

К.Т. Тажибаев, Р.М. Султаналиева
ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЙ СПОСОБ
ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ КРЕПКИХ РУД

Экспериментально обоснован способ оптимального разупрочнения и измельчения крепких руд, позволяющий обеспечить экономию энергии при измельчении, уменьшение расхода металла за счет уменьшения износа металлических частей мельниц, увеличение выхода полезного компонента (извлекаемого металла) путем применения оптимальной длительности воздействия на руду СВЧ волн. Отличие способа состоит в том, что до измельчения подвергают пробы руды воздействию СВЧ электромагнитными волнами с разной продолжительностью. Облученную СВЧ волнами каждую пробу и пробу в не облученном состоянии отдельно измельчают в вертикальном копре с помощью свободно падающего груза и определяют удельную энергоемкость измельчения руды для каждой продолжительности СВЧ воздействия и исходного состояния. Из графика «удельная энергоемкость измельчения – продолжительность времени воздействия СВЧ волн» определяют оптимальное значение продолжительности воздействия СВЧ волнами, соответствующее минимальному значению удельной энергоемкости измельчения данной руды. За тем по установленной оптимальной продолжительности облучения СВЧ волнами воздействуют на руду и минерал данного типа и размера кусков, подлежащих к измельчению, после облучения СВЧ волнами измельчение руды или минерала проводят в мельницах ударного действия.

Ключевые слова: руда, минерал, измельчение, СВЧ волна, остаточное напряжение, термонапряжение, энергоемкость, разупрочнение.

При подготовке для обогащения или флотации механическое измельчение руды до размера частиц порядка десятков микрометров, является наиболее энергоемким и дорогостоящим процессом в технологической цепи извлечения полезных компонентов (металлов, полезных минералов). При этом, КПД процесса механического измельчения составляет всего 1÷2%, остальная 98%, приложенной для разрушения (образования новой поверхности) руды энергии, рассеивается в виде диссипативных потерь (энергия теплоты, звука, колебаний окружающей среды). Известно, что при мировом объеме переработки руд десятками млрд т в год на измельчение руд ежегодно затрачивается порядка несколько млрд долларов США. Поэтому в настоящее время представляют

большой практический интерес новые способы разрушения или разупрочнения крепких руд, энерго и ресурсосберегающие технологии измельчения.

В настоящее время признаны эффективными и научно обоснованными методы, использующие подходы предварительного снижения прочности (разупрочнение) пород до механического разрушения путем воздействия на руды тем или иным видом энергии.

Из всех известных и в определенной мере изученных видов энергии, с точки зрения способности влиять на физико-механические свойства минералов и руд, наиболее перспективна энергия электромагнитного поля сверхвысокочастотного (СВЧ) диапазона. Преимущества разупрочнения в СВЧ электромагнитных полях – это объемный характер влияния СВЧ энергии на

структурное состояние руд. В связи с этим, нами проведены экспериментальные исследования энергоемкости измельчения горных пород и руд, с целью управления их прочностными свойствами, путем воздействия на них сверхвысокочастотными электромагнитными волнами.

Известно, что при воздействии СВЧ волнами на руду неравномерное нагревание приводит к появлению термомеханических напряжений и образованию микротрещин, а также формированию остаточных напряжений, которые, в свою очередь, обуславливают изменение прочности.

А.Н. Москалевым [1] предлагается способ разрушения горных пород путем облучения двумя генераторами СВЧ волн. По данному способу сначала массив породы облучают волнами меньшей энергетической плотности (150–300 Вт/см²) от первого генератора до образования теплового следа, а затем – волнами большей плотности (300–5000 Вт/см²) от второго генератора, идущими в перпендикулярном направлении. Первое облучение создает в породе нагретую зону с повышенным значением мнимой составляющей диэлектрической проницаемости. Для лучей (излучения) второго генератора указанная зона является сильно поглощающей, тогда как не нагретая порода – прозрачной. В результате мощность второго генератора поглощается в основном в зоне пересечения облучений. Резкий нагрев зоны пересечения приводит к тепловому расширению, фазовым превращениям, образованию газовой фазы и т.д. в этой области, что ведет к разрушению породы. Перемещая антенну второго генератора над поверхностью массива вдоль теплового следа, можно создавать канал разрушенной породы или резать ее. Этим способом разрушались кристаллические сланцы, амфиболиты, габбро-диабазы, граниты, песчаники

и другие породы с использованием генераторов на частоте 2,4 ГГц. Объем разрушаемой породы в секунду составлял 180–250 см³.

