Записки Ленинградского ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции
и ордена Трудового Красного Знамени горного института
им. Г.В.Плеханова, 1984, т. 99

УДК 550,622

МЕХАНИКА ПОВЕРХНОСТНОГО РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД В ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЯХ

А.П.ДМИТРИЕВ, В.Н.МОРОЗОВ

Использование тепловых потоков для разрушения горных пород нашло широкое применение в различных технологических процессах горного производства (бурение, расширение скважин, очистка рабочих органов от намерзающей массы, проходка и др.). Несмотря на различие природы используемых высокотемпературных полей (газовые струи, ИК-излучение и т.д.), общим является воздействие теплового потока на обнаженную поверхность горной породы – поверхностный слой. Интенсивность разрушения поверхностного слоя в конечном счете определяет эффективность термического воздействия на скальные горные породы.

Целью настоящей статьи является анализ некоторых аспектов неустойчивого состояния поверхностного слоя горных пород как макрополярных зернистых сред, составляющие которых способны к ротационным эффектам. Комбинированное воздействие интенсифицирует процесс разрушения и, вместе с тем, усложняет анализ модели. Мы ограничимся температурным воздействием на поверхность горных пород и рассмотрим неустойчивость поверхностного слоя, используя концепции термодинамики и кинетической теории прочности. Эта проблема связана с рядом практических задач использования горных пород в качестве строительного камня, в частности, с прогнозом устойчивости поверхности полированных декоративных плит, подверженных сезонным перепадам температуры.

В условиях теплового удара наблюдается интенсивный процесс разрушения поверхности скальных пород, сопровождающийся вылетом зерен и развитием зоны деструкции на глубину до двух-трех линейных размеров зерна. Отделение и вылет зерна с поверхности – единичный акт разрушения связей структурного элемента – механизм P_{I}.

При термическом расширении скважин или под воздействием ИК-нагревателей на поверхность забоя при проходке горных выработок отделяются плитки, геометрические размеры которых достигают нескольких сантиметров при толщине до 30 мм [3]. В этом случае отделяющийся от поверхности объем определяется свойствами горной породы, как статистически представительной совокупности структурных элементов. Назовем этот механизм разрушения P_{III}.

Механизм деструкции поверхности P_{II} соответствует отделению от поверхности «шелушек», содержащих от 100 до 1000 зерен. Сконцентрируем внимание на двух механизмах неустойчивости и разрушения поверхностного слоя P_{I} и P_{III}, полагая, что разрушение поверхности в виде шелушения (механизм P_{II}) соответствует синтезу двух процессов деструкции P_{I} и P_{III}.

Экспериментально установлено, что в условиях негидростатического напряженного состояния упругоанизотропные кристаллы (зерна) в горных породах занимают положение устойчивого равновесия, соответствующее максимуму упругой энергии Гельмгольца или минимуму свободной энергии Гиббса. Это условие записывается в виде [7]:

$$\Delta\left(\frac{1}{2}\int_V S_{ijkl}\sigma_{ij}\sigma_{kl}\,dv - \int_S p_{ij}U_i\,dS\right) = 0,$$

где первый член соответствует упругой энергии кристалла, второй – потенциальной энергии внешних сил, S_{ijkl} – компоненты тензора податливости кристалла; $\sigma_{ij,kl}$ – компоненты тензора напряжений; p_{ij}, U_i – соответственно сила, действующая по нормали к единичной поверхности, и смещение; v и S – объем и поверхность зерна.

Приращение упругой энергии Гельмгольца в положении устойчивого равновесия в изотермических условиях:

$$dF = -SdT + \sigma_{ij}\,d\varepsilon_{ij} = 0,$$

где S – энтропия системы. В условиях негидростатической деформации [8] устойчивое положение равновесия достигается при условии минимума упругой энергии Гельмгольца.

