

Լ. Օ. ՄԻԵՅՆ, Կ. Տ. ՎԱՐԴԱՆՅԱՆ

ОБОСНОВАНИЕ МЕХАНИЗМА РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД
ПРИ ВДАВЛИВАНИИ ШАРОВОЙ ДРОБИ

Рассматривается механизм разрушения горных пород при вдавливании шаровой дроби. Процесс разрушения сводится к исследованию механизма разрушения породы (упругого тела) при действии на ее поверхности сферического тела.

Вопросы разрушения горных пород при вдавливании сферы изучены многими авторами [1—4] и эти исследования, в основном, носят экспериментальный характер. В работах [1, 2] сделана попытка теоретически обосновать процесс разрушения, но мнения авторов не совпадают. Это объясняется сложностью самой задачи перехода от одной стадии к другой в процессе разрушения и недостаточной изученности данного вопроса.

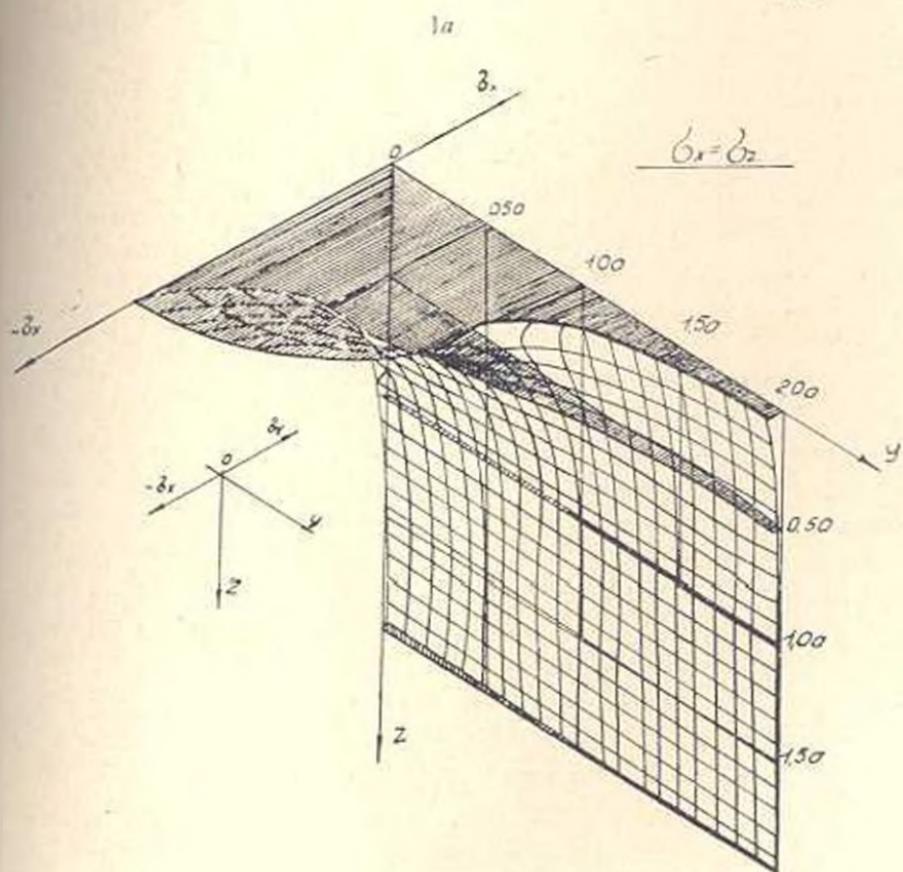
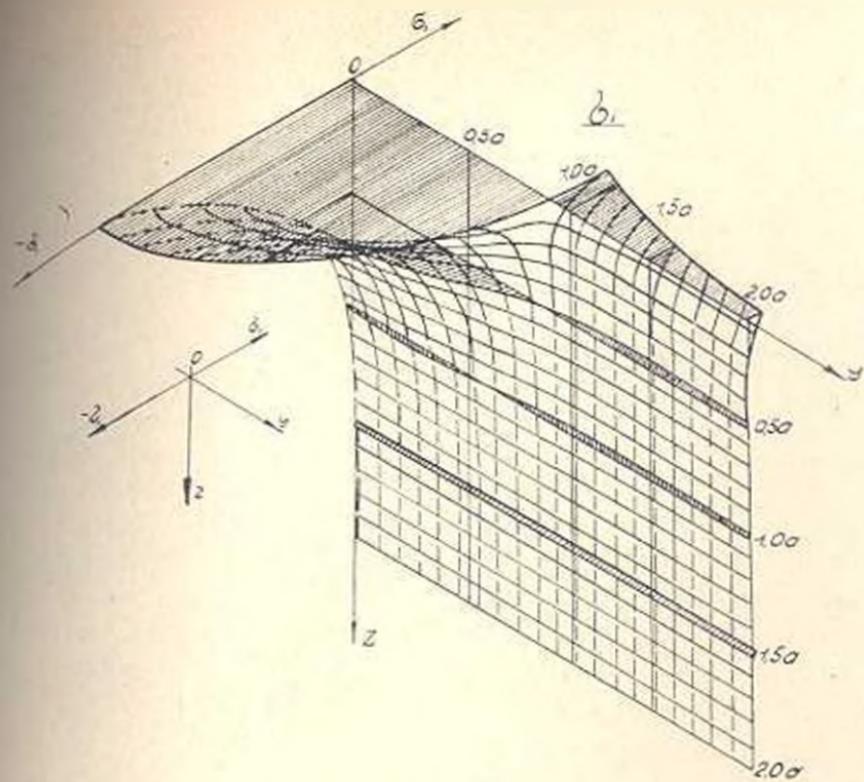
Для теоретического обоснования процесса хрупкого разрушения горной породы шаровой дробью, а также для расчета характерных величин необходимо исследовать напряженное состояние породы при вдавливании в нее сферического индентора.

