

ПОКАЗАТЕЛИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ: ФАКТОРЫ ВЛИЯНИЯ

Е. Ванг, Ф. Ши, Е. Мэнлапиг,

Центр исследования минералов им. Джулиуса Краттшнитта (Австралия)

f.shi@uq.edu.au

Методы электрического выделения минералов из руды открывают перед добывающими отраслями широкие перспективы. Однако эти методы достаточно энергозатратны, что ограничивает их распространение. Какие факторы влияют на показатели электрического измельчения? Авторы исследовали этот вопрос как экспериментально, так и с помощью численного моделирования. Результаты показали, что индуцированное электрическое поле сильно зависит от электрических свойств минералов, размера зерна, расположения проводящих минералов в породе, а также от формы и ориентации частицы. Исследования в этом направлении перспективны для создания эффективного энергосберегающего промышленного оборудования для добывающих отраслей.

В перерабатывающей минеральной сырье отрасли процессы измельчения требуют больших затрат энергии. Применение высоковольтных импульсов для повышения дробимости руд и выделения целевых минералов в перспективе может привести к скачкообразному улучшению эффективности измельчения. Высоковольтные импульсы способны использовать как электрические, так и механические свойства руды для снижения ее прочности и облегчения выделения минералов. Известно, что выделение минералов импульсами высокого напряжения достаточно эффективно [1-7]. В процессе импульсного выделения керны пород размером 30 мм фрагментировались до микронного размера при потреблении удельной поглощенной энергии более 90 кВт·ч/т [5]. При обработке руды того же начального размера в шаровой мельнице типичное потребление энер-

гии в обычном цикле измельчения составляет примерно 20 кВт·ч/т. Несмотря на лучшее выделение электрическим измельчением, потребление более 90 кВт·ч/т – энергозатратно для отрасли переработки минерального сырья.

Последние четыре года JKMRС (Центр исследования минералов им. Джулиуса Краттшнитта) проводил обширные исследования электрического измельчения в поисках энергосберегающего способа для переработки минералов. Исследовались две основные области применения импульсов высокого напряжения: предварительное ослабление частиц и выделение минералов. Оба направления фокусировались на повышении энергосбережения. В процессе работы обнаружен ряд особенностей и закономерностей. Например, в частицах руды, обработанных импульсами высокого напряжения с низкой удельной

поглощенной энергией (2 кВт·ч/т), развиваются трещины и микротрещины, частицы становятся слабее, чем необработанные. Сравнение индексов работы измельчения по Бонду показывает, что обработанный материал может привести к сокращению потребления энергии в последующем процессе размалывания на 24% [8]. При использовании одной и той же удельной энергии целевые минералы при электрическом измельчении выделяются лучше, чем при измельчении обычным способом. Следовательно, при электрическом измельчении существует возможность использования меньшей энергии для получения той же степени выделения минерала. Распределение фракций выделенных минералов показывает, что в электрически измельченном продукте больший процент приходится на размерные фракции грубее 53 мкм, тогда как в механически измельченном продукте выделенные минералы накапливаются в мелких и очень мелких размерных фракциях. Таким образом, есть потенциальное преимущество в получении грубых выделенных минералов из электрически измельченного продукта перед его дальнейшим размалыванием [9].

Обнаружено, что эффективность предварительного ослабления и выделения минералов при электрическом измельчении изменчива и зависит от руды. Используя три модели, в которых рассчитывалось распределение электрических полей в водной системе твердых частиц, Andres с соавторами [10] показали концентрирование полей на границе соединения твердых частиц и жидкости в разных минеральных компонентах рудных агрегатов. Эти результаты подтверждают идею о том, что эффективность импульсов высокого напряжения зависит от руды. Тем не менее, подробных исследований влияния эксплуатационных характеристик и свойств руды на показатели электрического измельчения не проводилось.

Для изучения факторов, влияющих на показатели электрического измельчения, авторами выполнена экспериментальная программа.

Факторы влияния (ФВ) разделили на две группы: характеристики руды и эксплуатационные характеристики оборудования. Влияние характеристик оборудования можно проверить в эксперименте, однако некоторые факторы влияния руды трудно поддаются экспериментальной проверке. Для подтверждения идентификации основных факторов, влияющих на показатели электрического измельчения, и для выяснения

причин выявленных закономерностей экспериментальных результатов выполнено численное моделирование распределения электрического поля в рудах с разными характеристиками. Для моделирования использовали программу COULOMB 3D. Цель работы – изучение закономерностей процессов для улучшения результатов электрического измельчения за счет свойств руды и для разработки энергоэффективного механизма размалывания.

МЕТОДЫ

Исследование факторов, влияющих на показатели электрического измельчения, выполняли двумя основными способами – экспериментальным и численным исследованием. В задачу экспериментального исследования входило определение факторов, которые могут влиять на электрическое измельчение по показателю ослабления частиц и выделения минералов. Численное исследование использовали для разъяснения закономерностей, полученных в эксперименте или в качестве инструмента исследования, когда экспериментальная проверка была невозможна.

