

УДК 553.061.4:620.173.24

А.В. Данилов, А.С. Маторин

МЕХАНИЗМ И СТАДИИ РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД

Приведен алгоритм разрушения горных пород, сделаны математические расчеты параметров разрушения.

Ключевые слова: массив горной породы, макротрещины, разрушение горных пород, концентрации напряжений.

Семинар № 4

A.V. Danilov, A.S. Matorin THE MECHANISM AND THE STAGES OF THE ROCK DESTRUCTION

The algorithm of the rock destruction is presented, the mathematical calculations of the destruction parameters are conducted.

Key words: rock mass, macrocracks, rock destruction, stress concentration.

Экспериментальное изучение поведения горных пород под нагрузкой при линейном растяжении или сжатии и при срезе (сколе) даёт наглядное представление о сопротивлении пород хрупкому или вязкому разрушению и позволяет определить главные механические характеристики упругих и пластических деформаций.

Существуют два различных представления о разрушении горных пород: 1) как о явлении отрыва, обусловленном деформациями удлинения или преимущественно действием нормальных растягивающих напряжений, и 2) как о явлении среза или скалывания, обусловленного преимущественно действием касательных напряжений, известны уже давно. Исходя из этих представлений различают и два вида сопротивления пород разрушению: сопротивление отрыву и сопротивление скалыванию. Скол является более сложным видом разру-

шения, чем отрыв, так как ему обычно предшествуют значительные пластические деформации, вызывающие перераспределение напряжений. В последние десятилетия в теории сопротивления материалов выдвинуто экспериментально обоснованное предположение, что каждый материал в зависимости от того, в какие условия он будет поставлен, может разрушаться как путём отрыва, так и путём скола [1].

Массив горной породы в природе разрушается зачастую без потери несущей способности в силу условий стеснения, не позволяющих развиваться большим деформациям в массиве или разъединяться вновь образованным его частям. Разрушению могут предшествовать потеря устойчивости как геометрическая, так и реологическая, подрастание макротрещин в массиве или неустойчивое лавинообразное накопление микроповреждений, но эти явления могут и сопутствовать друг другу. Процесс разрушения массива изображен схемой, представленной на рис. 1. В зависимости от геометрии массива, механических свойств горной породы и условий нагружения возможен тот или иной путь по диаграмме. Введенное выше определение разрушения как разделение объема породы на части касается

