

УДК 622.026.01

А.Ф. Усов, В.А. Цукерман

**ИННОВАЦИОННЫЙ ПОТЕНЦИАЛ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИ
ЭФФЕКТИВНЫХ И ЭКОЛОГИЧЕСКИ ЩАДЯЩИХ
ТЕХНОЛОГИЙ ПЕРЕРАБОТКИ МИНЕРАЛЬНОГО
СЫРЬЯ НА ОСНОВЕ ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНОГО
СПОСОБА РАЗРУШЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ**

Семинар № 4

Российскими учеными всесторонне исследованы научные и технические основы новых технологий на основе электроимпульсного способа (ЭИ) разрушения материалов [1-3]. Выполненными работами созданы предпосылки для создания эффективных технологических процессов для горного дела, инженерного строительства, переработки минерального сырья, которые предусматривают бурение скважин, проходку щелей в массиве и обработку поверхности блоков камня, дезинтеграцию руд.

ЭИ-способ эффективен для бурения скважин любого сечения и профиля в особо крепких горных породах и мерзлых грунтах. Породоразрушающим устройством является система электродов и распределение разрядов по площади забоя происходит автоматически без вращения устройства. Это позволяет придавать скважине за счет соответствующей конструкции породоразрушающего инструмента любую произвольную форму сечения - круглую, прямоугольную, щелевую, кольцевую и т.д. и профиль забоя - прямой, конический, ступенчатый. Имеется возможность изменения диаметра скважины по мере ее бурения. Электроимпульсное бурение отличается исключительно малым износом бурового инструмента и допускает его изготовление из обычных конструкционных сталей. Рабочим инструментом ЭИ по существу является искра и в отличие от механических

способов не требуется прилагать к инструменту каких-либо значительных усилий - достаточно лишь обеспечивать контакт инструмента с массивом.

Дробление и измельчение руд и минеральных агрегатов ЭИ-способом отличается высокой селективностью разрушения. 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 аппаратным 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 измельчении. Продукту электроимпульсного измельчения свойственна меньшая окатанность и большая удельная поверхность зерен за счет того, что новая поверхность образуется в процессе раскола при распространении трещин. Продукт разрушения обладает повышенной сорбцией и реакционной способностью в химических реакциях. Вскрытые частицы минеральных включе-

ний лучше соответствуют их исходному природному состоянию в породе и это имеет большое значение для изучения минерального сырья [4].

Перспективно применение способа для проходки щелей в массиве и резания каменных блоков. Способ позволяет прорезать в массиве щели по требуемому контуру с изменяющейся по необходимости глубиной, не привносит в материал дополнительной трещиноватости, сохраняет целостность массива и блоков. С использованием электроимпульсного резания можно осуществлять [5]:

- добычу и обработку природного камня и, в первую очередь, уникального декоративного камня (в том числе вырезку заготовок архитектурных форм);
- зачистку скальных оснований под сооружения при строительстве объектов на суше и под водой (гидротехнические сооружения, дноуглубительные работы под газо- и нефтепроводы), в городской черте с ограничениями на проведение взрывных работ;
- отбор проб материала с геологических обнажений, поверхности горных выработок, с бетонных контейнеров захоронения радиоактивных и химических отходов;
- зачистку поверхностей массива и блоков от поверхностного радиоактивного и химического загрязнения;
- проходку отрезных щелей с целью ограничения воздействия на массив взрывной отбойки при сооружении выработок различного назначения.

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. Для оценки перспектив практического применения новой технологии ниже рассматривается энергетический аспект проблемы, так как энергоёмкость разрушения в значительной

степени определяет экономические показатели процессов.

Физическая природа способа за счет взрывного воздействия на породу разрывающимися усилиями изнутри дает возможность реализации малоэнергоёмкого 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.

