

УДК 622.235.11.023.23(045)(476)

КОМПЛЕКСНЫЙ МЕТОД ПОСТРОЕНИЯ ПАСПОРТА ПРОЧНОСТИ ГОРНОЙ ПОРОДЫ

Оника С.Г., Кузьмич А.К. (Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь)

Представлены результаты комплексного построения паспортов прочности горных пород в условиях шахт Алмазно-Марьевского горно-промышленного района, полученные на основе исследований свойств горных пород в зоне пластических деформаций и характера разрушений.

Ключевые слова: паспорт, прочность, горные породы, напряженное состояние, сжатие, растяжение, песчаник.

Введение

Одним из важнейших факторов, определяющих конструктивные особенности горнодобывающих машин, их производительность, параметры систем разработки полезных ископаемых, характер разных производственных процессов при добыче полезных ископаемых и их переработке, а также при проведении горных выработок разного назначения, являются прочностные свойства горных пород.

Известно, что во всяком твердом теле под влиянием внешних сил возникают внутренние напряжения, величина которых зависит от величины и характера приложенных нагрузок, размеров поперечного сечения тела и механических свойств материала. Действие нагрузок сопровождается возникновением деформаций, которые меняют форму и объем тела. Зависимости между напряжениями и вызываемыми ими деформациями часто носят довольно сложный характер и достаточно трудно определяются аналитическим путем.

Сведения о прочностных показателях горных пород имеют важное значение для решения многих задач горной геомеханики. Особенно важно оценить прочность пород при сложном напряженном состоянии, в то время как обычные лабораторные эксперименты позволяют изучить прочностные характеристики при простейших видах деформаций. Поэтому наряду с определением упругих и прочностных свойств пород необходимы знания их свойств в зоне пластических деформаций, а также характер разрушения.

Основная часть

Как известно, огибающая кривая предельных кругов Мора для горной породы (паспорт прочности), построенная в координатах нормальных σ и касательных τ напряжений, является наиболее полной графической прочностной характеристикой горной породы [1].

Простейшим методом построения паспорта прочности по данным испытаний прочности пород в объемном напряженном состоянии является метод соосных пуансонов. Определение величин головных напряжений проводят нагружением сплошного и полого образцов с одинаковым диаметром и высотой. Измерение деформаций ведут вдоль концентрических дуг. При этом в процессе нагружения сплошного образца в той части, непосредственно находящейся под штампом, создается напряженное состояние, аналогичное напряженному состоянию в стабилометрах [2].

Этот метод, получивший название метода Кармана, состоит в разрушении образцов горных пород при напряженном состоянии типа

$$\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3 > 0, \quad (1)$$

где σ_1 – главное напряжение, действующее вдоль продольной оси образца;
 σ_2 и σ_3 – главные напряжения в плоскости, перпендикулярной оси образца.

Сущность метода состоит в определении предельного значения главного напряжения σ_1 при разных величинах бокового напряжения $\sigma_2 = \sigma_3$. Последовательность построения паспорта прочности по результатам испытаний на установке объемного сжатия конструкции В.С. Вобликова (ИГД им. А.А. Скочинского) можно показать на примере алевролита из кровли пласта l_6 шахты им. И.В. Чеснокова, имеющего предел прочности при одноосном растяжении $\sigma_{рас} = 9,5$ МПа. Результаты исследований алевролита в условиях объемного неравномерного сжатия приведены в таблице 1.

Таблица 1. – Результаты исследований алевролита

Показатель	Значение					
Боковые напряжения $\sigma_2 = \sigma_3$, МПа	0	8	17	20	32	58
Осевые напряжения σ_1 , МПа	34,5	50	66	72	90	126

В данном случае необходимо построить семь кругов предельного состояния:

- круг одноосного растяжения радиусом $\sigma_{рас}/2 = 9,5/2 = 4,25$ МПа;
- круг одноосного сжатия радиусом $0,5\sigma_{сж} = 34,5/2 = 17,25$ МПа.

И пять кругов объемного напряженного состояния, радиусы которых определяются полуразностью соответствующих напряжений, $0,5(\sigma_1 - \sigma_2)$.

Пример построения показан на рисунке 1: где O – начало координат в системе σ, τ , а центры предельных кругов $O, O_1, O_2, O_3, O_4, O_5$ имеют следующие абсциссы:

$O_{рас} = -4,25$ МПа – центр круга одноосного растяжения радиусом 4,25 МПа;

$O_{сж} = 17,25$ МПа – центр круга одноосного сжатия радиусом 17,25 МПа;

$O_1 = (\sigma_1 + \sigma_2)/2 = (50 + 8)/2 = 29$ МПа – центр первого круга объемного сжатия радиусом $(\sigma_1 - \sigma_2)/2 = (50 - 8)/2 = 21$ МПа.

