

ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФЕКТНОЙ СТРУКТУРЫ И ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ СКАЛЬНЫХ ПОРОД ДЛЯ ОЦЕНКИ ИХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ

При разрушении скальных горных пород наиболее перспективным направлением является применение экологически чистых технологий с использованием электромагнитных полей, которые способны влиять на физическо-механическое состояние горной породы.

Рассмотрен механизм разрушения скальных пород на основе учета естественных и наведенных трещин, прочности породы, структуры трещин и стадий разрушения, что позволяет определить эффективные режимы электромагнитного воздействия на различных технологических циклах отработки и снизить энергетические затраты.

The most perspective direction of destruction of rocky mountain breeds is the application ecologically of pure (clean) technologies with use of electromagnetic fields, which are capable to influence a physical and mechanical condition of mountain breed.

In work the mechanism of destruction of rocky breeds is considered on the basis of the account of the natural and induced cracks, durability of breed, structure of cracks and stages of destruction, which allow to ensure (supply) effective modes of electromagnetic influence on various work cycles of improvement and to lower their power expenses.

Разрушение нагруженных твердых тел (с любым типом межатомной связи, надатомной и дефектной структурой) является термоактивированным процессом, причем время ожидания разрушения при напряжении σ и абсолютной температуре T описывается формулой Журкова

$$\tau = \tau_0 \exp[(U_0 - \gamma\sigma)/(RT)], \quad (1)$$

где τ_0 – период собственных колебаний молекул в кристаллической решетке; U_0 – энергия активации; R – универсальная газовая постоянная; γ – структурный коэффициент.

Однако этот способ не позволяет оценить стадии разупрочнения скальной породы в процессе нагружения с учетом дефектной структуры, так как дальнейшие шаги связаны с исключением из формулы параметра γ .

Предлагаемый способ определения разупрочнения нагруженных при СВЧ-нагреве скальных горных пород позволяет устранить указанный недостаток и повысить эффективность разупрочнения скальных горных пород при добыче и переработке минерального сырья при оптимальных режимах

электромагнитного нагружения и обусловленного им развития микротрещиноватости.

Для построения графика температурной зависимости прочности сначала устанавливают количество n_0 и размер l_0 естественных микротрещин в единичном объеме образца породы в заданной точке, затем облучают образец в поле стоячих электромагнитных волн и определяют в этой же точке температуру нагрева и структуру дефектов, концентрацию n_i и размер l_i наведенных при нагружении микротрещин в данном интервале температур. Получив зависимость концентрации трещин от их размера, определяют коэффициент слияния трещин как отношение двух размеров трещин наибольшей концентрации, рассчитывают прочность σ . На основании графика температурной зависимости $\sigma = f(T)$ выделяют технологические стадии разупрочнения.

Ввиду различных свойств минеральных компонентов породы при СВЧ-нагреве наблюдается разница в температурах и коэффициентах термического расширения, воз-

никают различные по параметрам напряженные состояния, что усугубляется наличием структурной неоднородности и естественной трещиноватости, приводящим к появлению концентраций напряжений и развитию наведенной микротрещиноватости. В соответствии с кинетической теорией прочности концентрация наведенной трещиноватости приводит к изменению термокинетических параметров и изменению предела прочности породы.

С учетом трещиноватости прочность скальной породы описывается выражением кинетической теории прочности, в основе которой лежит формула (1). Термокинетические параметры в зависимости от концентрации трещин изменяются в соответствии с выражениями:

$$U_0 = U_{00}(N - n_i)^3 / (N - n_0)^3;$$

$$\gamma = \gamma_{00}(N - n_i)^2 / (N - n_0)^2,$$

где U_0 и γ – соответственно энергия активации и структурный коэффициент при наведенной концентрации трещин n_i ; U_{00} и γ_{00} – то же для естественной среды; N – предельная концентрация микротрещин, обеспечивающая разрушение; $(N - n_0)$ – количество микротрещин в единице объема, которые должны быть созданы в процессе воздейст-

вия электромагнитного поля для обеспечения разрушения.

Тогда прочность скальной породы σ с учетом наведенной трещиноватости

$$\sigma = U_{00} / \gamma_{00} [(N - n_i) / (N - n_0)] \times \\ \times [1 - RT / U_{00} [(N - n_0) / (N - n_i)]^3 \ln(\tau / \tau_0)].$$