Схема разрушения массива горной породы

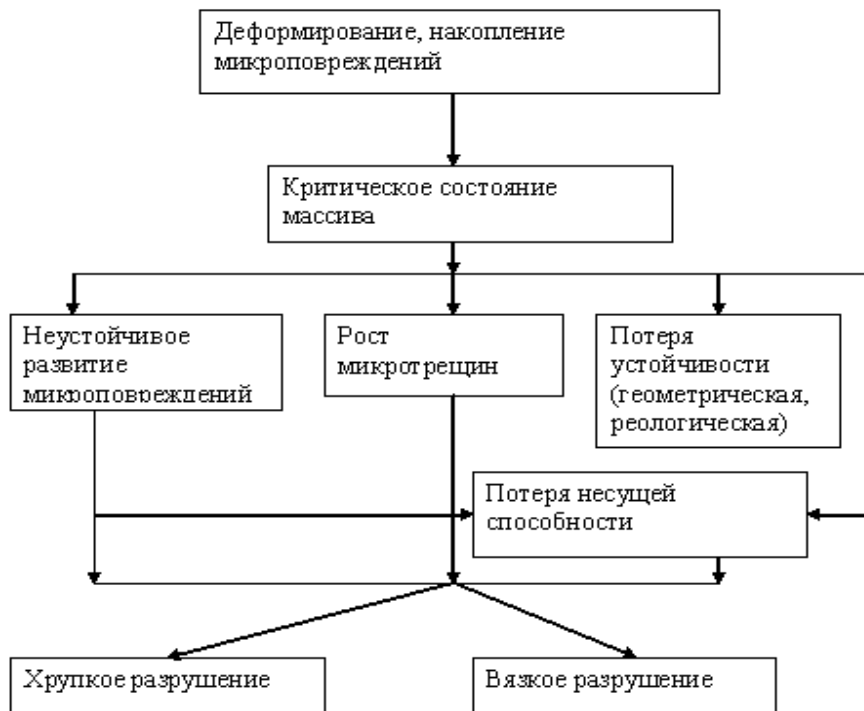


Рис. 1

фактически финального этапа разрушения. Процесс, однако, может закончиться в любом месте схемы. Вопрос о том, считать ли разрушившимся объем породы, если процесс разрушения не дошел до финальной стадии, требует особой оговорки, и в частности, этот объем можно считать ослабленным с целью разделения его на части или доразрушения другим способом воздействия.

В отличие от массива элемент материала горной породы (объем отдельности) как в докритическом состоянии, так и в процессе разрушения сохраняет однородность напряженно-деформированного состояния. Процесс разрушения элемента горной породы изображен схемой, представленной на рис. 2.

Для того, чтобы произошло разрушение, необходимо, чтобы микротрещина распространялась сквозь окружающие её зерна до тех пор, пока растущая трещина либо не разделит образец на части, либо не встретит другие растущие трещины. Как отметил автор работы [3] Авербах по поводу образования макроскопических трещин: с макроскопической точки зрения разрушение считается хрупким, если в условиях плоской деформации трещина развивается.

Выше было отмечено, что прочность и разрушаемость горных пород определяется в основном количеством, размером и ориентацией имеющихся дефектов. Авторами работы [4] отмечено: для качественной оценки прочности материала по его способ-

Схема разрушения элемента горной породы

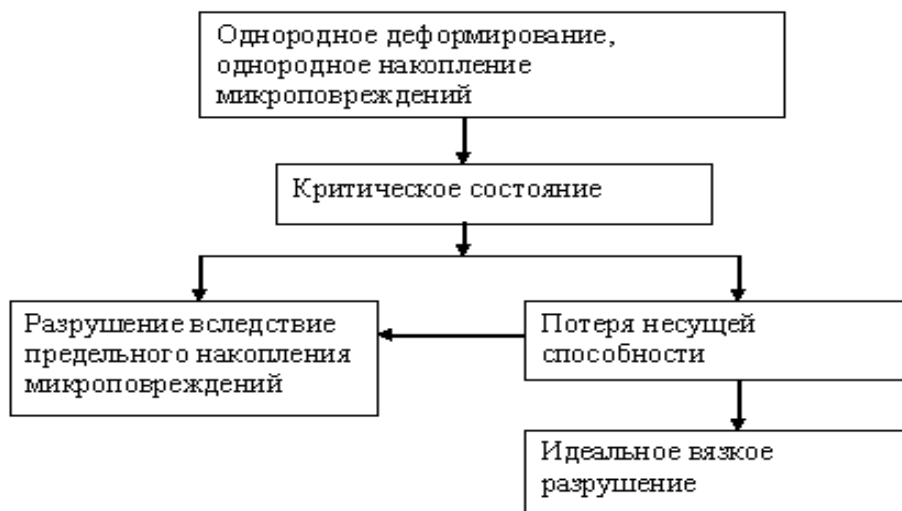


Рис. 2

ности тормозить магистральную трещину существует достаточно много экспериментальных методов и соответствующих характеристик материала.

Ход процесса разрушения зависит только от состояния материала у вершины трещины. Материал разрушается потому, что местные условия в отношении напряжений и деформаций у вершины трещины достигли определенного критического значения. Разрушение горных пород по своей природе тесно связано с концентрацией напряжений и пластическими деформациями у вершин трещины.

Величина, на которую повышается напряжение в местах его концентрации, называется коэффициентом концентрации напряжений.

