© А.Ф.Усов, В.А. Цукерман, 2007

УДК 622. 026.01

А.Ф.Усов, В.А. Цукерман

НАУЧНО-ИННОВАЦИОННЫЙ ПОТЕНЦИАЛ ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНОГО СПОСОБА ДЕЗИНТЕГРАЦИИ ДЛЯ ПЕРЕРАБОТКИ МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ

Семинар № 25

Российскими учеными предложен и всесторонне исследован электроимпульсный способ разрушения материалов (ЭИ) [1-3]. Заложены основы нового научного направления в электрофизике – физики электровзрыва в конденсированных средах и его технологического применения для разрушения материалов (электроимпульсная технология). Выполненными работами созданы научно-технические основы для создания высокопроизводительных, энергетически и технологически эффективных технических средств и процессов для переработки минерального сырья [4].

Дробление и измельчение руд и минеральных агрегатов ЭИ-способом отличается высокой селективностью разрушения [5]. Оно обеспечивает лучшее раскрытие зерен отдельных минералов и лучшую их сохранность от разрушения, меньшее образование шламистого продукта. Все это создает предпосылки для более полного извлечения полезного минерала в концентрат при обогащении руды, повышения качества концентрата. Отсутствует свойственное механическим способам загрязнение продукта аппаратурным металлом, материалом футеровки и мелющих тел. Возможность способа просто и в широких пределах изменять характер динамического нагружения позволяет регулировать гранулометрический состав продукта измельчения, получать более узкий класс крупности продукта, чем это возможно при механическом измель-чении [6]. Продукту электроимпульс-ного измельчения свойственна мень-шая окатанность и большая удельная поверхность зерен за счет того, что новая поверхность образуется в про-цессе раскола при распространении трещин. Продукт разрушения обладает повышенной сорбцией и реакционной способностью в химических реакциях. Вскрытые частицы минеральных включений лучше соответствуют их исходному природному состоянию в породе и это имеет большое значение для изучения минерального сырья [7].

Принципиальная осуществимость новых технологических процессов и возможность получения исключительно ценных технологических преимуществ, в сравнении с традиционными технологиями, доказана на образцах лабораторного оборудования, которое было испытано в производственных условиях.

В производственных условиях апробированы опытные установки выделения кристаллов драгоценных камней из вмещающих пород (121 экспедиция Мингео, Малышевское рудоуправление МСМ); выделения кристаллов слюды из вмещающих пород («Ковдорслюда»); разделка крупногабаритных (до 600-

1000 мм) слитков синтетической слюды (ВНИИСИМС). В ограниченном промышленном масштабе освоены установки для дезинтеграции геологических проб, демонстрационные установки поставлены в ФРГ, Великобританию, Францию.

Для оценки перспектив практического применения новых технологии важен энергетический аспект проблемы, так как энергоемкость разрушения в значительной степени определяет экономические показатели процессов.

Физическая природа способа за счет взрывного воздействия на породу разрывающими усилиями изнутри дает возможность реализации малоэнергоемкого процесса разрушения. Источником нагружения является канал импульсного разряда, который находится непосредственно в твердом теле и при взрывоподобном расширении формирует в объекте разрушения поле растягивающих напряжений. Динамический характер ЭИ-нагружения обеспечивает хрупкое разрушение материала без потерь энергии на пластическую деформацию. Все это в сопоставимых с традиционными способами по применению условиях обеспечивает достижение наименьших затрат энергии на разрушение, так как прочность материалов на разрыв почти на порядок ниже, чем на сжатие, свойственное условиям разрушения твердых тел механическим способом. В приложении к бурению и резанию все это убедительно иллюстрируется экспериментальными данными [8, 9].