В работе [2] приведены результаты проведенных экспериментов по измельчению и ситовому анализу проб железных руд, нагреваемых СВЧ полем до 3000 С (плотность потока мощности 3560 Вт/см², время облучения 3 мин), а также нагреваемых в муфельной печи до той же температуры, и проб неподвергнутых тепловой обработке. Отмечается, что в нагретом в печи пробе, по сравнению с контрольной (исходной) пробой, выход классов мельче 0,1 мм существенно не изменился, тогда как, в нагретой СВЧ полем пробе выход увеличился. Так, выход класса 0,074 мм увеличился на 6–10%. Крупные классы руды, нагретой в печи, оказались, размолоты более эффективно – в них возросло содержание средних фракций. При СВЧ нагреве до той же температуры, что и в печи, это различие проявляется в большей мере. Аналогичные зависимости были получены и на пробах руды, нагретых до других температур – от 80 до 450 °С. Выявленные преимущества СВЧ нагрева по сравнению с печным связываются с селективностью воздействия СВЧ поля на минералы и раскрытием зерен по плоскостям спайности. Измельчение руды, обработанной СВЧ полем в разных режимах, показало, что с увеличением времени воздействия содержание классов мельче 0,16 мм в продукте измельчения закономерно возрастает. При этом для контрольного и обработанного продуктов различие по классу 0,074 мм достигает 25%. Наиболее полное раскрытие зерен для данной руды достигается в классе – 0,05 мм, что подтверждено данными, полученными при изучении под микроскопом. Обработка руды в потоке СВЧ-мощности 35 Вт/см² в течение 1–10 мин

позволяет повысить производительность мельницы по крупности 10–0,05 мм на 60%. Увеличение потока мощности дает возможность достичь тех же результатов при меньшем времени обработки.

Недостатки указанных способов и методов измельчения руд состоит в том, что в них не предусмотрено точное определение оптимальной продолжительности воздействия на руду СВЧ волн. Известно, что длительные воздействия СВЧ волн могут привести, наоборот, к увеличению прочности (к упрочнению), а не достаточно продолжительное воздействие волн – к не существенным структурным изменениям, в результате чего не обеспечивается разупрочнение и уменьшение энергоемкости измельчения руд. Действительно, в работах исследователей [3, 4] убедительно доказана необходимость подбора своего оптимального режима СВЧ-обработки для каждого конкретного вида горной породы, если мы имеем целью не только получить необходимые изменения ее параметров при минимуме энергозатрат, но и улучшить дальнейшую переработку. Случайно выбранный режим воздействия СВЧ-полем, как отмечено авторами, может не дать положительного результата.

Следует отметить, что длительность воздействия СВЧ волн определяет не только эффект разупрочнения и упрочнения, но и количество потребляемой энергии. В конечном итоге необходимо обеспечить уменьшение энергоемкости измельчения руд и минералов, износа металлических частей мельниц и увеличение выхода полезных компонентов при их извлечении из руд и минералов. Для решения этих задач были проведены исследования влияния продолжительности воздействия СВЧ волн на энергоемкость измельчения разных руд.

При этом последовательно выполняются следующие работы. Отбирают

пробу руды, из которого изготавливают навески (куски со средним размером 2 см по 25 штук для каждого режима СВЧ воздействия). Опыты для каждого режима повторяется 5 раз. В одном опыте измельчается по 5 кусков руды свободно падающим грузом по известной методике определения коэффициента крепости по толчению [6].

Из рудного месторождения отбирают необходимое, для обеспечения представительности, количество минерала или руды (обычно отбирают по одной пробе из каждого места, в котором нужно определить показатели, чтобы можно было получить не менее 30 навесок по 5 кусков каждая). Навески должны состоять из 5 кусочков размером в 20–25 мм в поперечнике каждый, которые получают, раскалывая отобранные пробы. Для каждого отдельного определения используется, как указано выше, 5 навесок. Полученные этим методом данные, отличаются сравнительно невысоким коэффициентом вариации равным в среднем 10–15%. Поэтому, для получения надежной средней величины коэффициента крепости и удельной энергоемкости измельчения, производится по 5 определений для каждой продолжительности СВЧ воздействия на одной и той же пробе породы. Для определения коэффициента крепости разработан специальный прибор ПОК (прибор для определения крепости), состоящий из трубчатого копра, измерителя мелкой фракции. Каждая отдельная навеска дробится в стакане вертикально трубчатого копра прибора ПОК гирей массой 2,4 кг, сбрасываемой с высоты 600 мм. В случае необходимости изменение величины работы разрушения при толчении целесообразно производить только варьированием числа ударов падающей гири по навеске. Вес гири и высоту ее сбрасывания следует оставлять постоянным. Получавшаяся после толчения мелочь высыпается из