Для трещины коэффициент концентрации напряжений рядом исследователей (Гриффитс, Нейбер, Савин и др.) определен математически, как функция полудлины щели и её радиуса:

по Гриффитсу:

$$K_{\Gamma} = 1 + 2 \cdot \sqrt{\frac{a}{\rho}} \approx \sqrt{\frac{a}{\rho}}, \quad (1)$$

по Нейберу:

$$K = \frac{2}{\pi} \sqrt{\frac{a}{\rho}} - \text{при сдвиге}, \quad (2)$$

$$K = \frac{4}{\pi} \sqrt{\frac{a}{\rho}} - \text{при растяжении}, \quad (3)$$

по Савину:

$$K = \frac{\beta}{2} \sqrt{\frac{a}{\rho}}, \quad (4)$$

где a – полудлина щели; ρ – радиус щели в устье, равный половине размера зерна;

$$\beta = 0,25\mu + 1,48, \quad (5)$$

μ – коэффициент Пуассона.

В общем случае $\sigma_m = K_K \cdot \sigma$. При равенстве напряжения в устье трещины σ_m равномерному напряжению в объёме породы σ коэффициент концентрации K_K равен единице:

$$K_K = \frac{\sigma_m}{\sigma} = 1. \quad (6)$$

Это означает, что макротрещина имеет минимальный размер, соответствующий стадии начала разрушения.

Таблица 1

Параметры трещин в начальной стадии разрушения

	По Гриффитсу			По Нейберу (сдвиг)			По Нейберу (растяжение)			По Савину		
Трещины, распространяющиеся внутри объема												
	$l_{\min} = 0,25d$			$l_{\min} = 2,48d$			$l_{\min} = 0,615d$			$l_{\min} = 1,74d$		
ρ , мм	0,5	1,5	3,0	0,5	1,5	3,0	0,5	1,5	3,0	0,5	1,5	3,0
l , мм	0,25	0,75	1,50	2,48	7,44	14,88	0,615	1,84	3,69	1,74	5,22	10,44
Трещины, распространяющиеся с поверхности внутрь объема												
	$l_{\min} = 0,125d$			$l_{\min} = 1,24d$			$l_{\min} = 0,307d$			$l_{\min} = 0,87d$		
ρ , мм	0,5	1,5	3,0	0,5	1,5	3,0	0,5	1,5	3,0	0,5	1,5	3,0
l , мм	0,125	0,375	0,750	1,24	3,72	7,44	0,307	0,92	1,84	0,87	2,61	5,22

По формулам 1–4 определим эти минимальные размеры для трещины, имеющей длину l_{\min} и радиус в устье ρ . Размеры определяем для трещины, расположенной внутри объема породы и распространяющейся в обе стороны, и для трещины, начинающейся с поверхности и распространяющейся в одну сторону (вглубь объема породы). В первом случае в формулах 1-4 $a = \frac{l}{z}$, а во втором случае $a = l$. Ре-

зультаты расчета приведены в табл. 1 для размеров зерна 1; 3 и 6 мм и коэффициента Пуассона $\mu = 0,2$.

Анализ и обобщение данных, таблицы 1 и 2 и результатов исследований ряда авторов показывают, что для начала распространения трещины начальной микроразрыв или микросдвиг должен быть по крайней мере соизмерим с зерном деформированного материала. Из данных табл. 1 видно, что для распространения трещины с поверхности внутрь объема породы начальный её минимальный размер в два раза меньше, чем трещины внутри объема породы. Из табл. 2 следует, что при одинаковой длине трещин внутри объема и тре-

щин, начинающихся с поверхности, коэффициент концентрации напряжений во втором случае в $\sqrt{2}$ раз больше. Это положение подтверждают результаты исследований многих авторов. Например, по Авербаху [3] из формулы макроскопического разрушающего напряжения:

$$\sigma_m = \sqrt{\frac{2EG}{C}}, \quad (7)$$

где E – модуль Юнга; G – упругая энергия; C – размер дефекта.