Электрическое измельчение проводили на оборудовании selFrag Lab, установленном на пред-

приятии selFrag AG, находящемся в Швейцарии. Для дробления и выделения минералов в оборудовании используются импульсы высокого напряжения. Установка selFrag Lab предназначена для обработки образцов в килограммовых количествах с максимальным размером частиц до 45 мм. Подробные сведения об оборудовании даны в [8]. Для исследования отобрали шесть образцов руды общей массой 400 кг. Из шести образцов руды пять были из Австралии: три типа медно-золотой руды (руды А, С и D), один тип свинцово-цинковой руды (руда В), один тип золотой руды (руда Е), шестым образцом была платиновая руда из Южной Африки (руда F). Подробные сведения об образцах руды и их минеральном составе можно найти в [8, 9]. На стадии выделения руды в качестве индикаторов выделения использовали следующие минералы: халькопирит как медьсодержащий минерал, пирит как золотосодержащий минерал, магнитный колчедан и пентландит как минералы, содержащие платиновую группу металлов. Изученные в этом исследовании факторы, влияющие на показатели электромагнитного измельчения, можно разделить на две категории: характеристики руды и характеристики оборудования или технологии. Факторы, связанные со свойствами руды включают начальную крупность, размер зерна, форму частицы, строение руды и минеральный состав. Влияние начальной крупности на предварительное ослабление и выделение минерала определяли в эксперименте, а остальные факторы исследовали посредством численного моделирования. Технологические факторы включают размер ячеек сита, последовательное разрушение и приложенную энергию. Все они изучались экспериментально.

Ослабление материала, полученного в результате механического разрушения и измельчения в selFrag, проверяли при помощи испытательного устройства JKRBT (роторный тестер дробления), в котором для описания разрушения частиц используется кинетическая энергия [11]. Данные JKRBT обрабатывали с помощью модели разрушения [12], количественную оценку проводили с помощью индикатора мягкости $A \times b$: чем больше значение $A \times b$, тем мягче частица.

В то же время выделение определялось с помощью анализатора выделения минералов (MLA), принцип действия которого основан на регистрации обратно-рассеянных электронов (XBSE) для получения изображений, которые обрабатываются в несколько этапов для количественного

минералогического анализа. Общее содержание минералов и процентная масса освобожденного минерала в классах освобождения $>95\%$ определялись посредством MLA. Общее содержание минералов и освобожденный на $>95\%$ минерал одного размера использовались как индикаторы для сравнения.

Численное моделирование распределений электрического поля в разных условиях использовалось для подтверждения и разъяснения экспериментально выявленных закономерностей или для исследования влияния некоторых факторов, которые было трудно проверить экспериментально при электрическом измельчении.

Разработанную компанией Integrated Engineering Software программу COULOMB 3D использовали для численного моделирования. Она основана на методе граничных элементов (МГЭ) и обеспечивает быстрые и точные расчеты напряженности электрического поля, как индикатора предварительного ослабления и преимущественного освобождения минералов. В этом способе электромагнитные явления математически описываются уравнениями Максвелла в интегральной форме. Применение граничных условий вдоль линий соединения материалов позволяет получить систему граничных интегральных уравнений с эквивалентными источниками переменного поля по границам соединения в качестве неизвестных. МГЭ использует только двумерные элементы на поверхностях, которые являются границами соединения материалов или заданы граничные условия. Пользователи могут поставить задачу легко и быстро. Поскольку в ход решения вовлечены только элементы на поверхностях соединения, изменение задачи также не составляет труда. Поэтому для решения задачи нужен компьютер меньшей мощности, чем при методе конечных элементов, где создаваемая матрица сложнее. МГЭ также позволяет очень точно получить все переменные в любой точке пространства. Кроме этого, результаты оказываются точнее из-за плавности интегрирования [13].

Постановку, моделирование и решение задачи можно разделить на несколько этапов.

Геометрическое построение. Моделью служила цилиндрическая область со свойствами воды, установленная таким образом, чтобы обеспечить возможность изменения свойств минерала внутри системы. Между вершиной и основанием цилиндра надо создать разность потенциалов,

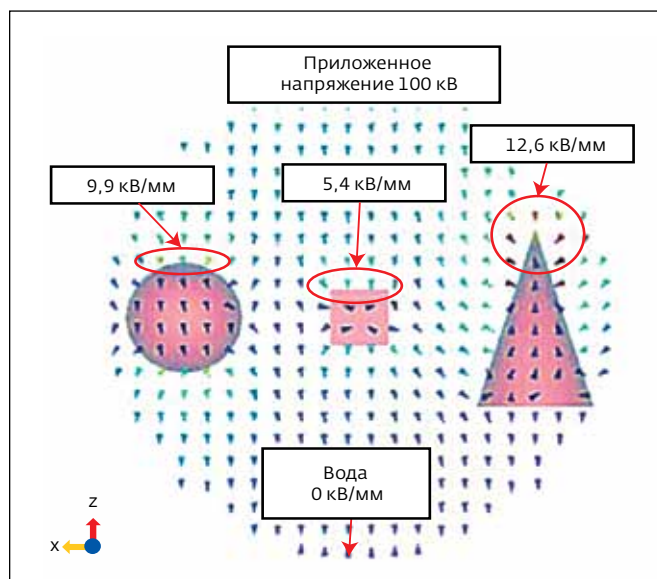


Рис.1. Схема модели и распределение электрического поля трех частиц халькопирита разной формы (сфера, куб и конус), погруженных в воду при разности потенциалов 100 кВ

чтобы внутри цилиндра возникло электрическое поле. Обычно целевые минералы выбираются в виде сферы или другой геометрической фигуры, внедренных внутрь кубической или сферической жильной породы. Такая настройка геометрии имитирует систему, в которой частица с малым содержанием целевых минералов погружена в основной жильный минерал, который погружен в воду и подвергается воздействию импульсов высокого напряжения (рис.1).

