

УДК 621.926.4

СПОСОБЫ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ПРОЦЕССА РАЗРУШЕНИЯ И ПОВЫШЕНИЯ СЕЛЕКТИВНОСТИ ДЕЗИНТЕГРАЦИИ ДИСПЕРСНЫХ СРЕД В ЦЕНТРОБЕЖНЫХ УСТАНОВКАХ

А. В. ЛИСИЦА*НПО «Центр», Республика Беларусь*

Успешный поиск способов повышения интенсификации процесса разрушения дисперсных сред в центробежных установках с одновременным уменьшением энергозатрат на единицу дробленого продукта и повышением селективности дезинтеграции, качественные сдвиги в организации процесса дезинтеграции горных пород немыслимы без понимания механизма разрушения среды. При этом надо исследовать весь спектр проблем разрушения для того, чтобы определить те условия, которые ведут к требуемому результату. На разрушение влияют: структура, анизотропия, неоднородность поля напряжений, содержание влаги в порах, развитие микро- и макроразрушений в породе, масштаб процесса разрушения, физико-механические свойства горных пород и другие факторы.

Основные принципы дезинтеграции заключаются в том, чтобы разрушить материал по поверхности раздела фаз – геометрическая селективность разрушения – и разрушить с минимальными энергозатратами – энергетический принцип селективности разрушения [1]. При селективной дезинтеграции процесс разрушения горных пород протекает геометрически и энергетически селективно.

Горные породы представляют собой неоднородные образования на различных масштабных уровнях – от размеров месторождения до уровня кристаллов, слагающих породу. Одна часть минерального вещества горной породы, обладающая определенными свойствами и структурой строения, отличающимися ее от другой части и ограниченная от них поверхностями раздела, представляет собой фазу. Фазы различаются масштабным уровнем: месторождения (10^3 м), тела горных пород (1 м), минеральных агрегатов (10^{-3} м), кристаллов отдельных минералов (10^{-4} м), отдельных блоков внутри кристаллов минералов (10 мкм) и кристаллитов, слагающих эти блоки (1 мкм).

В рамках существующих технологий коэффициент полезного использования энергии составляет десятые доли процента [2]. Пути повышения полезного использования энергии на разрушение связаны с повышением энергоселективности и геометрической селективности дезинтеграции.

Для повышения энергоселективности дезинтеграции необходимо стремиться к:

- 1) снижению затрат на упругие деформации;
- 2) снижению затрат на пластические деформации;
- 3) снижению затрат на трение.

Снижение затрат на упругую деформацию можно осуществить за счет замены нагружения всего объема созданием локальных предельных нагрузок непосредственно в исходном куске по месту разрушения. С увеличением градиента напряжений увеличивается и энергоселективность разрушения. Высокий градиент можно создать применением химических способов разрушения, облучения с помощью когерентно-

го излучения (лазеров), орошения водой, которая не только выполняет функции транспортирующего и пылеподавляющего агента, но и оказывает коррозионное воздействие. Высокоградиентные напряжения надо создавать на межфазных поверхностях.

Снижения затрат на пластические деформации можно добиваться за счет подбора оптимальных соотношений между прилагаемой нагрузкой, скоростью деформирования и продолжительностью нагружения. При этом используются: методы создания высокой скорости деформирования, что локализует пластическую деформацию в сравнительно небольшом числе атомных слоев в области формирования русла будущей магистральной трещины; эффект предварительного повышения хрупкости за счет нагрева до температуры, соответствующей заданной скорости деформации; методы одновременного теплового и механического воздействия, замораживания, скорости изменения температуры и уменьшения слишком высоких деформационных нагрузок, при которых межзерновые перемещения сменяются межкристаллическим скольжением.

Снижения затрат на трение, что также способствует повышению энергоселективности дезинтеграции, можно добиться минимизацией отношения объема рабочей зоны машины к ее производительности; учащением циклов нагружения; минимальными ходом рабочих органов и скоростью их перемещения относительно взаимодействующих в процессе разрушения тел; как можно более быстрым удалением из рабочей зоны после акта разрушения готового продукта.