Формирование поля напряжений в материале при ЭИ-процессе аналогично нагружению с помощью взрывчатых веществ (ВВ) и электроимпульсный способ разрушения («электровзрыв») энергетически так же эффективен, как и взрыв ВВ. При этом области рационального применения каждого из способов не перекрываются. Электровзрыв может осуществлять процессы, недоступные взрывному способу, а именно в технологиях локального разрушения материалов, зона которого ограничена миллиметрами и сантиметрами. К таким процессам относятся бурение скважин, проходка щелей, обработка поверхности массива и блоков камня, дезинтеграция руд. Канал разряда в сравнении с ВВ имеет то преимущество, что его энергосодержание, которое обеспечивается подводом энергии извне от емкостного накопителя, может оперативно, практически от импульса к импульсу, регулироваться в широких пределах по величине и продолжительности действия. Представляется возможным создавать оптимальные условия нагружения твердого тела в зависимости от его природы и разме-

Таблица 1
 Энергоемкость бурения скважин различными способами [1]

Способ бурения	Удельная энергия разрушения, Дж/см ³ (кГм/см ³)
С использованием специальных породоразрушающих инструментов:	
Ударный	200-650 (20,4-66,3)
Вращательный:	
бурение шарошками	700-950 (71,4-96,8)
алмазное бурение	600-800 (61,2- 81,5)
Ударно-вращательный	400-600 (40,8-61,2)
Вращательно-ударный	600-800 (61,2-81,5)
Без использования специальных породоразрушающих инструментов:	
Взрывной	200-400 (20,4-40,8)
Гидравлический	1000-2000 (102-204)
Гидроимпульсный	70-100 (7,1-10,2)
Электрогидравлический	400-500 (40,8-51)
Электротермический	5000 (510)
Электроимпульсный	100-200 (10,2-20,4)
Лазерный	5000-12000 (510-224)
Комбинированное бурение	
Огневой	1500 (153)
Плазменный	5000 (510)
Термошарошечный	1200-1600 (122-163)
Электротермомеханический	500-800 (51-82)

ра разрушаемых фрагментов материала. Энергетическая эффективность ЭИ-разрушения мало критична к механической прочности пород, благодаря чему наибольший технико-экономический эффект его применения достигается на особо крепких горных породах.

По энергетической эффективности ЭИ-способ применительно к процессам, реализующих разрушение горных пород с одной свободной поверхности (бурение, резание, сьем поверхностного слоя), заметно предпочтительнее большинства других способов (табл. 1).

В разных технологических процессах представляется возможным реализовать значительный потенциал повышения эффективности пробоя и оптимизации энерговыделения в канале разряда. В числе этих мер наиболее эффективными являются увеличение разрядных промежутков (энергоемкость разрушения обратно про-

порциональна величине разрядного промежутка в степени 1,5-2 [1]) и использование специальных схем формирования импульсов, способных повысить к.п.д. передачи энергии в канал разряда не менее чем вдвое [3].

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 раз-

Таблица 2

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

№ пп	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.	Электро-гидравлический	Установка ВостНИГРИ	100	117,2

рушении 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 способом [6], (табл. 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 никаких перспектив быть альтернативным механическим способам измельчения, кроме отдельных случаев, к числу которых относится получение ограниченных количеств частиц материала с крупностью в доли микрона.

Однако проблема энергоемкости не является тупиковой для использования эффектов электрофизического воздействия

на материалы в процессах переработки минерального сырья. В этом отношении имеют перспективу различные варианты электроразрядного разупрочнения материала. В этих процессах ставится задача избирательного разупрочнения структуры материала. В ряде случаев это является конечной целью и 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 которого резко улучшается.

Можно выделить три способа разупрочнения, формы разупрочнения материала, которые различны по принципу образования [7]. Первая существует в форме нераскрытой микротрещиноватости в частях разрушенного материала. При электрическом пробое материала вокруг канала разряда образуется сетка радиальных и кольцевых трещин, из которых лишь часть выходит на свободную поверхность и формирует продукт разрушения. В частях продукта разрушения остаются как нераскрытые трещины, так и внутренняя микротрещиноватость, образующаяся на границах неоднородностей при прохождении волны давления. Это свойственно и частицам материала с крупностью менее 2 мм и именно благодаря этому последующее механическое доизмельчение такого материала отличается повышенной селективностью разрушения. Комбинированное электроимпульсное измельчение (до – 2 мм) и последующее механическое доизмельчение материала позволяет эффективно вскрывать тонкую микровкрапленность и существенно улучшать показатели флотационного обогащения даже при меньшей степени измельчения материала, чем это необходимо при традиционной рудоподготовке. Этот принцип положен в основу ряда технологических схем рудоподготовки с использованием электроимпульсной дезинтеграции руд [2].