Возможности электроимпульсного способа разрушения для уменьшения энергетических затрат на дезинтеграцию материалов имеются, но они существенно ограничены. Прежде всего, это связано с тем, что различие в характере силового нагружения материала ЭИ-способом и традиционными механическими методами менее выражено, чем в это имеет место при бурении. При механическом дроблении крупного кускового материала раздавливанием и сколом значительная часть новой поверхности вне зоны смятия образуется за счет распространения трещин под действием напряжений разрыва и сдвига и это близко к тому, что реализуется и при разрушении ЭИ-способом. Подпитывать рост трещин энергетически эффективней механическим статическим нагружением и ударными импульсами увеличенной длительности. При ЭИ-разрушении продолжительность силового воздействия на материал ограничена всего несколькими десятками микросекунд. Из-за истечения плазмы канала разряда из твердого тела в жидкость, окружающую разрушаемый фрагмент материала, давление в канале разряда резко снижается, силовое поле «разгружается», дальнейшее выделение энергии в канале разряда становится неэффективным. Задача оптимизация процесса ЭИ-разрушения состоит в том, чтобы обеспечить максимальный разрушающий эффект за время, пока не наступила фаза разгрузки канале разряда. Прежде всего, режим выделения энергии должен учитывать размеры фрагмента материала, которые однозначно определяют необходимую продолжительность фазы распространения трещин. Чем крупнее фрагменты разрушаемого материала, тем больше вероятность достижения более низкой энергоемкости ЭИ-разрушения в сравнении с традиционными способами. Сопоставительные исследования энергоемкости разрушения различных способов на аппаратах лабораторного типа показали, что в области крупного дробления и измельчения вплоть до измельчения до крупности – 2 мм электроимпульсный способ по энергоемкости сопоставим с традиционным механическим способам [10], (таблица).

Удельные затраты энергии при измельчении различными способами (руда Шерловогорского месторождения; исходная крупность - 30 мм, конечная - 2 мм)

№№	Способ измельчения	Установка	Производительность, кг/час	Удельный расход энергии, кВт.ч/т
1.	Электроимпульсный	ЭИ установка	100	13,1
2.	Механический	Лабораторная центробежная мельница	150	11,7
3.	Механический	Лабораторная стержневая мельница	85	12,6
4.	Электрогидравлический	Установка ВостНИГРИ	100	117,2

В области тонкого измельчения энергетическая эффективность электроимпульсного разрушения резко падает. Это происходит по следующим причинам. В разрядном промежутке канал пробоя формируется в последовательной цепочке фрагментов материала, размер каждого из которых меньше величины разрядного промежутка. При пробое такой совокупности частиц имеют место значительные потери энергии в жидкостных прослойках между частицами материала и потери тем выше, чем более измельчен материал. С уменьшением крупности разрушаемых частиц до 1-2 мм вообще становится принципиально невозможным реализовать процесс электрического пробоя внутри частицы. Смена механизма электроимпульсного воздействия (каналом разряда внутри частицы) на электрогидроимпульсный (каналом разряда вне частицы, в жидкой среде) приводит к резкому, почти на порядок, повышению энергоемкости процесса. Процесс электрогидроимпульсного (электрогидравлического) измельчения материалов достаточно хорошо изучен и он не имеет особых перспектив быть альтернативным механическим способам измельчения, кроме отдельных случаев, к числу которых относится и получение ограниченных количеств частиц материала с крупностью в доли микрона.

Однако проблема энергоемкости, возникающая при переходе в область тонкого измельчения, не является тупиковой для использования эффектов электрофизического воздействия на материалы в процессах переработки минерального сырья. В этом отношении имеют хорошие перспективы различные варианты электроразрядного разупрочнения материала. В этих процессах ставится задача не собственно измельчения, а лишь избирательного разупрочнения структуры материала. В ряде случаев технологический эффект реализуется на последующей стадии переработки минерального сырья, например, в гидрометаллургическом процессе извлечения полезных компонентов. В других случаях это является подготовительным процессом для последующего механического доизмельчения материала, эффективность которых высока при способах разупрочнения, когда формы разупрочнения материала различны по принципу образования 11ъ. Первая существует в форме нераскрытой микротрещиноватости в частицах разрушенного материала. При электрическом пробое материала вокруг канала разряда образуется сетка ради-

альных и кольцевых трещин, из которых лишь часть выходит на свободную поверхность и формирует продукт разрушения. В частицах продукта разрушения остаются как нераскрытые трещины, так и внутренняя микротрещиноватость, образующаяся на границам неоднородностей при прохождении волны давления. При электроимпульсном измельчении это свойственно и частицам материала с крупностью менее 2 мм. Именно благодаря этому последующее механическое доизмельчение такого материала отличается повышенной селективностью разрушения. Сочетание электроимпульсного измельчения (до – 2 мм) и последующего механического доизмельчение руды позволяет эффективно вскрывать тонкую микровкрапленность и существенно улучшать показатели флотационного обогащения даже при меньшей степени измельчения, чем это необходимо при традиционной рудоподготовке. Этот принцип положен в основу ряда технологических схем рудоподготовки с использованием электроимпульсной дезинтеграции руд (см. [4]).