стакана копра на сито с отверстиями 0,5 мм, и по отдельности 5 навесок, раздробленных в копре прибора, просеивается. Фракция размером мельче 0,5 мм (прошедшая через сито с этим размером) собирается и насыпается в стакан объеммера диаметром 23 мм, при помощи которого определяется высота столбика этой пылевой фракции. Величина коэффициента крепости исследуемой горной породы вычисляется по отношению затраченной на дробление работы к вновь образованной поверхности по эмпирической формуле М.М. Продьяконова [6].

После определения коэффициента крепости, величина удельной (объемной) энергоёмкости измельчения руды – K при разных величинах длительности СВЧ воздействия определяется по предложенной нами формуле [5]:

$$K = \frac{nE_i}{V} \quad (1)$$

или

$$K = \frac{n \cdot mgh}{Sl} \quad (2),$$

где E_i – энергия единичного удара; V – объем фракции с размером менее 0,5 мм; m – масса свободно падающего груза; g – ускорение свободного падения; n – число ударов свободно падающего груза по одной навеске; l – высота столбика пыли в объеммере, мм; h – высота падения груза; S – площадь сечения объеммера.

По полученным пяти значениям показателей определяется среднеарифметические величины. Исследованиями установлено, что

вновь образованная при дроблении хрупкого материала поверхность складывается в основном (примерно на 90%) из поверхности мельчайших кусочков величиной менее 0,5 мм. Поэтому для значительного упрощения метода после дробления определяется поверхность только мелких фракций – менее 0,5 мм – то есть величина высоты столбика пыли в объеммере при этом пропорциональна вновь образованной поверхности полученных при дроблении кусочков [6].

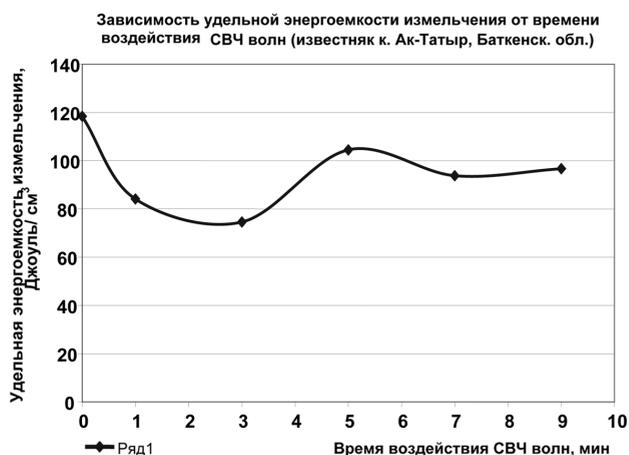


Рис. 1. Зависимость энергоёмкости измельчения от времени воздействия СВЧ волн (известняк)



Рис. 2. Зависимость энергоёмкости измельчения от времени воздействия СВЧ волн (диорит)

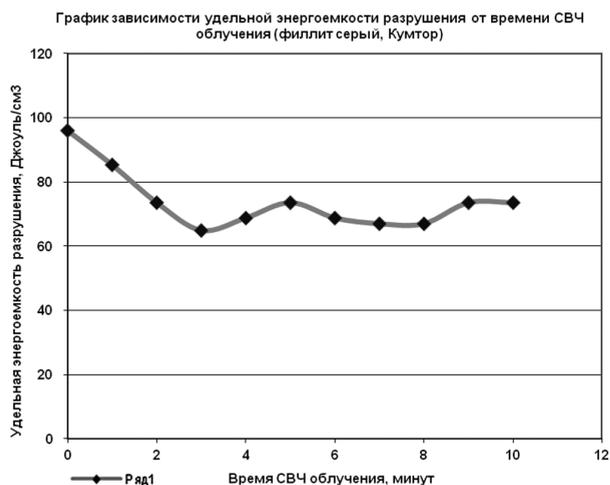


Рис. 3. Зависимость энергоёмкости измельчения от времени воздействия СВЧ волн (филлит)



Рис. 4. Зависимость энергоёмкости измельчения от времени воздействия СВЧ волн (кварц)

