

С.В.СУКНЁВ, д-р техн. наук, заведующий лабораторией, suknyov@igds.ysn.ru

М.Д.НОВОПАШИН, д-р техн. наук, профессор, igds@ysn.ru

Институт горного дела Севера СО РАН, Якутск

S.V.SUKNYOV, Dr. in eng. sc., head of laboratory, suknyov@igds.ysn.ru

M.D.NOVOHASHIN, Dr. in eng. sc., professor, igds@ysn.ru

Institute of Mining Art of the North, SO RAS, Yakutsk

УЧЕТ ГРАДИЕНТОВ НАПРЯЖЕНИЙ В МАССИВЕ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ГОРНЫХ СООРУЖЕНИЙ

На основе градиентного подхода разрабатываются критерии образования сдвиговых трещин и трещин отрыва при сжатии в условиях концентрации напряжений вблизи горных выработок. С учетом масштабного эффекта определен вид функции локальной прочности, получены выражения для критического давления, проведено сопоставление результатов расчета с экспериментальными данными.

Ключевые слова: сдвиговые трещины, трещины отрыва, предельное состояние напряжения, масштабный эффект, функция локальной прочности.

ACCOUNT OF STRESS GRADIENTS IN ROCK MASS IN DESIGNING OF MINING CONSTRUCTIONS

Using the gradient approach the criteria of shear and tensile cracking are developed in compression under conditions of stress concentrations near mine workings. Considering the size effect, a function type of local strength is determined, expressions for critical pressure are derived and comparison between analytical and experimental data is performed.

Key words: displacement fractures, rupture fractures, ultimate state of stress, scale effect, function of local strength.

Проектирование горных сооружений предполагает проведение соответствующих расчетов на прочность, для чего необходимо знать напряженное состояние породного массива и прочностные характеристики слагающих пород. Поскольку распределение напряжений в массиве горных пород неравномерно, разрушение начинается в зонах их концентрации вблизи пустот и горных выработок. Механическое поведение горных пород при неравномерном распределении напряжений характеризуется зависимостью локальной прочности от величины нагруженного объема (масштабный фактор). Наиболее сильно масштабный эффект проявляется в условиях концентрации напря-

жений, когда эффективный нагруженный объем определяется размером зоны концентрации напряжений, образующейся вблизи пустот, выработок, скважин и т.п. Поэтому при проектировании горных сооружений необходимо учитывать влияние неоднородности распределения (градиентов) напряжений на величину критических давлений. С этой целью в настоящей работе разрабатываются критерии предельного состояния на основе градиентного подхода [1], в соответствии с которым вводится понятие локальной прочности материала [2], зависящей от размера зоны концентрации напряжений L_e , а также от характерного размера структуры материала L_0 .

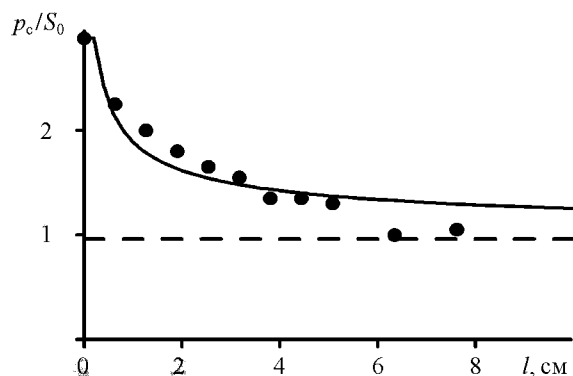


Рис.1. Зависимость критического давления от диаметра отверстия по формуле (1)

Если размер L_e достаточно велик по сравнению с размерами структурных составляющих материала, включая допустимые дефекты структуры, то величина локальной прочности мало отличается от величины предельного напряжения σ_0 , которое используется в традиционных критериях предельного состояния. Наоборот, если L_e сопоставимо с размерами структурных элементов, их влияние на локальную прочность становится заметным. Причем это влияние тем больше, чем меньше размер L_e по отношению к характерному размеру структуры материала L_0 . Таким образом, локальная прочность материала зависит не просто от размера зоны концентрации напряжений L_e , а от соотношения L_0/L_e , которое и определяет масштаб в рассматриваемой задаче. С учетом этого условие локальной прочности представляется в виде $\sigma_e < f(\sigma_0, L_0/L_e)$, где σ_e – эквивалентное напряжение, определяемое видом критерия предельного состояния, которому подчиняется материал в условиях однородного поля напряжений; $f(\sigma_0, L_0/L_e)$ – функция локальной прочности, которая определяется с учетом дополнительных условий, отражающих специфику рассматриваемой задачи. Выполнение условия локальной прочности характеризует сопротивление материала (горного массива) образованию трещин различного типа и является основой проектирования горных сооружений при неравномерном распределении напряжений.

Рассмотрим применение градиентного подхода для оценки критических давлений, соответствующих образованию сдвиговых трещин и трещин отрыва вокруг выработки эллиптического профиля.

Критерий образования сдвиговых трещин. Функция локальной прочности для данной задачи имеет вид [1]

$$f(\sigma_0, L_0/L_e) = \sigma_0 \left(1 + \sqrt{L_0/L_e}\right),$$

где $L_e = \sigma_e / |\text{grad } \sigma_e|$.