Следует, что, чем меньше критический размер дефекта C , начиная с которого возможен непрерывный рост трещины, тем интенсивнее концентрация напряжения σ_m , т.е. больше коэффициент концентрации напряжений.

Исследователи Робертс и Уэлс [3] приводят формулу скорости распространения трещины:

$$v = (2\pi/q)^{\frac{1}{2}} \cdot \left(\frac{E}{\rho}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot \left[1 - \frac{a_0}{a}\right], \quad (8)$$

где E , q , ρ – постоянный множитель-модуль упругости и плотность для одной горной породы; a_0 , a – длина трещины, соответственно, начальная и мгновенная.

Таблица 2

Расчетные значения коэффициентов концентрации напряжений

	По Гриффитсу			По Нейберу (сдвиг)			По Нейберу (растяжение)			По Савину		
Трещины, распространяющиеся внутри объема												
	$K_K = 2(l/d)^{\frac{1}{2}}$			$K_R = 2/\pi(l/d)^{\frac{1}{2}}$			$K_R = 4/\pi(l/d)^{\frac{1}{2}}$			$K_K = \beta/2(l/d)^{\frac{1}{2}}$		
d, мм l, мм	1	3	6	1	3	6	1	3	6	1	3	6
40	12,7	7,4	5,2	4,0	2,3	1,6	8,1	4,7	3,3	4,8	2,8	1,9
160	25,4	14,8	10,4	8,0	4,6	3,2	16,2	9,4	6,6	9,6	5,6	3,8
640	50,8	29,6	20,8	16,0	9,2	6,4	32,4	18,8	13,2	19,2	11,2	7,6
Трещины, распространяющиеся с поверхности внутрь объема												
	$K_K = 2(2l/d)^{\frac{1}{2}}$			$K_K = 2/\pi(2l/d)^{\frac{1}{2}}$			$K_K = 4/\pi(2l/d)^{\frac{1}{2}}$			$K_K = \beta/2(2l/d)^{\frac{1}{2}}$		
d, мм l, мм	1	3	6	1	3	6	1	3	6	1	3	6
40	18,0	10,5	7,35	5,65	3,25	2,25	11,5	6,65	4,65	6,8	4,0	2,7
160	36,0	21,0	14,7	11,3	6,5	4,5	23,0	13,3	9,3	13,6	8,0	5,4
640	72,0	42,0	29,4	22,6	13,0	9,0	46,0	26,6	18,6	27,2	16,0	10,8

Выражение $\left[1 - a_0/a\right]$ показывает, что при одинаковой длине трещины a скорость распространения трещины с поверхности внутрь объема породы будет больше, чем скорость распространения трещины внутри объема, т.к. начальная трещина a_0 согласно табл. 1 в 2 раза меньше при одинаковой зернистости породы, но, учитывая, что внутренняя трещина растет в две стороны, скорость её будет удвоена, а в виду того, что коэффициент концентрации напряжений у неё в $\sqrt{2}$ раз меньше, чем у краевой трещины, скорость ниже. Таким образом, можно ориентировочно выразить коэффициент превышения скорости роста трещин внутренних двухсторонних против краевых односторонних:

$$K_v = \frac{v_g}{v_k} = \sqrt{2} \left(\frac{a - a_{ог}}{a - a_{ок}} \right). \quad (9)$$

Анализ выражения (9) совместно с табл. 2 показывает, что скорость развития внутренней трещины в начальной стадии меньше, чем краевой, за-

тем превосходит последнюю, что хорошо согласуется с практикой. Рядом исследователей подчеркивается, что дефекты, содержащиеся на поверхности твердых тел, крупнее и в большем количестве, и, следовательно, способствуют более быстрому развитию трещин. Следовательно, среднее значение прочности отдельностей большего размера, будет ниже, чем отдельностей меньшего размера. Эта закономерность проявляется во всех породах, но с разной степенью и определяется как масштабный эффект, выражаемый зависимостью.

$$K'_K = F^\gamma, \quad (10)$$

где K'_K - коэффициент снижения прочности с увеличением размера объема породы; F - площадь поперечного сечения объема равная площади раскола (разрыва) в см^2 ; $\gamma = 0,5(1,5 - \varphi)$ - масштабный фактор; φ - показатель, учитывающий масштабный эффект.