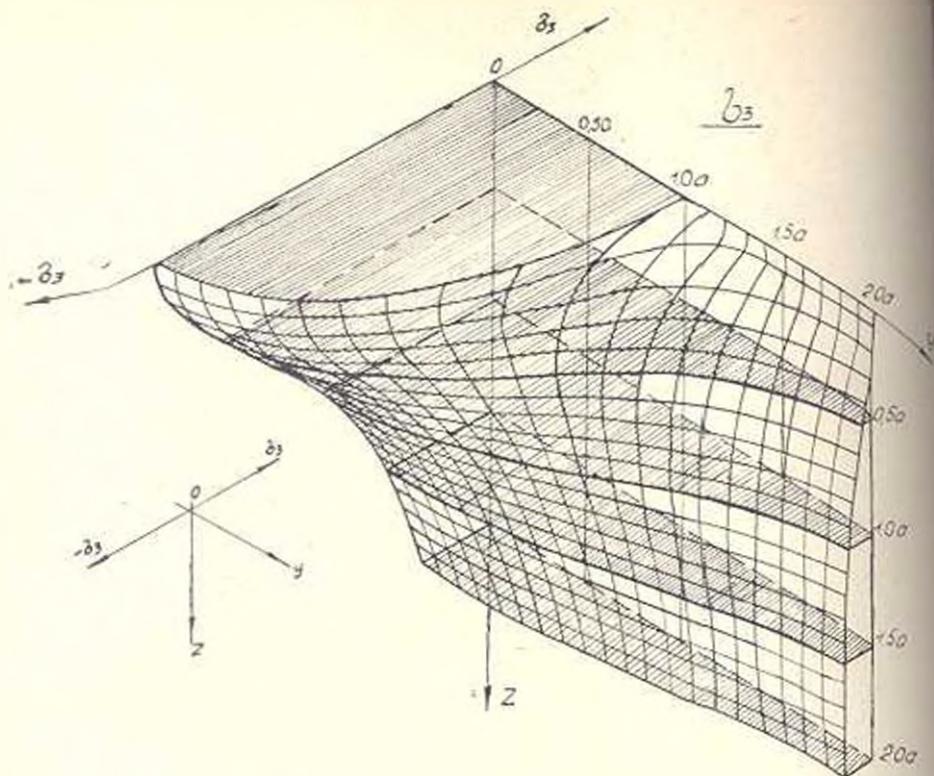
В начальный период нагружения, когда не преобладают предельно упругих деформаций горной породы, напряженное состояние описывается известным решением задачи Герца о вдавливании упругого шара в упругое полупространство.

Пусть упругое полупространство (горная порода) отнесено к декартовой системе координат X, Y, Z и к сферическому телу, находящемуся на ее поверхности, в начале координат действует сила P .

Имея ввиду симметричность задачи, ограничимся вычислением напряжений $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ и τ_{yz} для плоскости $x=0$ при помощи формул, приведенных в [5].

На ЭЦВМ «Наири» вычислены значения напряжений $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ и τ_{yz} в точках сетки на плоскости YOZ $0 \leq y \leq 2a$, $0 \leq z \leq 2a$, с шагом сетки $0,1a$ (коэффициент Пуассона материала горной породы $\nu = 0,25$). В тех же точках вычислены значения главных напряжений и направления главных площадок, на основе которых построены пространственные эпюры этих напряжений, представленные на рис. 1а, б, в.





1a

Рис 1a, б, в. Эпюры главных напряжений.

Величины напряжений вычислены в относительных единицах, где за единицу принята величина $\frac{P}{a^2}$.