Второй формой электроразрядного разупрочнения материала является механическая (механохимическая) активация материала при электрогидроимпульсном (электровзрывном по [8]) воздействии. Возникающие в материале различного рода дефекты изменяют физико-химические свойства материала, в том числе снижают его механическую и электрическую прочность, повышают реакционную способность. Нами высокая технологическая эффективность подтверждена для целей гидрометаллургии на примере автоклавного выщелачивания сподумена (1971 г.). После комбинированной электроимпульсной и электрогидроимпульсной обработки материала сопоставимые с традиционной технологией результаты по извлечению можно 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 материала перед его механическим измельчением позволяет добиться значимого технологического эффекта (избирательного разрушения) при существенном ограничении энергетического воздействия. Дополнительные энергетические затраты на обработку, составляющие 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 [9].

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 хо-

рошо 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 материала. 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 [1]. 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 материалах 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 разрушение структуры материала.

Совершенствование техники формирования высоковольтных импульсов открывает большие возможности для электроразрядного разрушения материалов. Укажем на весьма впечатляющие результаты работ по подготовке к выщелачиванию пиритовых отходов [10] и золотосодержащих концентратов [11] с использованием импульсов напряжения наносекундной длительности.

В случае обработки пиритовых отходов крупностью менее 100 мкм электриче-

скими разрядами в жидкости импульсами напряжения наносекундной длительности электрогидроимпульсное разрушение 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 частотой повторения импульсов (потенциально до 10 кГц, в цитируемой работе – 300 в секунду).

В случае обработки золото-серебросодержащего концентрата электромагнитным облучением СВЧ-диапазона импульсами наносекундного диапазона разрушение 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 разрушения с использованием многоволновых СВЧ-генераторов может быть реализован и в воздушной среде.

Комбинированное использование электроимпульсного разрушения, электроразрядного разрушения 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. Семкин Б.В., Усов А.Ф., Курец В.И. Основы электроимпульсного разрушения материалов. - Апатиты: КНЦ РАН, 1995 г., 276 с.
2. Курец В.И., Усов А.Ф., Цукерман В.А. Электроимпульсная дезинтеграция материалов. - Апатиты: КНЦ РАН, 2002, 324 с.
3. Усов А.Ф., Семкин Б.В., Зиновьев Н.Т. Переходные процессы в установках электроимпульсной технологии» - Л.: Наука, 1987г., 179с.; 2-е издание: 2000 г., 160 с.)
4. Usov A., Tsukerman V. 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.
5. Усов А.Ф., Щеголев И.А., Адам В.М. Перспективные процессы для камнедобычи и камнепереработки на основе электроимпульсного способа разрушения материалов– В кн. Добыча, обработка и применение природного камня. – Магнитогорск: МГТУ, 2002. с. 129 -149
6. Усов А.Ф., Цукерман В.А. Сравнительный анализ эффективности способов дезинтеграции горных пород и руд. // Горный информационно-аналитический бюллетень. - М.: МГТУ, 2002, №7, с. 132-136
7. Усов А.Ф., Ракаев А.И. Электроимпульсное дробление и разупрочнение руд и материалов // Обогащение руд, 1989, №4, с. 42-43;
8. Шепелев И.И. Интенсификация процессов пульпоподготовки при извлечении цветных металлов с применением электровзрывной активации. Красноярск, 1989, - 206 с.
9. Ракаев А.И. Оптимизация рудоподготовки при гравитационном обогащении. Л.: Наука, 1989. 184 с.
10. 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).
11. 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.

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.

