

УДК 622.831

Напряжённое состояние горных пород в окрестности радиальных ветвящихся трещин

С.Н. Савченко

Горный институт КНЦ РАН

Аннотация. Показано, что в окрестности кончиков исходных радиальных трещин величины растягивающих напряжений и их направления таковы, что возможно ветвление трещин в процессе их дальнейшего роста. Смыкание ветвей в результате разрушения барьеров между ними может приводить к дроблению горных пород.

Abstract. It has been proved that in the vicinity of initial radial fissures tips the magnitudes of tensile stresses and their directions are such that fissure branching in the process of their following growth is possible. Closing of branches in the result of the walls fracturing between them can result in rocks crushing.

Ключевые слова: напряжённое состояние, неоднородности горных пород, ветвление трещин
Key words: stress state, rock discontinuity, fissure branching

1. Введение

Прочность реальных горных пород определяется не только их физико-механическими характеристиками (модуль Юнга, коэффициент Пуассона), но и их строением. В структурах массивов горных пород всегда присутствуют неоднородности – различного рода включения, границы зёрен и блоков, микро- и макротрещины и т.д. В окрестности таких неоднородностей возникают концентрации напряжений (не только сжимающих, но и растягивающих), что приводит к образованию новых и развитию существующих трещин в массиве.

Начиная со второй половины прошлого столетия широкое развитие получила динамика хрупкого разрушения твёрдых деформируемых сред (Панасюк, 1968; Партон, Борисковский, 1988). Особую актуальность это направление приобретает в связи со значительным использованием взрывных работ в народном хозяйстве, которые достигли наибольшего объёма в горнодобывающей промышленности (взрывная отбойка, вскрытие месторождений, сейсморазведка и т.д.). Взрывные работы используются также в строительстве, водном хозяйстве, металлургической промышленности.

В процессе взрывания в результате действия высокого давления продуктов детонации, усиливающегося вблизи естественных концентраторов (неоднородностей), возникают и эволюционируют трещины, следствием чего является локальное, или полное разрушение горных пород в некотором объёме.

Изучение закономерностей распределения напряжений в окрестности трещин при различных граничных условиях имеет важное практическое значение в вопросах понимания процесса разрушения, например, разрушения барьерных перемычек между разрывами (Савченко, Козырев, 2010), горных ударов, техногенных и естественных землетрясений (Савченко и др., 2004; Эйби, 1982), образования блочных структур (Савченко, 1993) и др.

2. Постановка задачи

Рассматривается упругая изотропная плоскость с системой одинаковых радиальных трещин единичной длины (L), располагаемых симметрично относительно осей декартовой системы координат под углом 45° между трещинами. Максимальное раскрытие трещин на протяжении 80 % их длины составляет $d = 0.02L$, угол смыкания берегов трещин в их концевых областях $\alpha \approx 6^\circ$. На границах трещин действует равномерно распределённое нормальное давление (P), имитирующее давление продуктов взрывания. Такая ситуация может возникнуть, например, при взрывании одиночного скважинного заряда.

Далее предполагается, что в некоторый момент времени магистральные радиальные трещины разветвляются. Разветвление начинается в кончиках магистральных трещин и каждая трещина имеет три ветви, одна из которых является продолжением магистральной, а две другие располагаются под углами 45° симметрично относительно первой. Длина каждой ветви $l = L/2$. Раскрытие ветвей и магистральной трещины остаётся прежним, т.е. $d = 0.02L$, угол смыкания берегов ветвей также составляет $\alpha \approx 6^\circ$, а на

границах магистральных трещин и их ветвей действует равномерно распределённое нормальное давление P .

Таким образом, рассматривается распределение напряжений в два некоторых мгновения идеального процесса развития трещин в результате взрыва одиночного заряда.

Исследование выполнено методом граничных элементов.

3. Результаты численного моделирования

Решение задачи о распределении напряжений в бесконечной плоскости, ослабленной круговым отверстием, на контуре которого приложено равномерное нормальное давление, имеет вид (Мухомелишвили, 1966):

$$\sigma_r = -\frac{PR^2}{r^2}, \quad \sigma_\theta = \frac{PR^2}{r^2}, \quad \tau_{r\theta} = 0, \quad (1)$$

где σ_r , σ_θ , $\tau_{r\theta}$ – соответственно радиальные, тангенциальные и касательные напряжения; R – радиус кругового отверстия; r – радиальное расстояние от центра отверстия до исследуемой точки; P – величина нормального давления, приложенного к обводу кругового отверстия; "-" – сжатие, а "+" – растяжение.