Присвоение физических свойств. В качестве параметров, характеризующих электрические свойства

Таблица 1. Электрические свойства минералов, использованных в численном моделировании

Минералы	Электропроводность, σ , См	Диэлектрическая проницаемость, ϵ
Халькопирит	75 [14]	>81 [14]
Пирит	0,9 [15]	33,7–81 [14]
Магнитный колчедан	1,0 [14]	>81 [14]
Пентландит	0,5 [16]	57 [16]
Силикаты	$1,0 \cdot 10^{-14}$ [14]	6 [14]
Калишпат	$1,0 \cdot 10^{-11}$ [14]	5 [14]
Вода	0,05 [15]	80 [15]

минералов, выбраны электропроводность и диэлектрическая проницаемость. Данные по этим параметрам собирались в литературе, они приведены в табл.1.

Решение для модели. В настройках программы решения (SolverSetup) пользователь выбирает "граничный элемент" (BoundaryElement) для способа решения (Methodofsolution), "автоматически" (Auto) – для решения матричного типа (MatrixSolverType) и устанавливает позиции "итерационная точность" (IterativeAccuracy) и "самоадаптирующая точность" (Self-adaptiveAccuracy).

Контроль ошибок. Программа COULOMB задает данные в рамках принятой модели и решает ее. Затем проверяет вычисленные значения с учетом граничных условий. Если средняя погрешность превосходит контрольное значение, программа удалит элементы с максимальной погрешностью и повторит решение. Процесс повторяется до тех пор, когда средняя погрешность станет меньше контрольного значения.

Анализ и проверка качества решения. Результаты моделирования показаны на плоскости XZ (см. рис.1), при этом стрелки представляют величину и направление напряженности электрического поля таким образом, что: линии напряженности (стрелки) всегда направлены от высокого потенциала к низкому; количественно напряженность электрического поля представлена на цветной шкале от красного (высокая) до синего (низкая) цвета; расстояние между стрелками представляет концентрацию зарядов – чем меньше расстояние, тем больше концентрация зарядов. Известно, что в местах разлома или на пути разветвлений возникает поле высокой напряженности. Поэтому напряженность моделированного электрического поля используется как индикатор избирательного разлома: высокое значение указывает на облегчение разлома и предполагает лучшее освобождение целевого минерала.

ФАКТОРЫ РУДЫ

Влияние начальной крупности и размера зерна. Для исследования предварительного ослабления две однородные фракции медной руды (руда А) с начальной крупностью (НК) 37,5–45 мм и 16–19 мм обрабатывались в установке selFrag при одинаковой удельной энергии примерно 2 кВт·ч/т. После обработки два полученных образца исследовались в тестере JKRBT, каждый подвергался энергетическому воздействию трех уровней для определе-

Таблица 2. Влияние НК образца медной руды (руда А) на предварительное ослабление при электрическом измельчении удельной энергией 2 кВт·ч/т

Размер после обработки, мм	Измеренное А×в			% ослабления, ε	
	Механическое	НК 37,5–45 мм	НК 16–19 мм	НК 37,5–45 мм	НК 16–19 мм
16–19	22,5	44,5	41,8	98	86
9,5–12,5	19,5	40,0	35,8	105	83
Средний	–	–	–	101	85

ния индикатора мягкости А×в (табл.2). Величина "% ослабления" (см. табл.2) рассчитывается как процент разницы значений А×в между обработанными и необработанными образцами, разделенная на значение А×в необработанного образца того же размера после измельчения. Данные показывают, что перед обработкой в selFrag медная руда очень твердая, значение А×в составляет 22,5 и 19,5 для фракций 16–19 мм и 9,5–12,5 мм, соответственно. Руда двух начальных размеров стала мягче после обработки в selFrag при удельной энергии 2 кВт·ч/т. Результаты показывают, что в среднем по двум полученным после обработки фракциям при большей начальной крупности (37,5–45 мм) получено относительное снижение твердости руды на 101% по сравнению с 85% при меньшей НК (16–19 мм). Очевидно, что материал с большей НК лучше поддается предварительному размягчению при обработке импульсами высокого напряжения.

Для исследования влияния начальной крупности на выделение в selFrag испытывались две однородные фракции (9,5–12,5 мм и 2,36–3,35 мм) другой медной руды (руда D) при удельной энергии 2,5 кВт·ч/т.

Фракцию продукта размером 0,106–0,15 мм анализировали посредством MLA (анализатор

Таблица 3. Влияние НК образца медной руды (руда D), обработанной в selFrag при удельной энергии 2,5 кВт·ч/т, на выделение электрическим измельчением при размере фракции продукта 0,106–0,15 мм

	НК 9,5–12,5 мм	НК 2,36–3,35 мм
Содержание халькопирита, %	6,53	2,95
Класс выделения >95%, %	69,1	68,2
Массовый % >95% выделенного халькопирита	4,5	2,0

выделения минерала). Выбор этого размера определялся тем, что он составляет почти 75% от размера зерна халькопирита. Результаты выделения халькопирита приведены в табл.3. Содержание халькопирита указывает на его количество, накопившееся во фракции 0,106–0,15 мм, представлен ли он выделенным халькопиритом или двухкомпонентным или трехкомпонентным композитом. Класс выделения >95% указывает общий процент халькопирита в классах выделения 95–100%. Массовый процент >95% выделенного халькопирита рассчитан как произведение содержания халькопирита и его процента в классе выделения >95%. Считается, что частица с выделенным более чем на 95% минералом легко извлекается в последующем процессе, например, флотацией. Поэтому в настоящем исследовании общий массовый процент минерала в классе выделения >95% использовался для обозначения выделения минерала. Из табл.3 видно, что лучший результат выделения достигается при использовании selFrag для обработки материала большей начальной крупности: 4,5% от халькопирита с выделением >95% получено из материала с начальной крупностью 9,5–12,5 мм и только 2,0% – из материала с начальной крупностью 2,36–3,35 мм при одинаковой обработке обеих фракций низкой удельной энергией (2,5 кВт·ч/т). Экспериментальные данные показывают, что в процессе электрического измельчения материал с большей начальной крупностью дает лучшее предварительное ослабление и лучшие результаты выделения минерала.