При нагружении скальной породы происходит накопление мелких трещин до их некоторой критической концентрации $N = n_v$ в единице объема, после чего начинается их попарное слияние с образованием укрупненных трещин. Предельная концентрация трещин длиной l_i в единице объема $N = 1 / (k^3 l_i^3)$, где k – концентрационный параметр слияния трещин, т.е. отношение двух таких длин трещин l_2 и l_1 , при которых концентрация трещин наибольшая. Параметры l_2 и l_1 находят из графиков распределения трещин для данной температуры СВЧ-нагрева (рис.1). Тогда прочность породы

$$\sigma = U_{00} / \gamma_{00} \times \\ \times [1 / (l_2 / l_1)^3 l_i^3 - n_\tau] / [1 / (l_2 / l_1)^3 l_i^3 - n_0] \times \\ \times \{1 - RT / U_{00} \times \\ \times [(1 / (l_2 / l_1)^3 l_i^3 - n_0) / (1 / (l_2 / l_1)^3 l_i^3 - n_\tau)]^3 \times \\ \times \ln(\tau / \tau_0)\}, \quad (2)$$

где U_{00} – энергия активации разрушения до нагружения, Дж/моль; γ_{00} – активационный объем до нагружения, (Дж/моль) Па; R – универсальная постоянная, Дж/(моль·К); T – абсолютная температура, К; n_τ – количество всех трещин при нагружении на 1 м^3 ; n_0 – количество всех трещин до нагружения на 1 м^3 ; l_1 и l_2 – длина трещин, при которой наблюдается первый и второй максимум концентрации трещин соответственно, м; l_i – длина i -й трещины, соответствующая предельной концентрации трещин, м.

Определение прочности скальной породы при СВЧ-нагреве выполнялось с помощью установки частотой 2375 МГц с выходной мощностью 2 кВт. В результате СВЧ-воздействия на образец, установленный в поле стоячей волны $S = 45 \text{ Вт/см}^2$, обеспе-

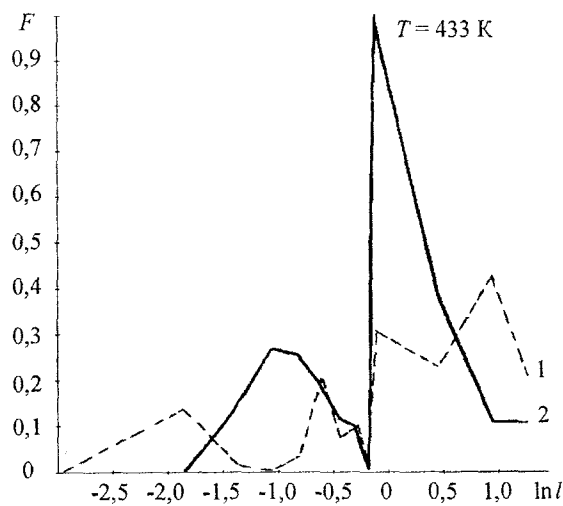


Рис.1. Распределение F трещин по длине до нагружения (1) и при СВЧ-нагреве (2)
1 – $n_0 = 235$; 2 – $n_\tau = 447$

чивалась плотность тепловых источников $q = 2,5 \text{ Вт/см}^3$.

Объектом исследования явились характерный для гранитов Ленинградской области гранит с размером зерен от 0,4 до 4,5 мм и следующим содержанием минералов, %: кварц 30, калиевый полевой шпат 50, плагиоклаз 10 и биотит 10. Образец гранита в виде бруска сечением $90 \times 45 \text{ мм}$ длиной 200 мм помещался в волноводный тракт.

Определение распределения концентрации трещин n_0 и n_l по длине l_0 и l_l осуществлялось с помощью микроскопа «Мир-2». Для определения кинетики развития трещин при СВЧ-нагреве предварительно определялась естественная трещиноватость образца (при 20°C) в единице объема в заданной точке (рис.1, кривая 1). Для сравнения вероятностей нахождения трещин, соответствующих двум интервалам измерений Δi_1 и Δi_2 , удобнее находить плотности вероятностей $f = \Delta n_l / \Delta i_{1,2} n_\Sigma$ и по величине $F = f l_i^2$ судить о том, трещины какой длины вносят основной вклад в разрушение.

После СВЧ-нагружения образца в течение времени t осуществлялось измерение температуры T образца гранита в той же заданной точке в единице объема с помощью термопары, вводимой в щель волноводного тракта, прорезанной по широкой стенке волновода. Установка нагрева включала термопару, подсоединенную к измерителю температуры ПСР-1.

Затем под микроскопом в заданной точке и единице объема определялась качественная структура дефектов: межзерновая трещиноватость, формирование субблоков, развитие макротрещин и развитие трещин по зерну.

После измерений распределения концентрации трещин n_l по размерам l_i при различных температурах СВЧ-нагрева (рис.1, кривая 2) рассчитывались концентрационный параметр слияния трещин $k = l_2 / l_1$ и предельная концентрация трещин длиной l_i в единице объема.