Второй формой электроразрядного разупрочнения материала является механическая (механохимическая) активация материала при электрогидроимпульсном (электровзрывном по [12]) воздействии. Возникающие в материале различного рода дефекты изменяют физико-химические свойства материала, в том числе снижают его механическую и электрическую прочность, повышают реакционную способность. Высокая технологическая эффективность электрогидроимпульс-ного разупрочнения нами исследована для целей гидрометаллургии на примере автоклавного выщелачивания сподумена (1971 г., отчет, фонд КНЦ РАН). После комбинированной электроимпульсной и электрогидроимпульсной обработки материала сопоставимые с традиционной технологией результаты по извлечению удавалось достичь за более короткое время (скорость выщелачивания повышалась на 10-15 %) или в такой же мере снизить температуру процесса. В результирующем эффекте заметную роль играет и приуроченность внутренней микротрещиноватости к частицам рудной вкрапленности за счет эффектов динамического нагружения.

В процессе рудоподготовки предварительное разупрочнение материа-ла перед его механическим измельчением позволяет добиться значимого технологического эффекта (избира-тельного разрушения) при существен-ном ограничении энергетического воздействия. Дополнительные энерге-тические затраты на обработку, со-ставляющие не более 10-15 % от всех затрат на измельчение, позволяют добиться существенного повышения эффективности раскрытия зерен минералов, почти в такой же мере, как это имеет место при электроимпульсной дезинтеграции [13].

В третьем варианте разупрочняющим фактором являются каналы незавершенных электрических разрядов. В процессе импульсного электрического пробоя твердых диэлектриков формирование основного канала пробоя сопровождается образованием многочисленных побочных каналов незавершенного пробоя подобно хорошо визуально наблюдаемым при пробое жидкостей и газов. В случае пробоя твердых материалов кристаллическая структура материала несколько упорядочивает и ограничивает пространственную ориентацию каналов разряда, но во всех случаях имеет место объемное воздействие электрического поля на материал с необратимым фактором снижения электрической и механической прочности мате-

риала. Именно следствием этого является хорошо известный факт снижения электрической прочности твердых диэлектриков при многоимпульсном воздействии и старение изоляции. Количественная характеристика снижения многоимпульсной электрической прочности для горных пород дана в [2]. В процессе электроимпульсного разрушения на снижение электрической прочности влияют оба фактора – привносимая в материал микротрещиноватость и незавершенные каналы пробоя. Многоэлектродное исполнение электроимпульсных породоразрушающих устройств усиливает этот эффект. В рудных материалам с многочисленной тонкой вкрапленностью за счет механизма избирательной ориентации каналов пробоя на неоднородности, создающие в материале локальные искажения электрического поля, обеспечивается более распространенное в объеме разупрочнение структуры материала.

Совершенствование техники формирования высоковольтных импуль-сов открывает большие возможности для электроразрядного разупрочнения материалов. Укажем на весьма впечатляющие результаты работ по подготовке к выщелачиванию пиритовых отходов [14] и золотосодержащих концентратов [15] с использованием импульсов напряжения наносекундной длительности.

В случае обработки пиритовых отходов крупностью менее 100 мкм электрическими разрядами в жидкости импульсами напряжения наносекундной длительности электрогидроимпульсное разупрочнение позволяет переводить многие металлы (медь, цинк, железо) в растворимое состояние в воде, повысить показатели гидрометаллургического процесса. Так, извлечение золота в процессе цианирования повышается в несколько раз и достигает уровня 87 %. Существенным прорывом в данных работах явилось использование нового типа генераторов импульсов наносекундного диапазона с обрывом тока полупроводниковыми диодами. При ограниченной энергии в импульсе (единицы и десятые доли джоуля) необходимая производительность обеспечивается высокой частота повторения импульсов (потенциально до 10 кГц, в цитируемой работе - 300 в секунду).