Пути повышения геометрической селективности дезинтеграции заключаются в следующем: в рациональной организации процесса обогащения, которая предусматривает на первом этапе направленное изменение свойств минералов, на втором – собственно, разделение их; в проведении разупрочнения руды, когда количество энергии достаточно для разрушения ослабленных межзерновых связей и недостаточно для разрушения зерен. Необходимые начальные условия для разрушения уже есть в кусках породы. Есть также способы реализации этих условий – для пород, отличающихся упругими свойствами (хрупкое разрушение), надо применять механические способы разрушения; для пород, в которых минералы отличаются значительно по термическому коэффициенту расширения – термические. Кроме того, для разупрочнения используются акустические, магнестрикционные, радиационные, электромагнитные, рентгеновские методы.

Современная технология массовой дезинтеграции решает задачу, далекую от основной задачи рудоподготовки – раскрытия минералов, и поэтому исследователями разработаны и разрабатываются такие способы дезинтеграции, где бы выполнялись условия избирательного (селективного) дробления и измельчения. Для селективной дезинтеграции ударным способом применяются ударные дробилки и мельницы специальных конструкций, в которых учитываются скорости ударного взаимодействия, направления удара, жесткости ударяющихся тел и другие факторы. Оказалось, что для среднего и мелкого дробления хорошо подходят центробежные дробилки метательного типа, параметры которых поддаются точному регулированию [3]. При этом используются как механические, физические, так и физико-химические и химические способы предварительного разупрочнения горной породы, способствующие селективности дробления и измельчения.

Разупрочнение горных пород может достигаться при воздействии на них упругих колебаний. Упругие колебания низкой частоты (звук) достаточной мощности чаще всего приводят к тем же последствиям, что и механические напряжения – усталостному разрушению. Колебания звуковой частоты способствуют более глубокому проникновению в толщу материала жидкости, находящейся на его поверхности [4].

Распространение в горных породах высокочастотных упругих колебаний также вызывает их разрушение. Скорость разрушения горных пород под действием ультразвука определяется их хрупкостью. При большей хрупкости степень разупрочнения пород при прочих равных условиях выше. Установлено, что чем больше время воздействия ультразвука, тем больше структурных изменений обнаруживается в минерале и тем меньше энергетические потери при его дальнейшей переработке.

Эффект разупрочнения горных пород усиливается также при быстром – динамическом воздействии теплового поля. При этом тепловое поле является неоднородным, а с увеличением неоднородности теплового поля в породе повышаются термонапряжения. Это особенно эффективно для пород с различными минеральными включениями, коэффициент линейного теплового расширения которых отличается от коэффициента линейного теплового расширения матрицы породы.

В работе [5] проводились экспериментальные исследования с целью определения влияния температуры на расход энергии, затраченной на дробление горных пород. Образцы из магнетитового кварцита, раздробленные до крупности 10 мм, нагревались до температуры 200, 400, 550, 620, 740 и 900 °С и в течение часа сохранялась постоянная температура. Затем часть образцов естественно охлаждалась, а часть резко охлаждалась в воде. Измельчение образцов производилось в шаровой мельнице. Результаты испытаний показали, что потребление энергии на дробление снижается по мере повышения температуры. После нагревания кварцита до 600 °С энергия, затраченная на дробление, снижается на 20-40 %.

Разупрочнению горных пород может способствовать также воздействие электрического поля, энергия которого трансформируется в тепловое поле. Это имеет место при довольно низком электрическом сопротивлении пород или большом напряжении электрического поля. Так как удельная электрическая проводимость пород возрастает с повышением частоты, то значительно более интенсивный нагрев происходит при распространении в породе токов высокой частоты [6].