При однородном распределении напряжений материал подчиняется критерию прочности Кулона. Критическое давление, при котором на контуре выработки эллиптического профиля возникают сдвиговые трещины, определяется выражением

$$p_c = 2S_0 \frac{1 + \sqrt{\frac{L_0}{\rho} \left(2 + \frac{1}{1 + 2\sqrt{a/\rho}}\right)}}{((\mu^2 + 1)^{1/2} - \mu)(1 + 2\sqrt{a/\rho})}, \quad (1)$$

где a – полудлина эллиптического профиля в опасном сечении, проходящем через точки концентрации напряжений; ρ – радиус кривизны контура выработки в этих точках; μ – коэффициент внутреннего трения материала; S_0 – прочность на сдвиг.

Выражение (1) хорошо описывает известные экспериментальные данные [4], полученные на образцах из гипса с различными эллиптическими отверстиями при одноосном сжатии. На рис.1 представлены экспериментальные значения p_c (точки) и результаты расчета по формуле (1) (сплошная кривая) для отверстий круговой формы ($\rho = a$) различного диаметра $l = 2a$. Штриховая прямая рассчитана без учета градиентов напряжений.

Критерий образования трещин отрыва. Функция локальной прочности в этом случае имеет вид [3]

$$f(\sigma_0, L_0/L_e) = \sigma_0 \left(1 + (L_0/L_e)^n\right),$$

где $L_e = \sigma_e / |\text{grad } \sigma_e|$.

В отличие от случая образования сдвиговых трещин показатель степени n является

характеристикой материала и определяется экспериментально. При однородном распределении напряжений материал подчиняется критерию наибольших нормальных напряжений. Критическое давление, при котором на контуре выработки эллиптического профиля возникают трещины отрыва, определяется выражением

$$p_c = C_0 \left[\chi + \left(\frac{l_c}{l} \right)^n (1 - \chi) \right], \quad l > l_c, \quad (2)$$

где $\chi = T_0 / C_0$ – параметр хрупкости; T_0 – прочность на растяжение; C_0 – прочность на сжатие; l_c – критический размер выработки; при $l < l_c$ трещины отрыва не образуются, поскольку рост критического давления в данном случае ограничен прочностью материала на сжатие.

Выражение (2) хорошо описывает известные экспериментальные данные [5], полученные на образцах горных пород (доломитовый известняк, поташ, гранит) при одноосном сжатии. На рис.2 представлены экспериментальные значения p_c (точки) и результаты расчета по формуле (2) (сплошная кривая) для отверстий круговой формы различного диаметра l в граните. Штриховая прямая рассчитана без учета градиентов напряжений.

Таким образом, наступление предельного состояния в зонах концентрации напряжений хорошо описывается градиентным критерием, который учитывает влияние градиентов напряжений на локальную прочность материала. Масштабный эффект локальной прочности должен учитываться при проектировании горных сооружений, а также при оценке напряженного и предельного состояния породного массива.

Работа выполнена при финансовой поддержке Президиума РАН (программа № 11) и Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 09-08-00017).

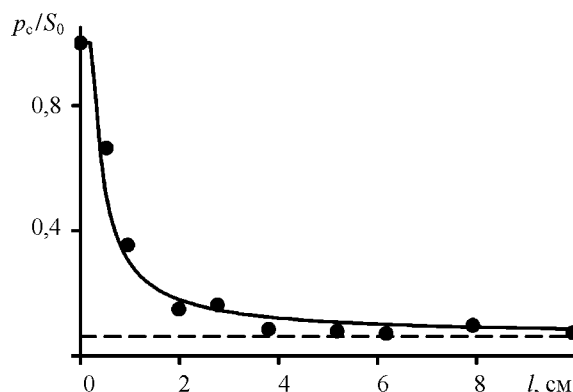


Рис.2. Зависимость критического давления от диаметра отверстия по формуле (2)

ЛИТЕРАТУРА

1. Сукнёв С.В. Применение градиентного подхода для оценки прочности горных пород / С.В.Сукнёв, М.Д.Новопашин // ФТПРПИ. 1999. № 4. С.54-60.
2. Сукнёв С.В. Определение локальных механических свойств материалов / С.В.Сукнёв, М.Д.Новопашин // ДАН. 2000. Т.373. № 1. С.48-50.
3. Сукнёв С.В. Критерий образования трещин отрыва в горных породах при сжатии / С.В.Сукнёв, М.Д.Новопашин // ФТПРПИ. 2003. № 2. С.30-37.
4. Nesetova V. Fracture from compressive stress concentrations around elastic flaws / V.Nesetova, E.Z.Lajtai // Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. 1973. Vol.10. P.265-284.
5. Carter B.J. Tensile fracture from circular cavities loaded in compression / B.J.Carter, E.Z.Lajtai, Y. Yuan // Int. J. Fract. 1992. Vol.57. № 3. P.221-236.

REFERENCES

1. Suknyov S.V. Application of the gradient approach for assessment of rock strength / S.V.Suknyov, M.D.Novopashin // FTPRPI. 1999. № 4. P. 54-60.
2. Suknyov S.V. Determination of local mechanical properties of the materials / S.V.Suknyov, M.D.Novopashin // DAS. 2000. Vol.373. № 1. P.48-50.
3. Suknyov S.V. Criterion of formation of rupture fractures in rocks under compression conditions / S.V.Suknyov, M.D.Novopashin // FTPRPI. 2003. № 2. P.30-37.
4. Nesetova V. Fracture from compressive stress concentrations around elastic flaws / V.Nesetova, E.Z.Lajtai // Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. 1973. Vol.10. P.265-284.
5. Carter B.J. Tensile fracture from circular cavities loaded in compression / B.J.Carter, E.Z.Lajtai, Y. Yuan // Int. J. Fract. 1992. Vol.57. № 3. P.221-236.