При воздействии теплового потока на поверхность поликристалла при $grad_{x,y}T \neq 0$ или $grad_2 T \neq 0$ зерна поверхностного слоя находятся в условиях стесненной, негидростатической деформации. В работе [8] показано, что в условиях "негидростатической деформации" кристалл занимает устойчивое положение равновесия, соответствующее минимуму свободной энергии Гельмгольца и максимуму свободной энергии Гиббса. Запасенная упругая энергия Гельмгольца совокупности зерен на поверхности слоя определяет неустойчивость поверхности с позиции термодинамики. Переход из неустойчивого состояния зерна в положение устойчивого равновесия возможен за счет поворота. Ротационные эффекты в поликристаллических горных породах при отжиге обнаружены экспериментально [6].

Рассмотрим поведение зерен в поверхностном слое кварцита и мрамора, относимых к хорошо- и плохотермобуримым породам соответственно [1]. На рис.1 приведены характеристические поверхности упругой податливости и теплового расширения αSiO_2 (рис.1,а) и $CaCO_3$ (рис.1,б) в плоскости x_2x_3 кристаллографической системы координат. Представим цепочку контактирующих зерен поверхности кварцита и мрамора, ориентированных таким образом, что направление плоскостей x_2x_3 у них совпадает. Это ограничение не исключает общности конечного вывода и удобно для рассмотрения. В этом случае, в отличие от поверхностного слоя кварцита, в мраморе локальная неустойчивость возникает за счет кристаллов, ось x_3 которых ориентирована вдоль поверхности и с отклонением от этого направления в пределах угла 2φ (рис.1,б). Любая другая ориентация кристаллов в плоскости x_2x_3 не вызывает увеличения линейных размеров цепочки в плоскости слоя (на рис.1,б заштрихована область, соответствующая отрицательному расширению кальцита).

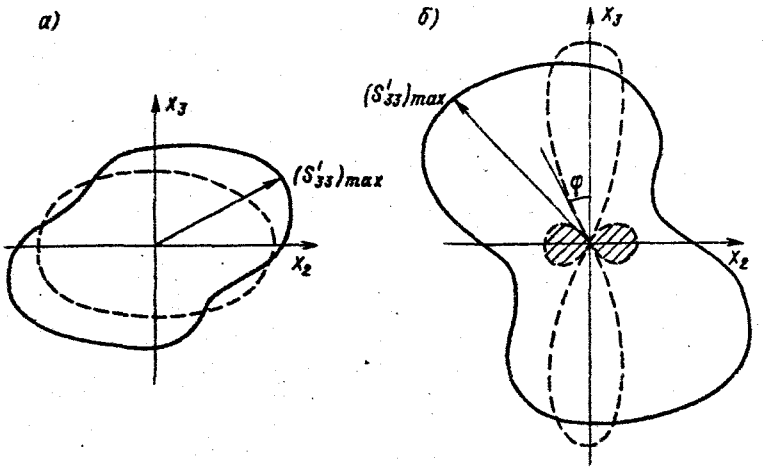


Рис.1. Сечения характеристических поверхностей упругой податливости и теплового расширения

Устойчивому состоянию кристалла (гексогонального и тригонального классов) в условиях стесненной деформации соответствует условие минимума величины [5]:

$$\frac{\alpha'_{33}}{S'_{33}} = \frac{\alpha_{11}C_{32}^2 + \alpha_{22}C_{33}^2}{S_{11}(1-C_{33}^2)^2 + S_{33}C_{33}^4 + (2S_{13}+S_{44})C_{44}^2(1-C_{33}^2) + 2S_{14}C_{32}^3C_{33}},$$

где α_{ij}, S_{ij} – компоненты тензоров теплового расширения и изотермической податливости.

При произвольной ориентации неустойчивость возникает в зернах, общее количество которых может быть определено как

$$N \leq \frac{2\varphi}{\pi} N_0,$$

где N_0 – общее количество зерен в цепочке. Запасенная энергия Гельмгольца может быть реализована в виде доворота зерна как целого, либо за счет дислокационных процессов в зерне (внутреннего вращения).