В представления о механизме разрушения руд и пород в электромагнитном поле авторами работы [7] была заложена концепция об избирательности СВЧ-нагрева минералов, слагающих горную массу. Для железных руд сущность этого предположения заключается в следующем. В СВЧ-диапазоне радиоволн электромагнитные свойства составляющих рудную массу минералов весьма различны, так тангенс угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta$ и диэлектрическая проницаемость ϵ кварца и магнетита различается в 10^3 - 10^4 и 10 раз, соответственно. Кварц при этом практически прозрачен для проникающего излучения, в то время как зерна магнетита интенсивно поглощают энергию СВЧ. Вследствие такого избирательного поглощения в обрабатываемом объеме руды происходит быстрый нагрев зерен магнетита, что, в свою очередь, вызывает их резкое тепловое расширение. Если затем охладить рудную массу, например, водой, это приведет к сжатию минералов.

Селективность воздействия энергии СВЧ и различия в тепловых характеристиках предопределяют концентрацию растягивающих и сжимающих напряжений по плоскостям спайности зерен магнетита и кварца. При таком характере нагружения последующее механическое воздействие на руду приводит к разрушению по наиболее слабым местам – по межзерновым связям и дефектам структуры. Это позволяет повысить эффективность измельчения руды, в частности, селективность раскрытия зерен минералов.

Пробы для собственных исследований представляли собой навески магнетитового роговика массой 50 г и крупностью 7-10 мм и навески модельной среды, состоящие из 100 кубиков с ребром 10 мм. Модельная среда представляла собой смесь частиц магнетитового роговика фракции 2-3 мм (40 %), скрепленных песчано-

цементной смесью. Контрольные навески подвергались сухому измельчению без предварительного облучения. Экспериментальные навески подвергались предварительной обработке электромагнитной энергией СВЧ с различной плотностью потока проходящей мощности и при различном времени облучения.

В экспериментах исследованы зависимости характеристик дробления и селективности раскрытия магнеттовых роговиков и моделей, разрушаемых в центробежной установке, от изменения одного параметра СВЧ-воздействия при фиксированном другом (мощность облучения P , время воздействия облучения τ). Рациональные значения плотности потока мощности для железистых кварцитов установлены в работе [4] и составляют от 40 до 100 Вт/см². В области этих значений выбирались параметры в проводимых экспериментах, результаты которых представлены на рис. 1-6.

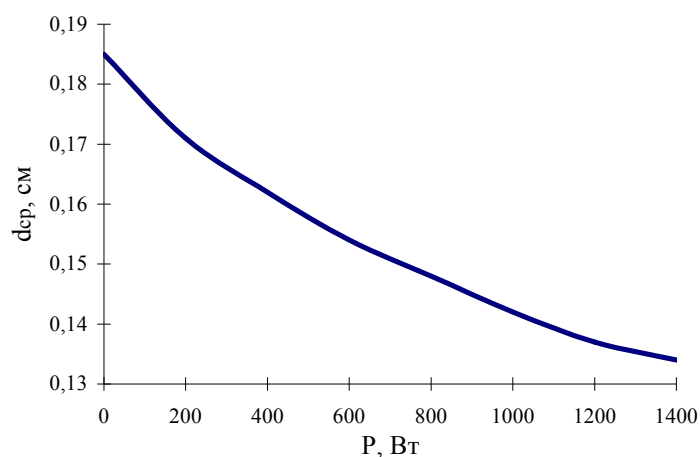


Рис. 1. Зависимость величины диаметра среднего куска от мощности облучения СВЧ

Для моделирующего материала рудная фракция в основном выделяется при мощности до 400 Вт (рис. 2). Дальнейшее увеличение мощности мало влияет на изменение величины вновь образованной поверхности (рис. 1), характеризующей мелкие классы крупности. Если в интервале от 0 до 400 Вт изменение достигло 70 %, то в пределах 400-600 Вт только 10 %, а далее еще медленнее, селективность практически после 400 Вт не изменялась (рис. 1, 2).