Из (1) следует, что на контуре кругового отверстия действуют растягивающие тангенциальные напряжения, а это, в свою очередь, означает то, что любая, даже незначительных размеров неоднородность, может послужить причиной возникновения трещины отрыва, как только растягивающие напряжения будут больше предела прочности пород при одноосном растяжении.

Будем предполагать, что на контуре кругового отверстия изначально были созданы условия (при бурении отверстия для размещения ВВ) для возникновения и развития радиальных, симметрично расположенных трещин, и в процессе роста они достигли одинаковой длины L .

На рис. 1а приведено распределение относительного главного напряжения σ_1/P . Так как модель симметрична относительно осей декартовой системы координат, то на рисунке показана лишь четвертая часть расчётной области. Расчёты свидетельствуют о том, что в концевых областях трещин действуют растягивающие напряжения (пунктирные изолинии), величина которых достигает значений $\sigma_1=P$, а в непосредственной близости концевой области их интенсивность составляет $(1.7-1.8)P$. При этом растягивающие напряжения распространяются на расстояния порядка $(2.5-3)L$, где $\sigma_1 \leq 0.1P$. В основной части массива между магистральными трещинами напряжения σ_1 – сжимающие (сплошные изолинии), и лишь вблизи центра взрыва на расстоянии $(3-4)$ радиусов заряда действуют растягивающие σ_1 .

Главные напряжения σ_2 всюду сжимающие (рис. 1б). Их величина изменяется от $(1.25-1.5)P$ вблизи концевых областей до $0.75P$ в массиве между трещинами, а вдали от концевых областей, на расстоянии $(2-2.5)L$, они уменьшаются до $0.1P$. В малой зоне ($\approx 0.1L$) на продолжении трещин напряжения σ_2 – растягивающие, и их величина не превышает $0.5P$.

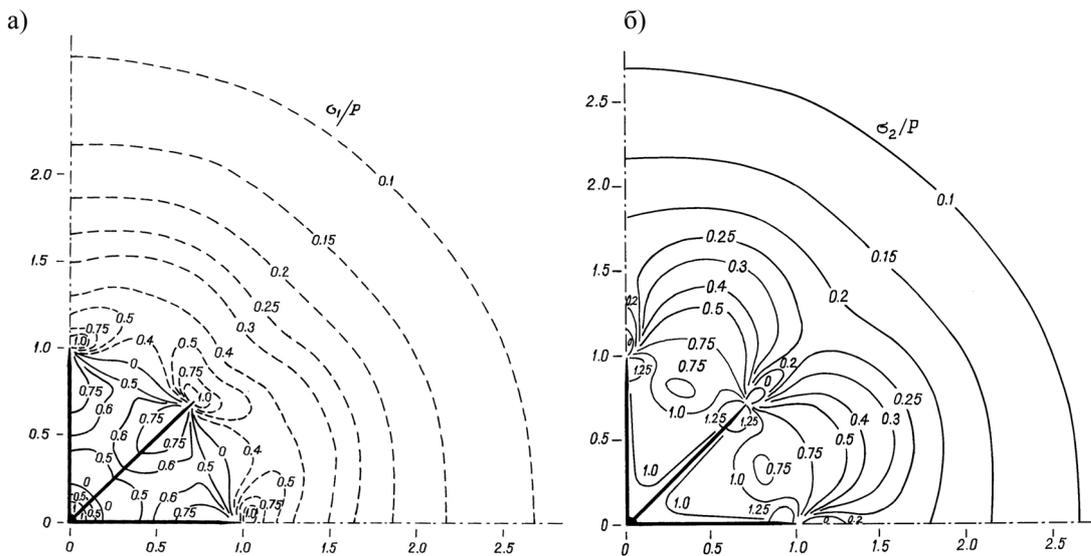


Рис. 1. Распределение относительных главных напряжений σ_1/P (а) и σ_2/P в окрестности радиальных трещин единичной длины

В (Партон, Борисковский, 1988) показано, что "для всех значений нагрузок ветвление наступает при одном и том же значении энергии разрушения". Динамический коэффициент интенсивности напряжений определяется выражением:

$$K \approx \sigma_n \sqrt{\pi L}, \quad (2)$$

где σ_n – величина действующей нагрузки (в наших обозначениях $\sigma_n = P$), L – длина магистральной трещины до начала ветвления. Полагая $L = 1$, получаем $K = P\sqrt{\pi} = 1.77P$. Следовательно, согласно этому критерию, в нашем случае ветвление вполне возможно, так как величина растягивающих напряжений вблизи кончика трещины, полученная на основании численного моделирования, $\sigma_1 = (1.7-1.8)P$.