В работе [3] приводятся величины показателя φ для 28 основных пород 12 ведущих горных предприятий, который варьирует в пределах

Таблица 3

Вычисленные значения площади раскола и коэффициента

$$K_M = F^\gamma$$

$l, \text{см}$	$F, \text{см}^2$	$2F, \text{см}^2$	$K_M = (2F)^{0,25}$	$K_M = (2F)^{0,135}$	K_H^C	K_c
4	16	32	2,38	1,64	2,3/1,6	2,8/1,9
16	256	512	4,77	2,32	4,7/3,3	5,6/3,9
64	4096	8192	9,55	3,39	9,3/6,6	11,2/7,7


$\varphi = 1,00 \div 1,23$. Показатель определялся автором работы [5] на образцах пород размером не менее 40 мм, с коэффициентом крепости по Протодьяконову от 5 до 20, с характерным размером зерна 4 ÷ 6 мм путем разбивания их ударником со скоростью 5 ÷ 6 м/с за 2 - 5 ударов на 3 ÷ 5 основных фракции.

На основании этих данных можно определить коэффициент K_K в границах: $\varphi = 1,00$ и $\varphi = 1,23$, площадь одного раскола $F = l \times l$ (где $l = 4,16,64$ см), число расколов – 2 (в среднем на 4 части), размер зерна 3 ÷ 6 мм, трещины распространяются с поверхности внутрь образца, а при повторных ударах могут разви-

ваться и внутренние трещины как разрыва так и скола. Результаты вычислений сведены в табл. 3. Для сравнения в табл. 3 приведены значения коэффициентов концентрации напряжений из табл. 2 для размеров зерен 3 и 6 мм и внутренних трещин.

Анализируя результаты из табл. 1-3, а также физическую сущность концентрации напряжений и масштабного эффекта, можно сказать, что они адекватны, т.е. с ростом размеров трещины (раскола) прочность породы снижается или на величину K_K , или, что то же, на величину F^γ , вопрос только в полной идентичности условий нагружения и точного определения F, γ, l и d .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Беляев Ю.М. Сопротивление материалов. – М.: Наука, 1976. – 607 с.
2. Механика разрушения горных пород / Кондауров В.И., Мухамедиев Ш.А., Никитин Л.В., Рыжак Е.И. – М.: ИФЗ АН СССР, 1987. – 218 с.
3. Разрушение // Микроскопические и макроскопические основы механики разрушения. – М.: Мир, 1973. – Т.1. – 616 с. Никитин Л.В., Рыжак Е.И. – М.: ИФЗ АН СССР, 1987. – 218 с.
4. Разрушение горных пород при термодинамическом воздействии / Москалев А.Н., Пигида Е.Ю., Кереклици Л.Г., Вахалин Ю.Н. – Киев: Наукова умка, 1987. – 248 с.
5. Куклин И.С., Маторин А.С., Кузнецов В.Г. Сопротивляемость скальных горных пород разрушению многократными динамическими нагрузками. // Буро – взрывные работы на рудных карьерах. – Свердловск, 1972. – С. 98 – 104. – (Сб. научных трудов / ИГД Минчермета СССР, № 36). 

Коротко об авторах

Данилов А.В. – специалист по технической защите информации, научный сотрудник, ИГД УрО РАН, Danilov80@inbox.ru,
Маторин А.С. – ИГД УрО РАН г. Екатеринбург, direct@igd.uran.ru