,2–74,75. По первичному гравитационному концентрату рудного цикла Норильской ОФ получен прирост извлечения (%) платины, палладия и золота во всех трех опытах (min-max): Pt – 2,63–5,44; Pd – 3,43–5,90; Au – 2,03–4,3. Самый высокий прирост извлечения благородных металлов достигались при минимальном времени воздействия МЭМИ (1,6 с) и времени последующего измельчения (15 мин). В перспективе можно ожидать, что время измельчения может быть снижено.

Важно отметить, что повышение извлечения благородных металлов было обусловлено не увеличением выхода продукта, а за счет более высокого качественного показателя (K – коэффициента концентрирования металла), который определялся соотношением содержания металла в продукте после сепарации и его содержанием в исходном продукте. Качественные показатели доизвлечения благородных металлов из песковой фракции лежалых отвальных хвостов обогащения вкрапленных медно-никелевых руд и качественные показатели доводки первичного медно-никелевого гравиионконцентрата однозначно свидетельствует о том, что показатель K выше во всех экспериментах с использованием МЭМИ. Очевидно, за счет селективной дезинтеграции минеральных комплексов при воздействии МЭМИ повышается качество готовой продукции, что обеспечивает увеличение эффективности центробежной сепарации в классификаторе Нельсона при переработке хвостов обогащения в 2-3 раза, а при переработке промпродукта (первичного гравиионконцентрата рудного цикла) в 1,5-2 раза. Таким образом, процесс высокоимпульсной обработки для условий обогащения вкрапленных руд дает максимальный эффект перед процессами тонкого

измельчения руды и поступлением минерального сырья на флотацию или гравитационное обогащение с использованием аппаратов «Knelson».

Полученные результаты свидетельствуют, что основной эффект прироста извлечения золота и металлов платиновой группы обусловлен максимальным раскрытием минералов по границам срастания, т.е. резким уменьшением количества сростков, как за счет образования множественных незавершенных каналов электрического пробоя, так и за счет разупрочнения вмещающей минеральной матрицы вследствие локального контрастного нагрева. Таким образом, наносекундные импульсные воздействия обеспечивают высокую эффективность и селективность дезинтеграции минеральных комплексов при существенном снижении расхода электроэнергии, что обуславливает перспективность их применения для обработки упорных благороднометалльных руд и продуктов их обогащения в сверхсильных электрических полях с целью вскрытия микро- и наночастиц благородных металлов и повышения их извлечения в процессах обогащения и гидрометаллургии. Новая технология позволит вовлечь в переработку огромные запасы техногенного сырья и забалансовых руд благородных металлов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чантурия В.А. Современные проблемы обогащения минерального сырья в России // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых, 1999, № 3, С.107-121; Обогащение руд, 2000, № 6, С.3-8.
2. Чантурия В.А. Современные проблемы обогащения минерального сырья в России // Горный журнал, 2005, № 12, С.56-64.
3. Чантурия В.А., Трубецкой К.Н., Викторов С.Д., Бунин И.Ж. и др. Наночастицы в процессах разрушения и вскрытия геоматериалов. – М.: ИПКОН РАН, 2006. – 216 с.
4. Вайсберг Л.А., Зарогатский Л.П. Основы оптимальной дезинтеграции минералов // Фи-

зико-технические проблемы разработки полезных ископаемых, 2003, № 1, С.99-106.

5. Селективное разрушение минералов. / В.И. Ревнивцев, Г.В. Гапонов, Л.П. Зарогатский, И.М. Костин, Г.А. Финкельштейн, Э.А. Хопунов, В.П. Яшин – М.: Наука, 1988. – 286 с.

6. Вайсберг Л.А., Зарогатский Л.П., Сафронов А.Н. Вибрационная дезинтеграция как основа энергосберегающих технологий при переработке полезных ископаемых // Обогащение руд, 2001, № 1, С.20-27.