На рис. 2 показана ориентация растягивающих главных напряжений в области действия их максимальных величин. Здесь же пунктирными линиями изображены траектории наиболее вероятного распространения ветвей при условии неизменности величины и направления напряжений в процессе роста ветвей. В действительности эволюционный процесс ветвления достаточно сложный и зависит от множества факторов, а окончательная форма ветвей также неоднозначна.

Для простоты подготовки исходной информации дальнейших исследований будем полагать, что форма ветвей прямолинейна, ветвление состоит их трёх ветвей, одна из которых является продолжением магистральной трещины, а две другие ветви располагаются симметрично относительно первой под углом 45° .

1.5 –

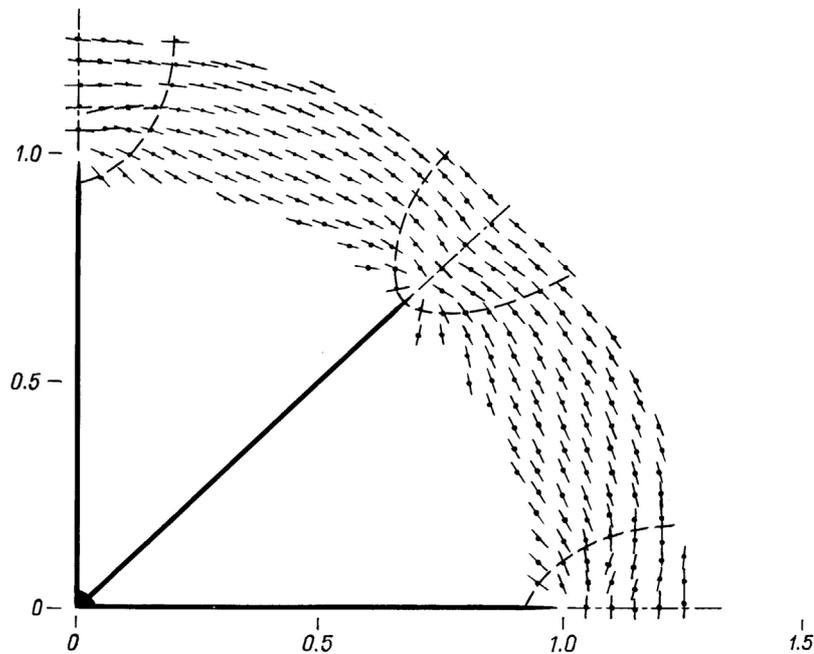


Рис. 2. Ориентация главных напряжений σ_1/P в окрестности радиальных трещин

На рис. 3а показано распределение относительных главных напряжений, где σ_1/P для варианта модели, когда длина ветвей составляет половину длины магистральных трещин. Из этого рисунка следует, что в зонах перед ветвями напряжения σ_1 – растягивающие, причём в окрестности кончиков ветвей, являющихся продолжением магистральных трещин, их величина наибольшая и достигает значений $\approx (1.25-1.5)P$. В окрестности кончиков двух других ветвей величины растягивающих напряжений σ_1 значительно меньше $\approx (0.5-0.7)P$. В массиве между ветвями и магистральными трещинами напряжения σ_1 – сжимающие от 0 до $0.75P$. Напряжения σ_2 во всей исследуемой области являются сжимающими (рис. 3б). В малой окрестности кончиков ветвей, являющихся продолжением магистральных трещин, σ_2 – растягивающие и по величине не превосходят $0.25P$. Вблизи кончиков двух других ветвей при этом напряжения σ_2 – сжимающие и близки к нулю.