Для исследования влияния размера зерна, которое невозможно в эксперименте, проводилось численное моделирование распределения электрического поля в сферических частицах халькопирита двух разных радиусов (10 единиц и 80 единиц). Сферические частицы использовали в модели для исключения влияния острых кромок на распределение электрического поля.

Сферические частицы халькопирита погружали в сферы из калишпата, а на плоскости вдоль оси Z прикладывали разность потенциалов 100 кВ. Для имитации реакции частиц халькопирита в численном моделировании использовали электрические свойства халькопирита. Результат предполагает повышенную напряженность электрического поля при большем диаметре сферы халькопирита: 4,2 кВ/мм для халькопирита радиусом 80 единиц по сравнению с 1,5 кВ/мм для радиуса 10 единиц. Из этого следует, что минералы с большим диаметром зерна индуцируют повышенную напряженность электрического поля в больших областях, обеспечивая повышенное разветвление линий ослабления основной породы. Кроме этого, максимальное электрическое поле возникает на полюсах внутренних сфер халькопирита, граничащего с калишпатом. Такое распределение поля обеспечивает высокую вероятность электрического разрушения по границам большей внутренней сферы (80 единиц).

Влияние формы и ориентации частицы. Влияние формы и ориентации частиц на электрическое измельчение исследовалось численным моделированием. На рис.1 показана схема модели и распределение электрического поля в халькопирите для трех разных форм в воде под напряжением 100 кВ. Модель предполагает возникновение максимальной напряженности электрического поля (12,6 кВ/мм) на самой крутой поверхности конуса, а минимальную напряженность электрического поля (5,4 кВ/мм) – на плоской поверхности куба. Очевидно, напряженность электрического поля более чем вдвое различается в зависимости от формы и ориентации частицы.

Результаты моделирования согласуются с фундаментальной теорией электромагнетизма. Ченг предположил, что электрические разряды имеют тенденцию к концентрированию в остроконечных точках. По теории электромагнетизма напряженность электрического поля в непосредственной близости к остроконечным точкам значительно выше, чем в точках на относительно плоской поверхности с малой кривизной. Если частица с высокой проводимостью имеет остроконечную поверхность, направленную вдоль поля, электроны на остроконечной вершине испытывают "давление" со стороны всех других электронов остальной части объекта, что приводит к концентрированию разрядов в этой точке. Поскольку напряженность электрического поля нарастает, происходит массовая ионизация с возникнове-

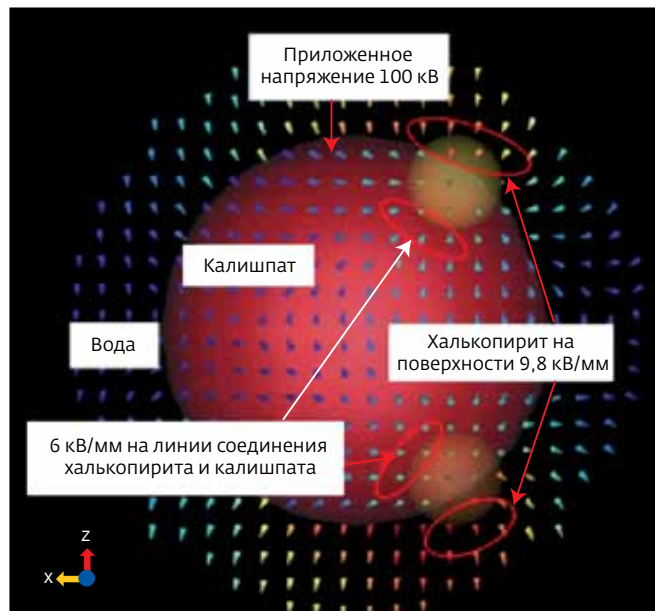


Рис.2. Распределение электрического поля халькопиритовых сфер, заключенных в поверхность калишпата при разности электрических потенциалов 100 кВ

нием искрового разряда, вызывающего разрушение.

Моделирование дает основание предположить, что при электрическом измельчении частицы с острыми краями и угловатой формой могут сильнее реагировать на импульсы высокого напряжения, чем частицы, получаемые размолотом, например, щебень из истирающих и полуистирающих мельниц. Это происходит благодаря тому, что острые кромки вызывают высокую напряженность электрического поля (в обоих случаях подразумевается один и тот же минерал), что приводит к лучшим результатам фрагментации и выделения. Однако это предположение нуждается в экспериментальном подтверждении.

Влияние места нахождения проводящих минералов. После обработки образца свинцовоцинковой руды (руда В) в selFrag оказалось, что поверхность частиц покрыта галенитом. Первоначально предполагалось, что этот тип частиц будет хорошо реагировать на обработку импульсами высокого напряжения. Однако оказалось, что частицы руды В подверглись лишь незначительному ослаблению.

Для исследования влияния местоположения высокопроводящих минералов в частице выполнено численное моделирование. На рис.2 показано распределение электрического поля в двух халькопиритовых сферах на поверхности частицы калиш-

Таблица 4. Проводимость минерала, моделированная напряженность электрического поля и измеренное в % изменение размера частиц минерала при электрическом измельчении

Источник руды	Руда D				Руда E	Руда F	
	Хальк.	Пирит	Борн.	Силик.		Пир.	Пентл.
Проводимость, См	75	0,9	0,8	10^{-14}	0,9	1,0	0,5
Напряженность, кВ/мм	6,5	5,4	5,7	2,5	5,4	5,4	5,4
Изменение размеров, %	+91	+213	+38	-2	+50	+109	+121

пата. Приложенная разность потенциалов – 100 кВ. Результат показывает, что халькопирит, появляющийся над поверхностью частицы калишпата, создает электрическое поле большей напряженности (9,8 кВ/мм), чем в местах соединения халькопирита и калишпата (6 кВ/мм). Обратите внимание, что частицы разного размера использовались для моделирования в разных сечениях и моделированная напряженность электрического поля по сечениям несравнима.