В поверхностном слое кварцита подавляющее большинство зерен находится в условиях неустойчивого равновесия. Энергия активации процесса разрушения зерен кварца значительно выше, чем у кальцита, и составляет соответственно $302{,}4\cdot10^3$ и $239{,}4\cdot10^3$ Дж/моль [2], это сдерживает диссипацию запасенной энергии в зернах кварца за счет дислокационных процессов. Таким образом, поворот зерна к положению устойчивого равновесия, сопровождающийся деструкцией межзерновой границы, обеспечивает отделение зерен от поверхности и вылет за счет упругой энергии деформации при нагреве. В частности, в рамках физической модели можно показать, что приращение энергии Гельмгольца в зернах кварца, ориентированных осью $(S_{33})_{min}$ значительно выше энергии деструкции межзерновой границы.

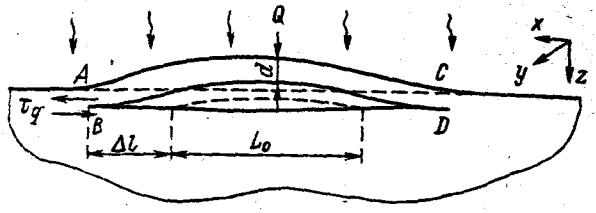


Рис.2. Модель отслоения плиток

С понижением интенсивности теплового потока, подводимого к поверхности забоя при ИК-нагреве, шелушение трансформируется в механизм отделения от поверхности плиток [3]. Остановимся на механизме процесса разрушения.

Необходимым и достаточным условием развития тангенциальных напряжений как функции расстояния от поверхности $\tau_q(z)$ (ось z ориентирована по нормали к поверхности) является условие $grad_z T \neq 0$. Положим, что в поверхностном слое существует или возникает дефект в виде трещины, параллельной поверхности (рис.2). Исходя из кинетических концепций разрушения, скорость подрастания трещины можно представить в виде

$$\frac{dL}{dt} = V_0 \exp\left[-\frac{U_0 - \gamma\tau_q}{RT}\right],$$

где U_0 – энергия активации разрушения; R – универсальная газовая постоянная; T – абсолютная температура; γ – структурный коэффициент; V_0 – коэффициент пропорциональности.

Общая длина трещины как функция времени в предположении, что $\tau_q(t)$ зависит от размеров трещины,

$$L(t) = L_0 + 2V_0 \int_0^t \exp\left[-\frac{U_0 - \gamma\tau_q(t)}{RT}\right] dt.$$

Полагая, что в слое $ABCD$ (рис.2) реализуется упругая неустойчивость Эйлера и отделение и вылет плиток от поверхности обусловлены критическим напряжением (по аналогии с упругой неустойчивостью стержня [4]), запишем:

$$\sigma_{xx} = kE(T)\left[L_0 + 2V_0 \int_0^{t^*} \exp\left[-\frac{U_0 - \gamma\tau_q(t)}{RT}\right] dt\right]^{-2},$$

где $E(T)$ – упругий модуль, зависящий от температуры; t^* – время, соответствующее моменту отслоения,

$$\bar{T} = \frac{1}{d}\int_0^d \frac{2q}{\lambda}(at^*)^{-1/2} \operatorname{ierfc} z(4at^*)^{-1/2} dz,$$

q – удельная мощность излучения; λ – теплопроводность; a – температуропроводность.