Аналогично определяется центр второго круга объемного сжатия $O_2 = 41,5$ МПа радиусом 24,5 МПа; центр третьего круга объемного сжатия $O_3 = 46$ МПа, радиусом 26 МПа; центр четвертого круга $O_4 = 61$ МПа, радиусом 29 МПа и пятого круга $O_5 = 92$ МПа, радиусом 34 МПа.

Проведя огибающую к построенным кругам предельных напряжений, легко увидеть на графике параметры паспорта прочности: ордината точки сечения огибающей с осью касательных напряжений τ – сцепление алевролита; угол наклона касательной, проведенной в этой точке к огибающей – угол внутреннего трения φ . В рассмотренном примере $\tau = 9,8$ МПа, $\varphi = 31^\circ$.

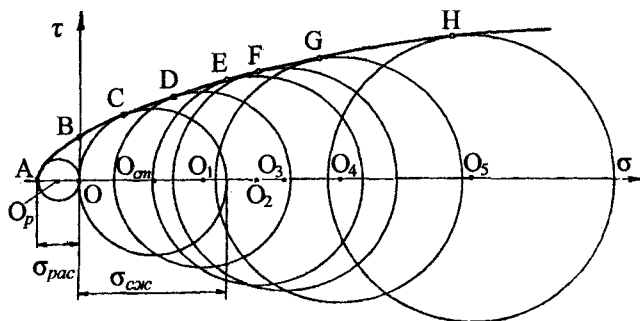


Рисунок 1. – Построение паспорта прочности алевролита по результатам лабораторного эксперимента

Очевидно, что испытания горных пород в условиях объемного неравномерного сжатия в установках типа Кармана отличаются значительной трудоемкостью и требуют использования специального лабораторного оборудования. Поэтому рядом исследователей предложены разные расчетные методы построения паспорта прочности.

В последние годы широкое распространение получил быстрый комплексный метод построения паспортов прочности. Это расчетный метод, применяемый в качестве исходных данных параметров пределов прочности на сжатие и растяжение, которые получены методом многократного раздавливания и сжатия образцов полуправильной формы – пластин с двумя параллельными шлифованными гранями.

Временное сопротивление при одноосном растяжении определяется по формуле:

$$\sigma = \frac{P}{F}, \text{ Па,} \quad (2)$$

где P – разрушительное усилие при раскалывании, H ;

F – площадь плоскости разрыва, см^2 .

От раскалывания остаются кубоподобные образцы, исследуемые на одноосное сжатие обычным способом.

Временное сопротивление при одноосном сжатии определяется по формуле:

$$\sigma_{\text{сжк}} = \frac{P_{\text{сжк}}}{F_c}, \text{ Па,} \quad (3)$$

где $P_{\text{сжк}}$ – разрушающее усилие при сжатии, H ;

F_c – площадь поперечного сечения образца, см^2 .

Количество испытаний на разрыв и одноосное сжатие принимается не меньше 9, 6, 4 и 3 при соответствующих коэффициентах вариации: 30, 25, 20 и 15 %.

Построение паспорта прочности горной породы выполняется по единому уравнению огибающих предельных кругов О. Мора, предложенному проф. М.М. Протодыяконовым [3]:

$$y = y_{\text{max}} \left(\frac{x^2}{x^2 + a^2} \right)^{3/8}, \quad (4)$$

где y – касательные напряжения, $y = \tau$;

y_{max} – асимптотическое сопротивление породы сдвигу, характеризующее прочность породы при срезе в уплотненном состоянии, $y_{\text{max}} = \tau_{\text{max}}$;

x – нормальные напряжения соответственно начала координат, размещенного в точке сечения огибающей кривой с осью абсцисс, $x = \sigma + \sigma_{\text{рас}}$;

a – размерный параметр формы кривой.

Сопоставление расчетных огибающих и огибающих, полученных другими экспериментальными методами, указывает, что расчетные огибающие, полученные по уравнению (4), с достаточной точностью описывают прочностные свойства большинства горных пород и угля. Использование быстрого комплексного метода позволяет не только многократно сократить трудоемкость испытаний, но и получить полные прочностные характеристики слабых и трещиноватых пород, из которых нельзя изготовить образцы правильной геометрической формы.