Кроме образца из руды В, такое поведение наблюдалось также в образце медно-золотой руды (руда С), которой свойственно высокое распределение пирита на поверхности частицы. Эти расположенные на поверхности частицы минерала с высокой проводимостью вызвали возникновение высокой напряженности электрического поля на поверхности. Максимальное электрическое поле, возникающее на поверхности частицы, может заставить ответвления разряда распространяться по поверхности образца, откалывая и срезая проводящие минералы (в частности, галенит или пирит). Такой тип распространения ветвей разряда по поверхности частицы предотвращает разрушающее воздействие электрического взрыва внутри частицы.

Влияние минерального состава. Минеральный состав влияет на показатели электрического измельчения по выделению ценного минерала. Эксперименты проводили на трех образцах руды: медно-золотая (руда D), золотая (руда E) и платиновая (руда F). Образцы обрабатывали в selfFrag и в вальцовой мельнице при одинаковом уровне удельной энергии, а полученные из них частицы анализировали посредством анализатора выделения минерала. Минерал с размером частиц до 0,3 мм определяли в продуктах как механического, так и электрического измельчения, рассчитывали процентное изменение размеров после электрического измельчения по отношению к

размерам минерала механического измельчения (табл.4). Для руды D в качестве медьсодержащих минералов выбраны халькопирит (Хальк.) и борнит (Борн.), пирит выбран в качестве золотосодержащего минерала, а силикаты (Силик.) – в качестве жильных минералов. Для руды E в качестве золотосодержащего минерала выбран пирит. Для руды F в качестве минералов, содержащих металлы платиновой группы выбраны пиротин (Пир.) и пентландит (Пентл.).

Результаты, приведенные в табл.4, показывают, что металлоносные минералы в трех образцах руды обогащены при получении продуктов электрическим измельчением, при относительном изменении размера частиц с 38% до более чем 200%. При сравнении силикатные минералы не обнаруживают заметного различия между продуктами, полученными при их механическом и электрическом измельчении.

Для этих заключенных в калишпат минералов численное моделирование выполнялось для случая погружения в воду с приложением одинакового электрического потенциала 100 кВ. Проводимость частиц использовали для представления этих минералов в моделировании. Моделированные напряженности электрического поля (кВ/мм) введены в табл.4. Очевидно, ценные минералы создавали напряженность электрического поля выше 5,4 кВ/мм, тогда как силикатные минералы показали напряженность лишь 2,5 кВ/мм.

Общая тенденция, наблюдаемая при моделировании, – высокая напряженность электрического поля вокруг границ минералов с высокой проводимостью/диэлектрической проницаемостью. Это предполагает, что чем больше разница между электрическими свойствами двух фаз минерала, тем выше индуцированное электрическое поле на линии их соединения. Поэтому преимущественное разрушение по границам зерна минерала с высокой напряженностью электриче-

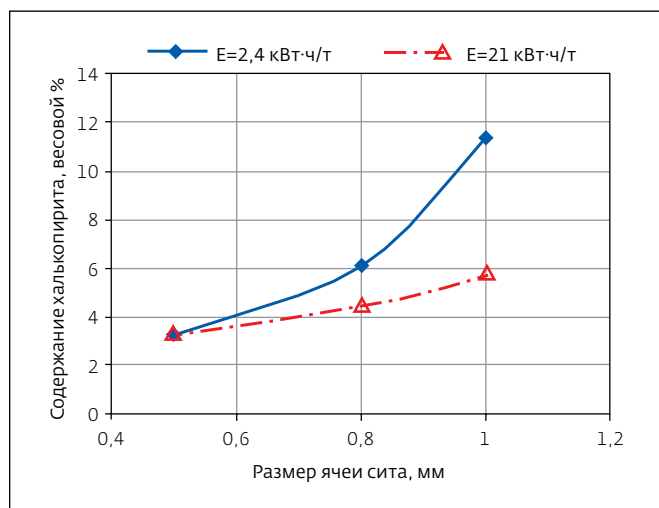


Рис. 3. Содержание халькопирита (руда D) в продуктах обработки в selFrag размером 53–75 мкм при размере ячеек нижнего сита 1,0; 0,8 и 0,5 мм, соответственно

ского поля – это одна из главных причин избирательного фрагментирования, как наблюдалось в экспериментах.

Стоит упомянуть, что состав минерала – не единственный фактор, влияющий на показатели электрического измельчения. Другие описанные в этой статье факторы также влияют на показатели измельчения. Поэтому процентное изменение размеров минералов, приведенное в табл.4, коррелирует нелинейно с проводимостью минералов.

ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ФАКТОРЫ

Влияние размера ячеек сита. Оборудование selFrag включает в себя сменные сита в дне технологического сосуда. Размер ячеек сита можно выбирать от нескольких сот микрон до нескольких миллиметров. Нижнее сито в технологической камере действует как делитель в ходе разрушения импульсами высокого напряжения. Оно позволяет непрерывно подвергать сохранившиеся частицы воздействию импульсов высокого напряжения, предохраняя частицы мелкого размера от дальнейшего разрушения. Чтобы показать воздействие сита на выделение, на рис.3 приведен пример общего содержания халькопирита (руда D), полученного при разных размерах ячеек нижнего сита и при разных уровнях энергии, с коэффициентом надежности 95% в пределах доверительного интервала.