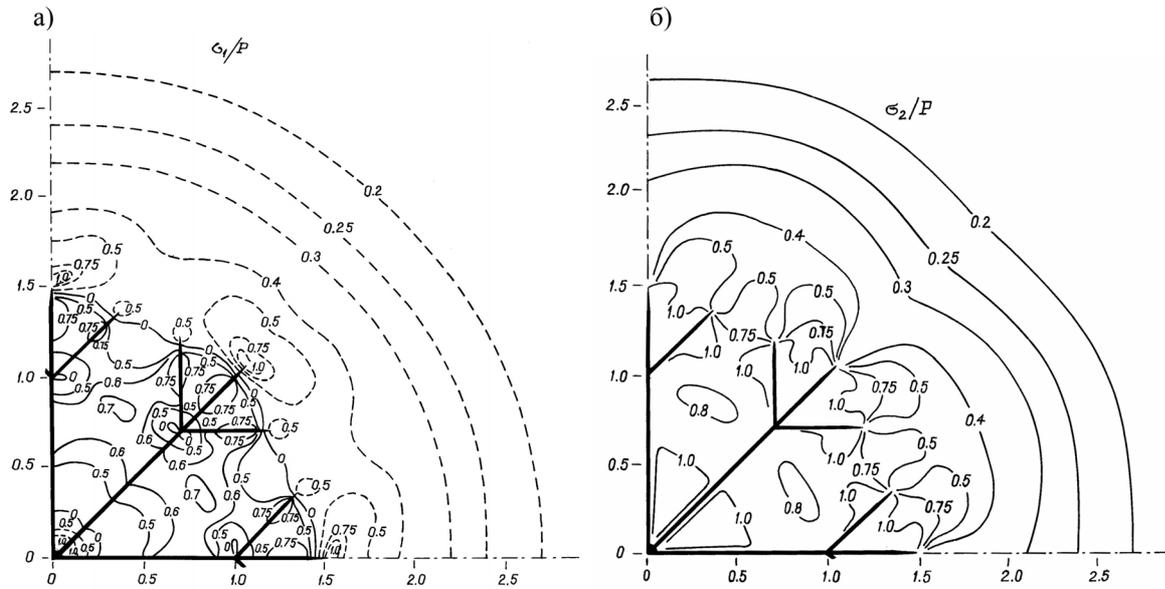


Рис. 3. Распределение относительных главных напряжений σ_1/P (а) и σ_2/P (б) в окрестности радиальных ветвящихся трещин

Отсюда следует, что, если дальнейшее ветвление возможно, то оно наиболее вероятно произойдёт на ветвях, являющихся продолжением магистральных трещин.

4. Заключение

Таким образом, начало роста трещин при взрыве происходит в результате действия растягивающих напряжений, возникающих вблизи естественных (или техногенных) трещин и других неоднородностей. Вследствие высоких концентраций этих напряжений в окрестности кончиков трещин и ряда других благоприятных (для развития трещин) условий возможно ветвление магистральных трещин.

Взаимодействие ветвящихся трещин (смыкание ветвей в результате разрушения барьеров между ними) может приводить к дроблению горной породы.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 09-05-00007).

Литература

- Мусхелишвили Н.И. Некоторые основные задачи математической теории упругости. М., Наука, 708 с., 1966.
- Панасюк В.В. Предельное равновесие хрупких тел с трещинами. Киев, Наукова думка, 246 с., 1968.
- Партон В.З., Борисковский В.Г. Динамика хрупкого разрушения. М., Машиностроение, 240 с., 1988.
- Савченко С.Н. Система случайно ориентированных трещин в поле сжимающих сил. ФТПРПИ, № 1, с.50-56, 1993.
- Савченко С.Н., Козырев А.А. Напряжённое состояние горных пород в системе "разрыв-барьер-разрыв". Вестник Кольского научного центра РАН, № 1, с.9-15, 2010.
- Савченко С.Н., Ловчиков А.В., Козырев А.А. Ретроспективный анализ очага техногенного землетрясения на руднике "Умбозеро" 17.08.1999 г. Тр. Межд. совещания "Техногенная сейсмичность при горных работах: модели очагов, прогноз, профилактика", 14-15 апреля 2004, Кировск. Апатиты, КНЦ РАН, ч.1, с.170-179, 2004.
- Эйби Дж.А. Землетрясения. Перевод с англ. Б.Г. Слепцова, Н.М. Хайме. М., Недра, 264 с., 1982.