В предположении постоянства величины τ_q время до момента отслоения определяем как

$$t^* = \frac{1}{2V_0}\left[\left(\frac{\sigma_{xx}}{kE(T)}\right)^2 - L_0\right] \exp\left[\frac{U_0 - \gamma\tau_q}{R\bar{T}}\right];$$

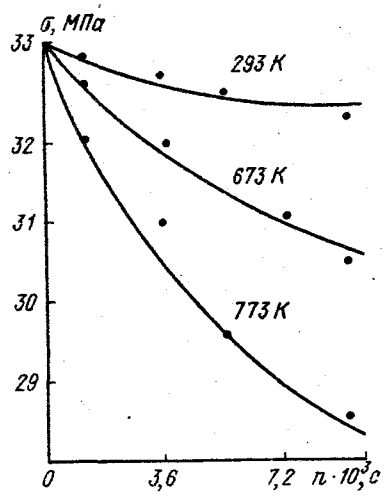


Рис.3. Релаксация напряжений в образцах песчаника

регулируемая скорость разрушения в зависимости от интенсивности теплового потока:

$$V = \frac{\alpha}{t^*} .$$

Приведенный механизм требует аналитически точного решения термоупругой задачи. Время как фактор, определяющий устойчивость поверхностного слоя, определяет и развитие релаксационных процессов. Скорость релаксации напряжений значительно возрастает в диапазоне высоких температур. В качестве примера на рис.3 приведены кривые релаксации напряжений в образцах песчаника в диапазоне температур до 773 К. Эксперимент выполнен на испытательной машине УМЭ-10ТМ, оснащенной температурной камерой до 1500 К.

Процесс релаксации напряжений удовлетворительно описывается механизмом переориентации зерен, определяющим продольную упругость образца $C_{33}(t)$:

$$\sigma_{33} = \left[< C_{33}(0) > - \Delta C_{33}(t) \right]_T \varepsilon_{33}(0) .$$

Функциональная связь с температурой в модели вязкого трения на межзерновых границах определяется вязкостью межзерновых границ $\eta = \eta_0 \exp(U_0/RT)$. Процесс релаксации напряжений сопровождается объемной деструкцией материала и поврежденность как функция времени может быть представлена в виде

$$\varkappa(t) = k' \int_0^t \Delta C_{33}(t) \varepsilon_{33}(0)\, dt + C_0 ,$$

где константа интегрирования C_0 соответствует первоначальной концентрации дефектов определенного размера. Управление процессами объемной деструкции отслаивающего материала при проходке может быть направлено на оптимизацию процессов рудоподготовки.

В зависимости от интенсивности теплового потока при сбалансированной конкурентоспособности механизмов P_I и P_{III} следует ожидать отслоения горных пород в виде шелушек, геометрические размеры которых занимают промежуточное положение между зерном и плитчатой отдельностью.

Отслоение от поверхности и резкое воздействие температуры на новую поверхность сопровождается еще не исследованными динамическими эффектами разрушения за счет $\sigma_{22} \neq 0$.

Предоставляется целесообразной дальнейшая разработка нетрадиционных моделей разрушения горных пород как макронеоднородных зернистых сред.

В рамках представлений о механике разрушения горных пород как сплошных однородных сред вряд ли возможно дальнейшее эффективное совершенствование методов физического воздействия на горные породы как с целью разрушения, так и в процессах рудоподготовки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дмитриев А.П., Гончаров С.А. Термическое и комбинированное разрушение горных пород. М., Недра, 1979.

2. Дмитриев А.П., Морозов В.Н., Новик Г.Я. Энтальпия породообразующих минералов как показатель прочности горных пород. – ДАН СССР, т. 248, 1979, № 5.

3. Кузнецов В.В., Протасов Ю.И. Разрушение горных пород инфракрасным излучением. М., Недра, 1979.

4. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теория упругости. М., Наука, 1965.

5. Морозов В.Н. Ротационные эффекты в горных породах в тепловом и электромагнитном полях. – Геология и разведка, 1982, № 1.

6. Флин Д. Деформация при метаморфизме. – В кн.: Природа метаморфизма. М., Мир, 1967.

7. MacDonald G.S.F. – Geol. Sos. Am. Mem. 79, 1960.

8. Kumazawa M. – S. Geoph. Res. 1961, vol.66, N 11.