Таблица 5. Статистический анализ с использованием линейной регрессии для определения влияния нижнего сита selFrag на выделение халькопирита (продукт 57–75 мкм из руды D)

Индикатор	Выделение >95%	Содержание
Коэффициент	+14,63	+9,88
Стандартное отклонение	5,30	2,67
Значение t	2,76	3,70
Количество степеней свободы	8	8
Значимость, %	97	99

Содержание халькопирита увеличивается с увеличением размера ячеек нижнего сита (см. рис.3). Эта тенденция постоянна при обоих уровнях энергии, хотя она более выражена при низкой поглощенной удельной энергии. Различия соответствуют 95% статистически значимого уровня. Рис.3 также показывает, что по мере увеличения энергии содержание во фракции продукта 53–75 мкм уменьшается, особенно в случае с увеличенным размером ячеек нижнего сита. Это происходит за счет того, что при увеличении энергии воздействия частицы халькопирита, первоначально содержащиеся во фракции 57–75 мкм, дополнительно разрушаются до меньших фракций продукта.

Для определения степени влияния размера ячеек нижнего сита на два индикатора выделения была статистически выполнена мультилинейная регрессия: халькопирит в классе выделения 95–100% и общее содержание (табл.5).

Результаты предполагают, что размер ячеек сита оказывает значимое влияние как на халькопирит с выделением >95%, так и на содержание халькопирита (обозначенного 97 и 99% значимости, как показано в табл.5). Положительные знаки коэффициентов регрессии выделения >95% и содержания халькопирита предполагают положительную корреляцию, а именно: при увеличении размера сита увеличивается выделение.

Чтобы показать влияние нижнего сита на выделение продукта при разрушении импульсами высокого напряжения, на рис.4 представлены два варианта. Сита с двумя размерами ячеек (0,1 и 1 мм) использовали в технологических сосудах А и В, в каждом обрабатывали минералы

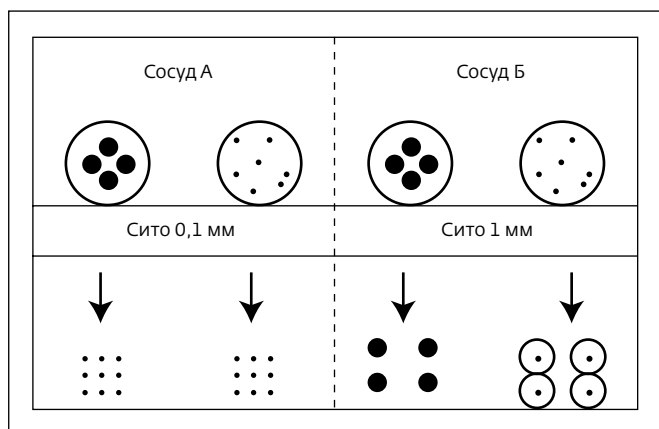


Рис.4. Сито с ячейей двух размеров (0,1 и 1 мм) использовалось в высоковольтных технологических сосудах А и Б, в каждом обрабатывалась грубозернистая руда и руда с мелкими рассеянными зёрнами

двух типов строения (грубые зёрна и мелкие рассеянные зёрна).

При обработке грубозернистых минералов (например, медной руды) лучшее выделение получено при использовании сита с ячейей 1 мм, приводящего к выделению грубых частиц халькопирита. В противоположность этому, мелкозернистые минералы обрабатывали с нижним ситом с размером ячейи 1 мм, большинство продуктов было в виде двойного или тройного класса выделения, поскольку размер ячейи 1 мм значительно больше размера зёрна. С другой стороны, когда грубозернистые минералы обрабатывали с нижним ситом с размером ячейи 0,1 мм, некоторые частицы, хотя и могли быть выделены из грубозернистой фракции, продолжают дополнительно поглощать энергию и разрушаться до тех пор, пока размер зёрна станет меньше размера ячейи

сита. Следовательно, мелкое сито не сохраняет грубые выделенные ценные минералы.

Очевидно, есть оптимальный размер ячейи сита, подходящий к структуре руды и размеру зёрна минерала. Правильный выбор размера ячейи нижнего сита приводит к лучшему выделению ценных минералов и к повышению энергоэффективности при электрическом измельчении.

Влияние пошагового разрушения. Три цикла пошагового разрушения с использованием selFrag проведены на образце платиновой руды (руда F).

В тестах selFrag использовали сито с размером ячейи 1 мм. Подситный продукт первого цикла удалялся, а надситные частицы поступали в следующий цикл обработки selFrag с определенной удельной энергией, и этот процесс повторялся. Подситный материал из каждого цикла разделяли по размеру и один набор размерных фракций (106–150 мкм) проверяли анализатором выделения минерала. В табл.6 приведено содержание выделенного на >95% пирротита в продукте 106–150 мкм, полученном в трех циклах пошагового разрушения.

Данные сравнения выделения пирротита в каждом цикле предполагают, что процент выделенного на 95–100% пирротита, в сущности, не меняется в последующих циклах пошагового разрушения. Однако содержание пирротита падает в последующих циклах, указывая на то, что в следующих циклах разрушения получается меньше пирротита и его ассоциированных композитов, несмотря на текущее повышение удельной энергии, использованной в этих циклах.