Сущность предлагаемого способа заключается в том, что по данным определения удельной энергоёмкости измельчения для исходного состояния (не подвергнутых к облучению состояние), и для разных величин длительности СВЧ воздействия (рис. 1, 2, 3, 4), определяют оптимальное значение продолжительности времени воздействия СВЧ волн, соответствующее минимальному значению удельной энергоёмкости измельчения данной руды. Оптимальное значение продолжительности времени воздействия СВЧ волн

принимают для обработки всей руды данного типа и размера кусков подлежащих к измельчению в производственных условиях. Как видно из рис. 1, 2, 3, 4 оптимальное значение времени воздействия СВЧ волн для известняка (карьер Ак-Татыр, Баткенская область), диорита (месторождение Токтозан), филлита серого (рудник Кумтор) составляет 3 минуты, а для кварца (рудник Восточный Коунрад) – 5 минут.

Для облучения используется СВЧ-печь (микроволновая печь). В печи электричество, проводимое магнетрону, используется для генерации микроволновой энергии. Микроволны проникают в зону воздействия через отверстия внутри печи и не могут проникать через металлические стенки печи, в печи можно выбирать 5 уровней микроволновой мощности. Использовался уровень мощности – 700 Вт. Частота микроволн – 2450 МГц. Полезный объем печи составляет 0,03 м³.

Образцы руд навесками по 200–250 г и средними размерами 20–25 мм помещались вовнутрь печи и облучались СВЧ-импульсами.

Первоначально определяется исходные данные, т.е. коэффициент крепости по толчению и удельно-объемная энергоёмкость измельчения исходного (не облученного) состояния руды. Затем такие же куски из руды подвергаются воздействию СВЧ волн в микроволновой печи. Режим выдержки в печи следующее: от одного до девяти минут через интервал 1 минуты, а в некоторых случаях от одно-

го до двадцати минут через каждые 2–5 минут.

Следует отметить, что экономия энергии на помол при предварительном воздействии

СВЧ волнами должно не только компенсировать энергозатраты на нагрев при предварительном СВЧ воздействии, но и обеспечить существенную экономию энергии. При этом уменьшается износ металлических частей мельниц, увеличивается выход полезного компонента (извлекаемого металла) за счет улучшения раскрываемости минеральных зерен, так как при оптимальной продолжительности воздействия на руду СВЧ волнами происходит существенное разупрочнение руды. Судя по снижению прочности можно отметить, что уменьшение износа, следовательно, расхода металла в мельницах тоже будет значительным. Структурными анализами показаны, что при воздействии СВЧ волн улучшается раскрываемость зерен извлекаемых металлов и минералов, за счет чего увеличивается выход извлекаемого компонента. Например, как показывают наши опыты и расчеты, для диорита месторождения Токтозан удельная энергоемкость измельчения в исход-

ном состоянии составляет 87 Дж/см^3 , а после 3 минуты воздействия СВЧ волн – 30 Дж/см^3 (рис. 2). Расход энергии при мощности печи $0,7 \text{ кВт}$ и в течение 3 минуты составляет $0,7 \cdot 0,05 \text{ ч} = 0,035 \text{ кВт час}$ или $35 \text{ Вт час} \cdot 3,6 \cdot 10^3 = 126 \text{ 000 Дж}$. При полезном объеме печи 30 000 см^3 удельный расход энергии на 3 минутное СВЧ облучение составляет $126 \text{ 000}/30 \text{ 000} = 4,2 \text{ Дж/см}^3$. С учетом расхода энергии на СВЧ облучение общая удельная энергоемкость измельчения составляет $30 + 4,2 = 34,2 \text{ Дж/см}^3$. Таким образом, экономия энергии при оптимальном СВЧ облучении, по сравнению с необлученным (исходным) состоянием, составляет $87 - 34,2 = 52,8 \text{ Дж/см}^3$, или экономия энергии при измельчении диорита после СВЧ облучения составляет $60,7\%$.

Применение предлагаемого способа может обеспечивать экономический эффект за счет экономии энергии, уменьшения расхода металла, а также увеличение выхода полезного компонента (извлекаемого металла) вследствие улучшения раскрываемости минеральных зерен, так как при оптимальной длительности воздействия на руду СВЧ волнами происходит существенное разупрочнение руд.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Москалев А.Н. и др. Способ разрушения горных пород электромагнитными волнами. Авторское свидетельство СССР № 724731, кл. E21C 37/18, 1977г.).

2. Абкин Е.Б. и др. Измельчение руд с применением электромагнитной энергии СВЧ // Обогащение руд. – 1986. – № 6. – С. 2–5.