Анализируя значения главных напряжений из таблиц и поведение пространственных кривых на эпюрах, можно отметить следующие общие тенденции:

— при удалении от центра круга давления по направлению оси OZ значения напряжений σ_1 и σ_2 уменьшаются значительно быстрее, чем σ_3 ;

— все напряжения в центре круга давления и на определенном расстоянии по осям OZ и OM' являются сжимающими;

— напряжение σ_3 для любой точки взятой плоскости является всегда сжимающим, а напряжения σ_1 и σ_2 по мере удаления от центра круга давления становятся растягивающими;

— напряжения σ_1 и σ_2 на расстоянии $z = 1,3a$ становятся растягивающими, наибольшее их значение достигается в точке $z = 1,9a$, где:

$$\sigma_1 = \sigma_2 = 0,00418 \frac{P}{a^2} ;$$

— наибольшие значения напряжений получаются непосредственно в центре круга давления с координатами $(0, 0, 0)$, где $\sigma_1 = \sigma_2 = -0,358 \frac{P}{a^2}$; $\sigma_3 = -0,477 \frac{P}{a^2}$;

— наибольшее растягивающее значение напряжения σ_1 действует на поверхности у контура круга давления в точке $y \approx a$, где $\sigma_1 = 0,0796 \frac{P}{a^2}$.

На основе анализа упругое полупространство, находящееся в напряженном состоянии, можно разделить на три характерные области, соответствующие наличию:

А — растягивающих и сжимающих напряжений $\sigma_1 > 0$, $\sigma_2 < 0$, $\sigma_3 < 0$;

В — растягивающих и сжимающих напряжений $\sigma_1 > 0$, $\sigma_2 > 0$, $\sigma_3 < 0$;

С — сжимающих напряжений $\sigma_1 < 0$, $\sigma_2 < 0$, $\sigma_3 < 0$.

На рис. 2 показаны области растягивающих и сжимающих напряжений упругого полупространства, и в каждой области приведен элемент с главными напряжениями σ_1 и σ_2 : напряжение σ_3 перпендикулярно плоскости чертежа.

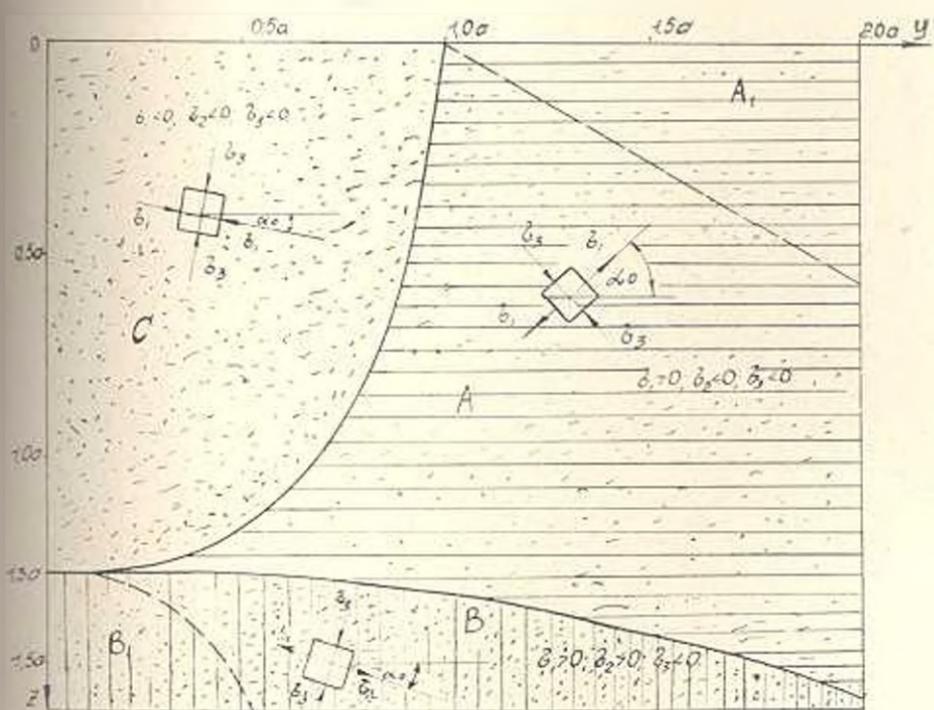


Рис. 2. Распределение напряжений в упругом полупространстве при вдавливании сферы: элементы с главными напряжениями.

Из анализа следует также, что в области А можно выделить участки с наличием достаточно больших растягивающих напряжений (уча-

сток — A_1). Область C , где все напряжения являются сжимающими, можно, согласно [1], принять за область всестороннего сжатия. В области B можно выделить участок B_1 с достаточно большим растягивающим напряжением.