Это может значить, что импульсы высокого напряжения могут выделять минерал из пирротита на раннем этапе, используя относительно малую удельную энергию. По мере продолже-

Таблица 6. Влияние пошагового разрушения на выделение пирротита из продукта платиновой руды 106–150 мкм (руда F), обработанной в selFrag

Пошаговое разрушение	Цикл 1	Цикл 2	Цикл 3
Удельная энергия в цикле, кВт·ч/т	2,0	4,6	7,8
Содержание пирротита, %	2,6	1,65	1,1
Класс выделения >95%, %	66	65	63
Массовый % >95% выделенного пирротита	1,7	1,1	0,7

Таблица 7. Процентное изменение содержания борнита в продуктах руды D, созданное selFrag, по сравнению со штыревой мельницей, при двух уровнях энергии

Размер продукта, мм	8,9 кВт·ч/т	21,9 кВт·ч/т
0,3–3,35	-66	-16
0,106–0,3	-59	186
0,053–0,106	-55	224
<0,053	256	396

ния пошагового разрушения процент пирротита, выделенного в каждом цикле, остается одинаковым. Эти выделенные частицы пирротита могут возникать из двойных и тройных пирротитовых композитов, сохранившихся в предшествующем цикле. В результате остаточный пирротит, имеющийся в образце, уменьшается в каждом последующем цикле.

Воздействие поглощенной энергии. Влияние поглощенной энергии на процесс электрического измельчения показан на примере, приведенном в табл.7. Образец медной руды (руда D) обрабатывали отдельно в selFrag и в стержневой мельнице при двух уровнях энергии – 8,9 и 21,9 кВт·ч/т. Их продукты разделяли по размеру и проверяли анализатором выделения минерала. Сравнение результатов электрического и механического измельчения показывает неизменно лучший результат выделения халькопирита при электрическом измельчении при обоих уровнях энергии. Однако в случае борнита это не так.

Из табл.7 видно, что в сравнении с механическим измельчением, содержание борнита в продукте selFrag, созданном при 8,9 кВт·ч/т меньше (т.е. отрицательное процентное изменение) во фракциях всех размеров, за исключением фракции <0,053 мм, где было получено больше борнитового минерала. При увеличении энергии до 21,9 кВт·ч/т результат измельчения в selFrag показывает большее содержание борнита во всех фракциях <0,3 мм, чем в продукте, измельченном в штыревой мельнице.

Выполнено моделирование распределения электрического поля в сферах халькопирита, погруженного в калишпат, при разности потенциалов 100 и 300 кВ, соответственно. По отношению к проводимости калишпата ($1 \cdot 10^{-11}$ См) и

халькопирит и борнит обладают очень высокой проводимостью: 75 и 0,8 См, соответственно. Поэтому напряженность электрического поля в борните может прогнозироваться по напряженности электрического поля халькопирита. Моделирование показало, что, по мере возрастания напряжения со 100 до 300 кВ, результирующий максимум напряженности электрического поля халькопирита возрос с 6,5 до 20,0 кВ/мм. В соответствии с изменением электрического потенциала калишпат показал возрастание напряженности электрического поля с 2,5 до 9,0 кВ/мм. Локальная напряженность электрического поля на границах халькопирита с калишпатом изменилась с 4,0 до 11,0 кВ/мм при увеличении приложенной разности электрического потенциала от 100 до 300 кВ. Разрушение материала происходит, когда напряженность электрического поля превышает максимальную силу электрического поля, которой

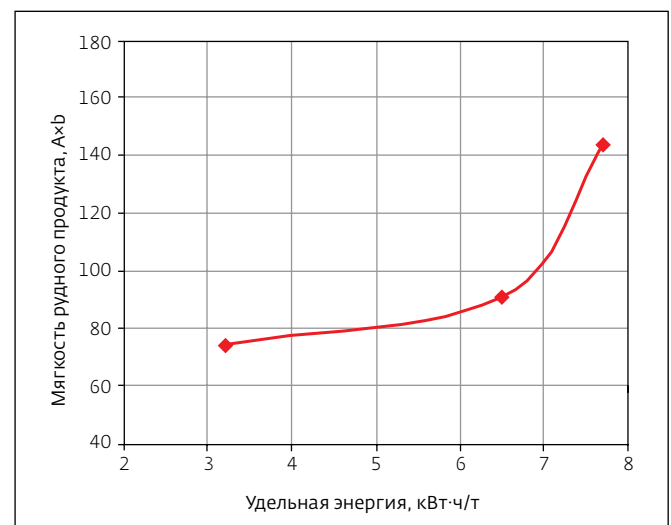


Рис.5. Влияние удельной энергии разрушения импульсами высокого напряжения на остаточную твердость фрагментов, образец руды С (Cu–Au руда), начальная крупность 16–19 мм [8]

может противостоять материал (диэлектрическая прочность). Поэтому повышение напряженности электрического поля на границах материалов должно создавать повышенную вероятность разрушения. Это объясняет, почему содержание борнита значительно увеличивалось при увеличении приложенной в selFrag энергии.

В дополнение к выделению на рис.5 [8] показано влияние приложенной энергии на ослабление руды импульсами высокого напряжения. Для руды С индикатор остаточной мягкости про-

дукта $A \times b$ показал последовательное увеличение с повышением удельной энергии в selfFrag, а после того, как некоторая удельная энергия была превышена, кривая зависимости стала круче. Численное моделирование влияния энергии может использоваться также и для объяснения этого наблюдения.

Очевидно, существует множество факторов, влияющих на показатели электрического измельчения. Улучшать показатели электрического измельчения могут частицы руды, обладающие следующими характерными свойствами:

- грубая зернистость ценных минералов;
- крупный начальный размер;
- проводящие минералы, заключенные в жильную породу, сравнительно с минералами, покрывающими поверхность частиц;
- угловатая (остроконечная) форма частиц;
- большое различие электрических свойств фазы, содержащей ценный минерал, и жильной фазы.