На основании графиков распределения концентрации наведенных микротрещин при СВЧ-нагреве определены концентрационный параметр слияния трещин $k(T)$ и кри-

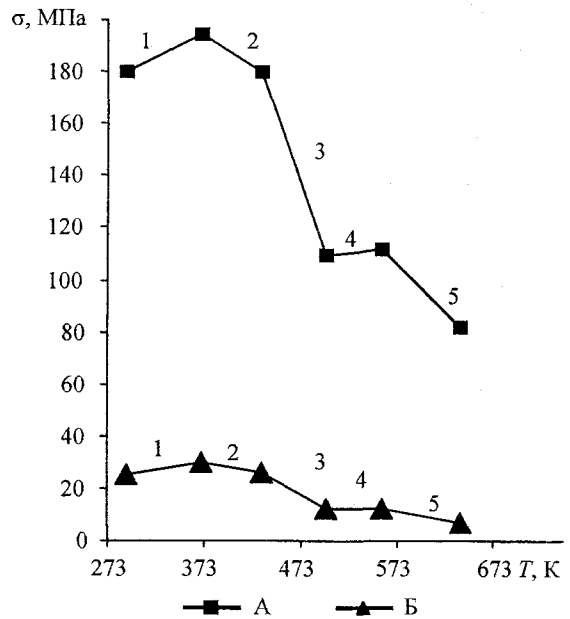


Рис.2. Зависимости пределов прочности гранита от температуры и концентрации микротрещин
А и Б – пределы прочности на сжатие ($\sigma_{сж}$) и растяжение ($\sigma_{рст}$) соответственно

тическая концентрация разрушения $N(T)$. Прочность σ гранита в заданной точке вычислялась по формуле (2) с учетом параметров трещиноватости. На основании расчетов получена температурная зависимость прочности $\sigma(T)$ (рис.2).

Анализ зависимости предела прочности от температуры СВЧ-нагрева позволяет выделить следующие характерные участки (рис.2):

- упрочнение гранита (участок 1) при низкотемпературном нагреве (до 370 К);
- снижение прочности гранита в интервале температур от 370 до 500 К за счет зарождения, роста и слияния более мелких трещин и перераспределения их к границам зерен с образованием межзерновой микротрещиноватости (участок 2);
- значительное снижение прочности гранита в интервале от 500 до 560 К, связанное с разделением зерен на блоки с малой областью концентрации трещин в результате их слияния (участок 3);
- разрушение, раскол образца гранита за счет развития макротрещин в пучностях электрического поля при температуре 560 К (участок 4);

• развитие всех видов микротрещин при 560-640 К (участок 5).

Характер разупрочнения и разрушения скальных горных пород определяется температурным режимом, формированием локальных зон нагрева и зон термоупругих напряжений и служит основой для решения различных технологических задач. Эффективность применения СВЧ-энергии определяется способностью породы поглощать электромагнитную энергию. Удельная мощность поглощения

$$P_{уд} = 2\pi f \epsilon' \operatorname{tg} \delta |E|^2,$$

где ϵ' – диэлектрическая проницаемость; $\operatorname{tg} \delta$ – тангенс угла диэлектрических потерь; f – частота; E – напряженность электрического поля.

В условиях квазиadiaбатического нагрева температура в заданной точке породы $T = P_{уд} t / C$, где t – время; C – объемная теплоемкость породы. На основании выполненных в работе исследований наведенной трещиноватости, структуры трещин и прочности породы выделены основные стадии электромагнитного разупрочнения (см. таблицу).

Для выделения чистых фракций минералов при селективной дезинтеграции рекомендуется вести обработку при температуре 375-500 К. В этом случае изменение напряженного состояния способствует образованию межзерновой трещиноватости, что вызывает разупрочнение зерен кварца по их границам и повышает селективность их рас-

крытия. Экспериментально установлено, что при обработке гранита в режиме первой стадии разделение на чистые фракции размером 1,4 мм составляет 98 %. При механическом дроблении чистота минеральных фракций достигает 80 % только во фракции размером 0-0,1 мм.

Стадии разупрочнения гранита при СВЧ-нагреве

Стадия	T, K	Структура дефектов	$\sigma_{сж}, MPa$	$\sigma_{раст}, MPa$	Технологический процесс
0	293-370	Частичное закрытие трещин и упрочнение породы	195	30	Сушка
1	370-500	Межзерновые трещины	180-110	26-13	Дезинтеграция
2	500-560	Формирование субблоков	110-112	12-12,4	Дробление
3	560-640	Развитие макротрещин	112	12	Дробление
4	640	Все виды трещин	112-82	12-7	Измельчение

При разделении минерального сырья на уровне минеральных агрегатов, с целью последующей отсортировки пустой породы, эффективность разупрочнения может быть достигнута в режиме второй стадии, где происходит формирование субблоков. При дроблении породы выбирается режим, соответствующий третьей стадии. Режим четвертой стадии разупрочнения используется в технологическом цикле измельчения.