При изменении времени облучения и фиксированной величины мощности облучения можно добиться более эффективных результатов с точки зрения повышения селективности раскрытия зерен. Так, увеличивая время облучения до 6-7 мин, селективность раскрытия составила 98 % (рис. 3), чего не удалось достичь путем изменения мощности. Очевидно, это связано с особенностями разрушения твердых тел, когда существование более длительного импульса меньшей амплитуды приводит к лучшим результатам, чем более короткого с большей за счет более длительного существования поля напряжений, предопределяющих концентрацию растягивающих и сжимающих напряжений по плоскостям спайности железистого кварцита и песчано-цементной смеси. Это приводит к разрушению по наиболее слабым местам, т.е. возрастает интенсивность измельчения и селективность раскрытия зерен.

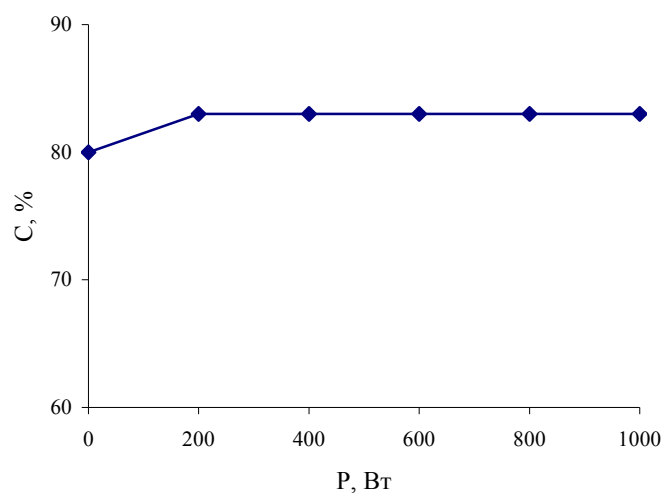


Рис. 2. Зависимость селективности раскрытия составляющих моделей от мощности их предварительного облучения СВЧ

При предварительном облучении СВЧ-энергией магнетитовых роговиков рациональные значения изменения мощности составляют 800-1500 Вт при постоянном времени ($\tau = 5$ мин) облучения (рис. 4), а при фиксированной мощности (из рационального интервала изменений) время облучения τ не должно превышать 3 мин (рис. 5, 6). При большем времени облучения интенсивность измельчения в центробежной установке практически не увеличивается (выход мелких классов не возрастает, а выход крупных не уменьшается). Это же относится и к селективности раскрытия.

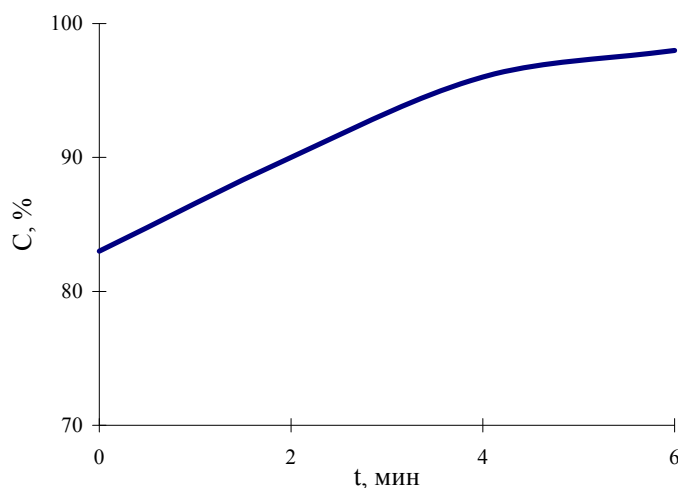


Рис. 3 Изменение селективности раскрытия составляющих моделей в зависимости от времени облучения СВЧ-энергией

Кроме вышеописанных была проведена серия экспериментов, где дисперсная среда перед измельчением в центробежной установке предварительно подвергалась комбинированному воздействию вещественных, частотных и тепловых полей. В частности, брались одинаковые навески исходных проб для измельчения. Одна часть

не подвергалась никакой предварительной обработке. Вторую часть нагревали в термостате до $t = 120\text{ }^{\circ}\text{C}$, из них одни охлаждались на воздухе, а другие – в воде при $t = 15\text{ }^{\circ}\text{C}$. Третья часть подвергалась СВЧ-обработке с последующим охлаждением в воде и на воздухе, причем температура СВЧ-облучения составляла $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ как и при обработке в термостате.