7. Чантурия В.А., Федоров А.А., Бунин И.Ж. и др. Изменение структурного состояния поверхности пирита и арсенопирита при электрохимическом вскрытии упорных золотосодержащих руд // Горный журнал, 2000, № 2, С.24-27.
8. Чантурия В.А., Вигдергауз В.Е. Научные основы и перспективы промышленного использования энергии ускоренных электронов в обогатительных процессах // Горный журнал, 1995, № 7, С.53-57.
9. Чантурия В.А., Иванова Т.А., Лунин В.Д., Нагибин В.Д. Интенсификация процесса вскрытия упорных золотосодержащих продуктов при воздействии потоком ускоренных электронов // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых, 2000, № 4, С.95-106.
10. Хван А.Б., Колесник В.Г., Сатаров Г.С. и др. Исследование возможности применения СВЧ-поля для процессов рудоподготовки при получении золота // Горный вестник Узбекистана, 2000, № 2, С.56-60.
11. Лунин В.Д., Нарсеев А.В., Бараинев Н.И., Ратников Е.В. Модель процесса микроволнового воздействия на упорный золотосодержащий концентрат // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых, 1997, № 4, С.89-94.
12. Күрең В.И., Усов А.Ф., Цукерман В.А. Электроимпульсная дезинтеграция материалов. – Апатиты: Изд. Кольского научного центра РАН, 2002 – 324 с.
13. Котов Ю.А., Месяц Г.А., Филатов А.Л. и др. Комплексная переработка пиритных отходов горно-обогатительных комбинатов наносекундными импульсными воздействиями // Доклады Академии наук, 2000, Том, 372, № 5, С.654-656.
14. Гончаров С.А., Ананьев П.П., Бруев В.П. Разупрочнение железистых кварцитов методом импульсной электромагнитной обработки // Горный журнал, 2004, № 1, С.73-75.
15. Седельникова Г.В., Крылова Г.С., Ананьев П.П. Опыт применения магнитно-импульсной технологии для интенсификации процессов извлечения золота из руд и концентратов // Руды и металлы, 2005, № 1, С.71-73.
16. Чантурия В.А., Гуляев Ю.В. и др. Вскрытие упорных золотосодержащих руд при воздействии мощных электромагнитных импульсов // Доклады Академии наук, 1999, Том, 366, № 5, С.680-683.
17. Чантурия В.А., Бунин И.Ж., Лунин В.Д. и др. Использование мощных электромагнитных импульсов в процессах дезинтеграции и вскрытия упорного золотосодержащего сырья // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых, 2001, № 4, С.95-106.
18. Чантурия В.А., Бунин И.Ж., Лунин В.Д. Нетрадиционные методы дезинтеграции и вскрытия упорных золотосодержащих продуктов: теория и технологические результаты // Горный журнал, № 4, 2005, С.68-74.
19. Chanturiya V.A., Gulyaev Yu.V., Bunin I.J., Lunin V.D., Sedelnikova G.V. Non-traditional Highly Effective Breaking-up Technology for Resistant Gold-Containing Ores and Beneficiation Products // Proceedings: XXII International Mineral Processing Congress, Chief Editors: L.Lorenzen and D.J.Bradshaw, Cape Town, South Africa, 29 September – 3 October 2003. Cape Town: Document Transformation Technologies, 2003, Vol.1, PP.232-241.
20. Месяц Г.А. Импульсная энергетика и электроника. – М.: Наука, 2004. – 704 с.
21. Черепенин В.А. Релятивистские микроволновые генераторы и их возможные применения // Успехи физических наук, 2006, Т. 176, № 10, С.1124-1130.
22. Чантурия В.А., Бунин И.Ж., Ковалев А.Т. Механизмы дезинтеграции минеральных сред при воздействии мощных электромагнитных импульсов // Известия АН. Серия. «Физическая», 2004, Т. 68, № 5, С.629-631.
23. Чантурия В.А., Гуляев Ю.В., Бунин И.Ж. и др. Синергетическое влияние мощных электромагнитных импульсов и поровой влаги на вскрытие золотосодержащего сырья // Доклады Академии наук, 2001, Т. 379, № 3, С.372–376.

ГИАБ

Коротко об авторе

Бунин И.Ж. – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник ИП-КОН РАН.

Доклад рекомендован к опубликованию семинаром № 25 симпозиума «Неделя горняка-2007». Рецензент д-р техн. наук, проф. А.А. Абрамов.