Области A , B , C и соответствующие участки с наибольшими растягивающими напряжениями A_1 , B_1 играют существенную роль в процессе хрупкого разрушения горной породы.

Перейдем к исследованию процесса хрупкого разрушения по числу некоторых характерных величин на основе теории хрупкого разрушения [1, 3].

При увеличении силы P , когда превзойдет предел упругих деформаций горной породы, увеличивается зона контакта, т. е. радиус контакта давления, и там же действуют наибольшие растягивающие напряжения

$$\sigma_v = \sigma_1 = 0,0796 \frac{P}{a^2}.$$

При достижении величины σ предела прочности на разрыв горной породы появляются первые окружные трещины. Значение нагрузки соответствующей появлению первых трещин, можно определить по условию:

$$0,0796 \frac{P}{a^2} = \sigma_p.$$

Однако, сила, вызывающая появление первых трещин, незначительна ввиду малости σ_p и не представляет интереса, т. к. эти трещины весьма малы и при увеличении нагрузки закрываются растущей площадкой контакта. Дальнейшее увеличение нагрузки приводит к появлению достаточно глубокой конической трещины, растущей с увеличением нагрузки, что связано с накоплением упругой энергии в области A , [1]. При этом, края трещины обламываются, конический объем под контактной площадкой обособляется и вся сила $P = P_{10}$ действует на площадку контакта с радиусом a_k .

Для количественной оценки величины P_{10} и a_k воспользуемся формулами, приведенными в [1]:

$$a_k = c_1 K_{II}^2 E^{-1/2} R^2; \quad (1)$$

$$P_{10} = c_2 K_{II}^2 E^{-1} R; \quad (2)$$

где c_1 и c_2 — численные коэффициенты (для янцевского гранита $c_1 \approx 30$; $c_2 \approx 0,3 \cdot 10^9$); E — модуль упругости горной породы; R — радиус сферы; K_{II} — критическая величина коэффициента интенсивности напряжений.

Значение K_{II} определяется экспериментальным путем. В частности для янцевского гранита $K_{II} = 4,7 \text{ кгс} \cdot \text{см}^{3/2}$.

По формулам (1) и (2) вычислены значения P_{10} и a_c для янцевского гранита при различных значениях радиуса шара, которые приведены в табл. 1.

Возрастание силы P вызывает рост осевых трещин в области растягивающих напряжений B_1 , которые с увеличением нагрузки в разном направлении увеличиваются и достигают боковой поверхности конуса. Развитие трещин происходит также в области всестороннего сжатия C под контактной площадкой. У конца трещины, находящейся в условиях сжатия, имеется малая область растягивающих напряжений [1]. Вследствие этого с увеличением уровня нагрузок произойдет развитие большего числа трещин. Вначале рост трещин является устойчивым, ввиду малости области растягивающих напряжений. Создается запас упругой энергии, необходимый для самоподдерживающего разрушения, которое совпадает с выходом осевых трещин на поверхность конуса.

Для количественной оценки разрушающей силы P_p воспользуемся формулой, выведенной на основе анализа размерностей в [1]:

$$P_p = a_2^2 K_{10} \left[c_2 + c_3 \left(\frac{a_2}{r_0} \right)^{1/2} \right]. \quad (3)$$

Для янцевского гранита $c_2 = 784$, $c_3 = 112$.

По формуле (3) вычислены значения силы P_p для различных диаметров шара, которые приведены в табл. 2.

Таблица 1

Радиус шара, м.м	a_c , м.м	P_{10} , кгс
0,49	0,171	58
0,79	0,233	105
0,19	0,312	142
1,5	0,36	192
2	0,12	260

Таблица 2

Радиус шара, м.м	Разрушающая сила, кгс	
	расчетная	экспериментальная
0,49	135,5	150
0,79	242	240
1,19	419	420
1,5	549,5	530
2	736,5	750

Значения величины разрушающей силы P_p определены также экспериментальным путем, которые приведены в табл. 2.

Как показали сравнения теоретических и экспериментальных данных, разность величин составила не более 10%, что свидетельствует о применимости теоретических формул для расчета разрушающей силы.

ВЫИКС:

Поступило 17 XII 1978

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Черепанов Г. П. Механика хрупкого разрушения. М., «Наука», 1974.
2. Кичигин А. Ф. и др. Механическое разрушение горных пород комбинированным способом. М., «Недра», 1972.
3. Черепанов Г. П., Соколинский В. Б. О разрушении хрупких тел при соударении. «Труды конференции по контактным задачам», М., 1969.
4. Эйзенберг Р. М. Разрушение горных пород при бурении. М., «Недра», 1971.
5. Диняк А. П. Избранные труды. Т. 1, Киев, 1952.