Для еще большего облегчения расчетов при построении расчетных огибающих предельных кругов напряжений О. Мора с применением пределов прочности при сжа-

тии и растяжении, а также их отношений предложены таблицы, в которых приняты следующие условные обозначения

$$k = \frac{x}{a}; \quad (5)$$

$l = \left(\frac{k^2}{k^2 + 1} \right)^{3/8}$ – безразмерная ордината огибающей кривой;

$k_1 = k + l \cdot p \cdot S^2$ – безразмерная координата центра кругов О.Мора для растяжения;

$p = \frac{3}{4k^{1/4}(k^2 + 1)^{11/8}}$ – безразмерное уравнение первой производной для огибающей кривой;

$$S = \frac{y_M}{a} \cong 0,73; \quad (6)$$

y_M – максимальное сопротивление среза;

$q_1 = l\sqrt{1 + p^2}$ – безразмерное выражение радиуса круга О.Мора для одноосного растяжения;

q_2 – безразмерное выражение радиуса круга О.Мора для одноосного сжатия;

$m = \frac{q_2}{q_1} \cong \frac{\sigma_{сж}}{\sigma_{рас}}$ – отношение радиусов кругов О.Мора для одноосного сжатия и растяжения;

$k_1 + q_1 = k_2 - q_2$ – точка касания кругов О.Мора.

В таблице 2 представлен фрагмент значений q_1 ; q_2 и $k_1 + q_1$ для соотношений $\frac{q_2}{q_1}$ от 1,39 до 10,0 составлены через интервал 0,1, а от 10,0 до 50,0 – через 1,0.

Таблица 2. – Безразмерные параметры паспортов прочности горных пород

Отношение $m = \frac{\sigma_{сж}}{\sigma_{рас}}$	Безразмерный радиус круга О.Мора для одноосного сжатия q_2	Безразмерный радиус круга О.Мора для одноосного растяжения q_1	Безразмерная абсцисса точки касания $k_1 + q_1$
1,4	0,6655	0,4754	0,4754
1,5	0,6605	0,4400	0,4400
1,6	0,6559	0,4100	0,4100
1,7	0,6491	0,3828	0,3828
...			
47,0	0,02225	0,000474	0,000956
48,0	0,02172	0,000454	0,000909
49,0	0,02119	0,000434	0,000869
50,0	0,020664	0,000414	0,000829

Этот метод был положен в основу разработанного стандарта ГОСТ-21153-93. Реализацию этого метода проиллюстрируем для песчаника шахты «Центральная-Ирмино» построением паспорта прочности горной породы при аппроксимации его стандартным уравнением.

Песчаник с горизонта 1000 м ($\sigma_{сж} = 56$ МПа, $\sigma_{рас} = 16,3$ МПа).

1. Рассчитываем отношения радиусов кругов О.Мора для одноосного сжатия и растяжения:

$$m = \frac{q_2}{q_1} = \frac{\sigma_{сж}}{\sigma_{рас}} = \frac{56,0}{16,3} \cong 3,44.$$

2. В таблице 2 находим значение безразмерных радиусов кругов О.Мора для одноосного растяжения и сжатия:

$$q_1 = 0,1431; \quad q_2 = 0,4895.$$

3. Рассчитываем среднее значение параметров формы огибающей максимальных кругов напряжений О.Мора:

$$a_1 = \frac{\sigma_{рас}}{2q_1} = \frac{16,3}{2 \cdot 0,1431} = 56,8 \text{ МПа};$$

$$a_2 = \frac{\sigma_{сж}}{2q_2} = \frac{56,0}{2 \cdot 0,4895} = 57,2 \text{ МПа};$$

$$a_{cp} = \frac{a_1 + a_2}{2} = \frac{56,8 + 57,2}{2} = 57,0 \text{ МПа}.$$

4. Рассчитываем максимальное сопротивление среза:

$$y_m = 0,73 \cdot a_{cp} = 0,73 \cdot 57,0 = 41,6 \text{ МПа},$$

тогда обобщающее уравнение огибающей кривой примет вид:

$$y = 41,6 \left(\frac{x^2}{x^2 + 57,0} \right)^{3/8}. \quad (7)$$

5. В таблице 2 находим значение безразмерной координаты точки касания кругов О.Мора:

$$k_1 + q_1 = k_2 - q_2 = 0,3162.$$

6. Рассчитываем величину сопротивления породы всестороннему растяжению:

$$\sigma_{рас} = a_{cp} (k_1 + q_1) = 57,0 \cdot 0,3162 \cong 18,0 \text{ МПа}.$$