3. Новик Г.Я., Зильбершмидт М.Г. Управление свойствами пород в процессах горно-го производства. – М.: Недра, 1994.

4. Зешер Ю.И. и др. Применение СВЧ-нагрева для рудоподготовки железистых кварцитов Михайловского горно-обогатительного комбината перед их обогащением /

Всесоюзная научно-практическая конференция «Применение СВЧ-энергии в технологич. процессах и научных исследованиях». Тезисы докладов. – Саратов, 1991. – С. 98–100.

5. Тажибаев К.Т., Султаналиева Р.М., Акматалиева М.С., Тажибаев Д.К. Способ измельчения руд и минералов. Патент Кыргызской Республики: № 1503, зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Кыргызской Республики 31.10.2012 г.

6. Ильницкая Е.И., Тедер Р.И., Ватолин Е.С., Кунтыш М.Ф. Свойства горных пород и методы их определения. – М.: Недра, 1969. – 452 с. **ГИАС**

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Тажигаев Кушбакали Тажибаевич¹ – доктор технических наук, профессор, зав. лабораторией, e-mail: kushbak@yandex.ru,
Институт геомеханики и освоения недр НАН КР,
Кыргызская Республика, Бишкек,
Султаналиева Рая Мамакеевна – кандидат физико-математических наук, доцент, зав. кафедрой,
Кыргызский государственный технический университет,
Кыргызская республика, Бишкек, e-mail: raia-ktu@mail.ru.

UDC 622.02. (075.8); 622.733)

POWER SAVING UP WAY OF CRUSHING OF STRONG ORES

Tazhibaev K. T.¹, Doctor of Technical Sciences, Professor,
Head of Laboratory, e-mail: kushbak@yandex.ru,
Institute of Geomechanics and Development of Bowels
of National Academy of Sciences of Kyrgyz Republic,
720052, Bishkek, Kyrgyz Republic,
Sultanalieva R.M., Candidate of Physical and Mathematical Sciences,
Assistant Professor, Head of Chair, e-mail: raia-ktu@mail.ru,
Kyrgyz State Technical University, Bishkek, Kyrgyz Republic.

The way of an optimum loss of strength and crushing of the strong ores is experimentally proved, allowing to provide economy of energy at crushing, decrease of the charge of metal at the expense of decrease of deterioration of metal parts of crumbers, increase in an exit of a useful component (taken metal) by application of optimum duration of affecting on ore of the microwave oven of waves. Difference of a way consists that before crushing subject ore to affecting of the microwave oven by electromagnetic waves with different duration. Irradiated with the microwave oven waves each small group and small group in not irradiated condition separately comminute in an impact tension machine by means of a free-fall cargo and define specific power consumption of crushing of ore for each duration of the microwave oven of affecting and an initial state. From the schedule «specific power consumption of crushing – duration of a time of affecting of the microwave oven of waves» define optimum value of duration of affecting of the microwave oven the waves, matching to the minimum value specific power consumption of crushing of the given ore. Behind that on the installed optimum duration of bombarding radiation of the microwave oven waves affect ore and a mineral of the given type and a size of the pieces which are subject to crushing, after bombarding radiation of the microwave oven by waves ore or mineral crushing spend in percussion crumbers.

Key words: ore, mineral, crushing, microwave oven the wave, residual stress, thermopressure, power consumption, dehardening.

REFERENCES

1. Moskalev A.N. *Copyright certificate USSR no 724731*, kl. E21S 37/18, 1977.
2. Abkin E.B. *Obogashchenie rud*. 1986, no 6, pp. 2–5.
3. Novik G.Ya., Zil'bershmidt M.G. *Upravlenie svoystvami porod v protsessakh gornogo proizvodstva* (Controlling properties of rocks in mining), Moscow, Nedra, 1994.
4. Zetser Yu.I. *Vsesoyuznaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya «Primenenie SVCh-energii v tekhnologich. protsessakh i nauchnykh issledovaniyakh». Tezisy dokladov* (All-Union Conference on Microwave Energy Application in Technological Processes and Scientific Research. Head-notes of papers), Saratov, 1991, pp. 98–100.
5. Tazhibaev K.T., Sultanalieva R.M., Akmatolieva M.S., Tazhibaev D.K. *Patent of Kyrgyz Republic no 1503*, 31.10.2012.
6. Il'nitskaya E.I., Teder R.I., Vatolin E.S., Kuntyshev M.F. *Svoystva gornyykh porod i metody ikh opredeleniya* (Properties of rocks and methods of determination), Moscow, Nedra, 1969, 452 p.