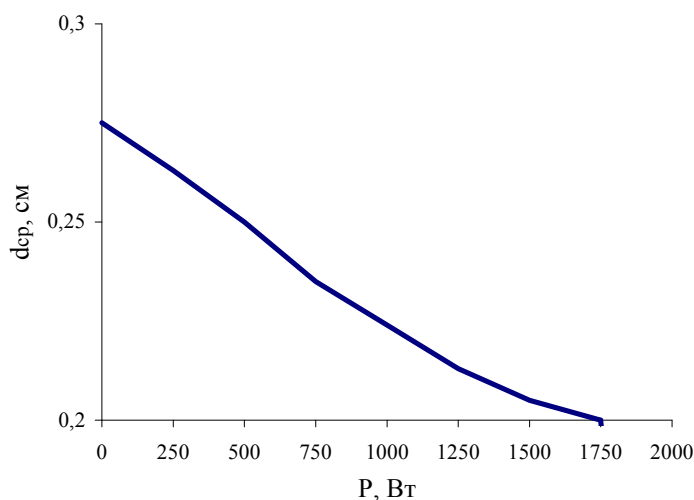


Рис. 4. Зависимость параметра измельчения навесок магнетитовых роговиков в центробежной установке от мощности СВЧ их предварительного облучения

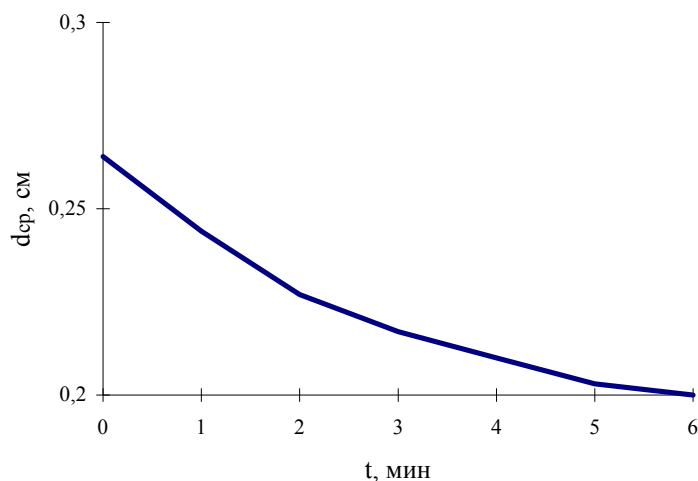


Рис. 5. Изменение параметра измельчения навесок магнетитовых роговиков в центробежной установке в зависимости от времени их облучения СВЧ

При постепенном нагреве исходных проб происходит равномерный нагрев всех составляющих материала или породы, образуется равномерное температурное поле. Воздействие СВЧ-излучения избирательно. При облучении СВЧ-энергией полупроводящих поглощающих материалов (например, магнетита) в нем происходит наведение токов смещения и токов проводимости, что приводит к выделению тепла в полупроводящем материале. В то же время диэлектрические материалы (кварц в горных породах и моделирующих материалах) в процессе тепловыделения практически не участвуют. СВЧ-обработка руды приводит к направленному воздействию излуче-

ния на магнетит, который поглощает основную часть вводимой мощности, за счет чего повышается температура зерен и агрегатов магнетита в железной руде. Кварц остается непоглощающим энергию СВЧ минералом и нагревается только за счет передачи тепла преимущественно от магнетита. В связи с этим СВЧ-облучение приводит к неравномерному нагреву сростков магнетита и кварца. Неравномерное температурное поле способствует созданию неравномерного поля напряжений, что приводит к ослаблению материала. Эксперименты подтверждают эти соображения. При разрушении в центробежной установке не подверженных тепловой обработке исходных проб селективность раскрытия минералов моделирующего состава приблизительно на 9 % ниже, чем при воздействии равномерного теплового поля, и на 18 % по сравнению с неравномерным нагревом СВЧ-энергией.