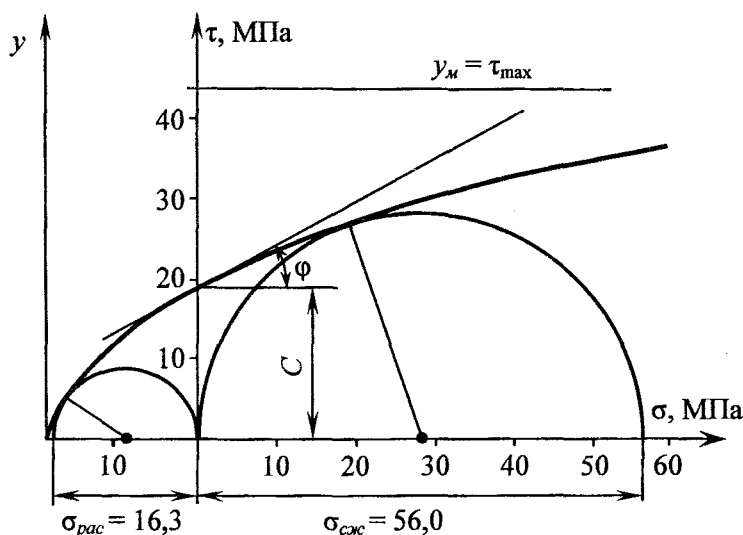
7. Рассчитаем координаты отдельных точек огибающей кривой, используя безразмерные величины огибающей для разных значений k , данные расчетов сведены в таблицу 3.

8. По рассчитанным координатам точек огибающей кривой в принятом масштабе строим огибающую кривую – паспорт прочности горной породы. Построение выполняется следующим образом: влево от оси ординат откладываем величину $\sigma_{рас}$, а потом, считая эту точку за начало координат системы x, y ($x = \sigma + \sigma_{рас}^1$; $y = \tau$), наносим по рассчитанным координатам точки, по которым проводим огибающую кривую, – это и есть паспорт прочности рассматриваемой горной породы (рисунок 2).

Если круги для одноосного сжатия и растяжения коснутся огибающей, то расчет и построение огибающих выполнены правильно.

Таблица 3. – Расчет безразмерных величин

k	l	$x = k \cdot a_{cp}$	$y = y_m \cdot l$
0,05	0,1056	2,8	4,4
0,1	0,1772	5,7	7,4
0,2	0,2947	11,4	12,3
0,3	0,3925	17,1	16,4
0,4	0,467	22,8	19,4
0,5	0,547	28,5	22,8
0,6	0,608	34,2	25,3
0,7	0,660	39,8	27,5
0,8	0,700	45,6	29,2
0,9	0,740	51,3	30,8
1,0	0,771	57,0	32,1
1,2	0,824	68,5	34,4
1,4	0,865	80,0	36,0



c – сцепление песчаника

Рисунок 2. – Паспорт прочности песчаника горизонта 1000 м шахта «Центральная-Ирмино»

Выводы

Анализ полученных результатов показывает, что огибающая кругов О. Мора исследуемого песчаника с горизонта 1000 м шахты «Центральная-Ирмино» Алмазно-Марьевского геолого-промышленного района с достаточной точностью описывает прочностные свойства песчаника. Использование рассмотренного метода определения прочностных свойств горной породы позволяет получить полные прочностные характеристики горной породы с целью предотвращения их деформаций.

Список использованных источников

1. Протоdjяконов, М.М. Свойства горных пород и методы их определения / М.М. Протоdjяконов. – М.: Недра, 1969. – 392 с.
2. Стабилометр для испытания горных пород: а.с. 1048116 СССР, МКИ³ E21C39/00. / Ю.М. Карташов, В.А. Козлов, Б.В. Матвеев, М.С. Эпштейн; Всесоюзный ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательский институт горной механики и маркшейдерского дела. – № 3445483/22-03; заявл. 28.05.82; опубли. 15.10.83 // Бюл. № 38.
3. Алексеенко, С.Ф. Фізика гірських порід: підручник для вищих навч. / С.Ф. Алексеенко, О.К. Кузьміч, В.П. Мележик. – Харків: УПА, 2006. – 359 с.

Onika S.G., Kuzmich A.K.

Comprehensive method of plotting of a rock strength certificate

The results of the complex plotting of rock strength certificates in the conditions of the mines of Diamond Marevskogo mining and industrial region, on the base of studies of characteristics of rocks in a zone of plastic deformations and destruction.

Keywords: *certificate, strength, mineral rocks, stressed state, compression, stretching, sand.*

Поступила в редакцию 22.02.2017 г.