В случае обработки золото-серебросодержащего концентрата электромагнитным облучением СВЧ-диапазо-на импульсами наносекундного диапазона разупрочнение материала каналами незавершенного пробоя обеспечило повышение извлечения золота и серебра на десятки процентов, доведя его до уровня 70-80 % при крупности частиц 50-500 мкм. Очень важно, что режим разупрочнения с использованием многоволновых СВЧ-генераторов может быть реализуем и в воздушной среде.

Комбинированное использование электроимпульсного разрушения, электроразрядного разупрочнения и традиционных механических способов разрушения расширяет варианты технологии переработки минерального сырья, открывает дополнительные возможности для повышения технологических показателей при одновременном снижении энергоемкости процессов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Воробьев А.А., Воробьев Г.А.* Электрический пробой и разрушение твердых диэлектриков. М.: Высшая школа, 1966. - 224 с.

2. *Основы* электроимпульсной дезинтеграции и перспективы ее применения в промышленности / Каляцкий И.И., Курец В.И., Цукер-

ман В.А., Финкельштейн Г.А. // Обогащение руд, 1980, №1, с. 6-11.

3. *Семкин Б.В., Усов А.Ф., Курец В.И.* Основы электроимпульсного разрушения материалов. - Апатиты: КНЦ РАН, 1995, 276 с.

4. *Курец В.И., Усов А.Ф., Цукерман В.А.* Электроимпульсная дезинтеграция материалов. - Апатиты: КНЦ РАН, 2002, 324 с.

5. *Курец В.И., Усов А.Ф., Цукерман В.А.* Селективность электроимпульсной дезинтеграции руд. - Материалы V конгресса обогатителей стран СНГ, 23-25 марта 2005 г., том 3, с. 292-296.

6. *Цукерман В.А., Курец В.И., Усов А.Ф.* Гранулометрия электроимпульсной дезинтеграции материалов.- Материалы V конгресса обогатителей стран СНГ, 23-25 марта 2005 г., том 3, с. 289-292.

7. *A.Usov, V.Tsukerman.* Prospective of electric impulse processes for the study of the structure and processing of mineral raw materials. - In Proceedings of the XXI International Mineral Processing Congress, Rome, Italy, July, 23-27, 2000, pp. C2.8-15.

8. *Усов А.Ф., Цукерман В.А.* Инновационный потенциал энергетически эффективных и экологически щадящих технологий переработки минерального сырья на основе электроимпульсного способа разрушения материалов. – Горный информационно-аналитический бюллетень, №4, 2006. – С 132-138.

9. *Usov, A.F. and Tsukerman, V.A.* Electric pulse processes for processing of mineral raw materials: energy aspect. - XXIII Int. Miner. Process. Congr., Turkey, Istanbul, 3 – 8 September, 2006., pp. 2084-2088.

10. Усов А.Ф., Цукерман В.А. Сравнительный анализ эффективности способов дезинтеграции горных пород и руд. // Горный информационно-аналитический бюллетень. - М.: МГГУ, 2002, №7. – С. 132-136.

11. *Усов.А.Ф., Ракаев А.И.* Электроимпульсное дробление и разупрочнение руд и материалов // Обогащение руд, 1989, №4. – С. 42-43.

12. *Шепелев И.И.* Интенсификация процессов пульподготовки при извлечении цветных металлов с применением электровзрывной активации. Красноярск, 1989, - 206 с.

13 *Ракаев А.И.* Оптимизация рудоподготовки при гравитационном обогащении. – Л.: Наука, 1989. 184 с.

14. *Комплексная* переработка пиритовых отходов горно-обогатительных комбинатов наносекундными импульсными воздействиями / Ю.А. Котов, Г.А. Месяц, А.Л. Филатов и др. // ДАН, 2000, 372, №5, с.654-656).

15. *Вскрытие* упорных золотосодержащих руд при воздействии мощных электромагнитных импульсов / В.А. Чантурия, Ю.В. Гуляев, В.Д. Лунин и др. // ДАН, 1999, 366, №5, с. 680-683. ГИАБ

Коротко об авторах

Усов А.Ф. – начальник научно-организационного отдела Кольского научного центра РАН, кандидат технических наук?

Цукерман В.А. – заведующий отделом промышленной и инновационной политики Института экономических проблем Кольского научного центра РАН, кандидат технических наук.