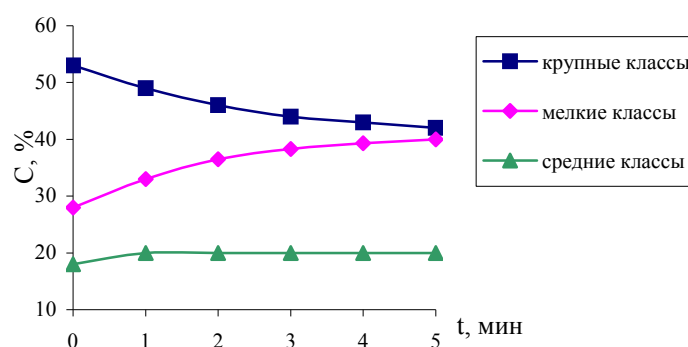


Рис. 6. Изменение выхода крупности различных классов измельченных в центробежной установке магнетитовых роговиков в зависимости от времени их облучения СВЧ-энергией

Результаты экспериментов показали, что обработка перед измельчением в центробежной установке магнетитовых роговиков СВЧ и последующее охлаждение в воде увеличивают выход мелких классов на 13,5-38,9 % в зависимости от мощности облучения и снижают выход крупных классов на 4,9-22,8 %.

В проведенных экспериментах селективность оценивалась косвенно – по выходу железистого кварцита в моделях и выходу мелких классов, из которых были удалены немагнитные фракции в магнетитовых роговиках. Однако существует ряд методов, позволяющих определить селективность раскрытия зерен. Из-за ограниченности средств в настоящих исследованиях это сделано не было. Остановимся лишь на основных результатах, полученных для железных руд.

Установлено методом химического анализа, что в результате нагрева руды СВЧ содержание железа в классах 0,1-0,05 мм становится выше. Для выяснения, в какой степени раскрытия находится дополнительно извлеченное в мелкие классы железо, мелкие классы обесшламливались и подвергались гравитационному анализу в жидкости Клеричи. Установлено, что СВЧ-обработка способствует повышению выхода тяжелой фракции разделения на 1-3 %, то есть, происходит изменение раскрытия минералов. Для изучения состава фракций гравитационного разделения применялся метод минералогического (микроскопического) анализа.

Таким образом, эффективными методами повышения интенсивности измельчения и селективного раскрытия дисперсной среды, разрушаемой в центробежной установке, являются методы предварительного разупрочнения этой среды воздействием частотных и тепловых полей.

Литература

1. Изменение свойств минералов при рудоподготовке /Л.С. Солнцева, Е.В. Лихонина, Б.П. Солнцев и др. Интенсификация технологических процессов рудоподготовки.- Л.: Механобр., 1987.
2. Тангаев И.А. Энергоемкость процессов добычи и переработки полезных ископаемых. – М.: Недра, 1986.
3. Кубачек В.Р., Сайтов В.И., Паладеева Н.И. Критерий ударного разрушения //Изв. вузов. Горный журнал.- 1985 - № 8.
4. Чельшкина В.В. Новые пути повышения степени селективного раскрытия минералов при обогащении руд.– Тбилиси: Институт горной механики, 1986.
5. Влияние нагрева на дробление горных пород. Wang Shuxin /Non-Metal Mines – 1989.
6. Москалев А.Н., Лойк В.И., Явтушенко О.В. Исследование пороговых плотностей потока при разрушении горных пород на СВЧ.– Киев: Наук. думка, 1982.
7. Москалев А.Н., Абкина Е.Б., Коробской В.К., Чельшкина В.В. Измельчение руд с применением электромагнитной энергии СВЧ. Обогащение руд.– Киев: Наук. думка, 1986.

Получено 01.12.2000 г.