Поскольку свойства руды из разных шахт и залежей сильно различаются, показатели электрического измельчения часто изменчивы. Это подтверждено при обработке шести образцов руды в нашем исследовании. Таким образом, самое важное – это оптимизация технологических условий электрического измельчения в соответствии со свойствами руды.

Для объяснения важности правильного подбора технологических условий электрического измельчения вернемся к примеру из табл.6. При пошаговом разрушении экспериментальные данные показали характер влияния энергии: частицы в последующих циклах разрушения получают больше энергии, чем те, что были в предшествующем цикле. Если составить диаграмму совокупно выделенного пирротита в зависимости от совокупной энергии каждого цикла, будет видно, что увеличение энергии не увеличивает выделение линейно. Из этого следует, что при электрическом измельчении повышенная энергия не гарантирует лучший результат по выделению целевых минералов на единицу потребленной энергии. В другом примере на руде D (см. табл.7), тем не менее, данные свидетельствуют, что рост поглощенной энергии заметно не повышает выделение борнита.

Кроме ценных экспериментальных данных, важное значение имеет математическое модели-

рование процессов. Моделирование указывает на следующие тенденции:

- электрическое измельчение в значительной степени зависит от свойств руды. Частицы, обладающие следующими характерными свойствами, могут улучшать показатели электрического измельчения: грубая зернистость целевых минералов; большой начальный размер частиц; проводящие минералы, погруженные в жильную породу; угловатая форма частиц; большое различие электрических свойств минералоносной и жильной фаз;
- высокая напряженность электрического поля приходится на границы двух минеральных фаз с большой разницей диэлектрической проницаемости и проводимости;
- существование проводящих минералов на поверхности частиц искажает распределение поля на всей частице, изменяя путь и тип разлома, что, в свою очередь, влияет на результаты разрушения и выделения.

Подчеркнем, что технологические факторы и факторы, относящиеся к руде при электрическом измельчении, в значительной степени взаимосвязаны. Следовательно, для электрического измельчения всех руд надо проводить исследование каждого образца руды по каждому отдельному фактору, а не пытаться использовать универсальный набор эксплуатационных условий.

Для реализации в отрасли переработки минерального сырья преимуществ предварительного ослабления и грубого выделения ценных минералов размеры оборудования нужно увеличить от лабораторного масштаба до непрерывно эксплуатируемого с высокой производительностью работы промышленного механизма. Понимание того, как влияют на показатели электрического измельчения технологические факторы и факторы, относящиеся к руде, поможет в его разработке.

ЛИТЕРАТУРА

1. **U.Andres.** Liberation study of apatite-nepheline ore comminuted by penetrating electrical charges. – International Journal of Mineral Processing, 1977, v.4, p.33–38.
2. **U.Andres.** Electrical disintegration of rock.– Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review, 1994, v.14, p.87–110.
3. **U.Andres.** Development and prospects of mineral liberation by electrical pulses.– International Journal of Mineral Processing, 2010, v.97, p.31–38.

4. **Anon.** New ideas in minerals processing.- World Mining Equipment, 1986, 10, p.4-19.
5. **U.Andres, I.Timoshkin, J.Jirestig, H.Stallknecht.** Liberation of valuable inclusions in ores and slags by electrical pulses.- Powder Technology, 2001, v.114, p.40-50.
6. **R.Lastra, LJ.Cabri, P.Weiblen.** Comparative liberation study by image analysis of Merensky reef samples comminuted by electric-pulse disaggregation and by conventional crusher. In: Lorenzen, L. et al. (Eds.), Proceedings XXII International Mineral Processing Congress, 2003, v.1. Cape Town, p.51-260.
7. **LJ.Cabri, N.Rudashevsky, V.Rudashevsky, V.Gorkovetz.** Study of native gold from the Luopengsulo deposit (Kostomuksha area, Karelia, Russia) using a combination of electric pulse disaggregation (EPD) and hydroseparation (HS). - Minerals Engineering, 2008, v.21, p.463-470.
8. **E.Wang, F.Shi, E.Manlapig.** Pre-weakening of mineral ores by high voltage pulses.- Minerals Engineering, 2011, v.24, p.455-462.
9. **E.Wang, F.Shi, E.Manlapig.** Mineral liberation by high voltage pulses and conventional comminution with same specific energy levels. - Minerals Engineering, 2012, v.27-28, p.28-36.
10. **U.Andres, J.Jirestig, I.Timoshkin.** Liberation of minerals by high-voltage electrical pulses. - Powder Technology, 1999, v.104, p.37-49.
11. **F.Shi, T.Kojovic, S.Larbi-Bram, E.Manlapig.** Development of a rapid particle breakage characterization device - the JKRBT. - Minerals Engineering, 2009, v.22, p.602-612.
12. **F.Shi, T.Kojovic.** Validation of a model for impact breakage incorporating particle size effect. - International Journal of Mineral Processing, 2007, v.82, p.156-163.
13. **S.Bamji, A.Bulinski, K.Prasad.** Electric field calculations with Boundary Element Method. - IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1993, v.28 (3), p.420-424.
14. **E.Parkhomenko.** Electrical Properties of Rocks. - New York City, Plenum Press, 1967.
15. **J.Schon.** Physical Properties of Rocks: Fundamentals and Principles of Petrophysics. - Pergamon Press, Oxford, 1995.
16. **R.Carmichael, B.Raton.** Practical handbook of physical properties of rocks and minerals. CRC Press, 1989, p.374.
17. **D.Cheng.** Field and wave electromagnetics, 2nd Edition. Addison-Wesley Publishing Company Inc., 1989.