

**А.А.ПАВЛОВИЧ**, аспирант, *dandy332@mail.ru*  
Санкт-Петербургский государственный горный институт (технический университет)

**A.A.PAVLOVICH**, post-graduate student, *dandy332@mail.ru*  
Saint Petersburg State Mining Institute (Technical University)

## МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ОТКРЫТЫМ ГОРНЫМ РАБОТАМ

Проведен обзор факторов, влияющих на прочность массива. Рассмотрены методы определения перехода от прочности образца к прочности массива.

**Ключевые слова:** нарушенность массива, прочностные свойства горных пород, коэффициент структурного ослабления.

## THE METHODS OF STRENGTH DEFINITION FOR THE ROCK MASS PROPERTIES APPLYING TO THE OPEN MINING CUT

The review of factors influencing rock mass strength is given. Methods of definition for sample strength changeover to rock mass are considered in the article.

**Key words:** disturbed rock mass, strength properties of rocks, structural loosening rate.

Одним из основных факторов, определяющих устойчивость прибортовых массивов карьеров, является прочность горных пород. Для определения прочностных свойств используют методы натуральных и лабораторных испытаний. Сущность натуральных методов – это измерение свойств массива *in situ*.

Натурные методы испытаний можно разделить на следующие группы:

- Опытные горные работы с измерением сдвижений и разрушений массива пород, выявление механизма этих процессов и последующее вычисление характеристик и показателей методом «обратного расчета».

- Искусственное нагружение частично отделенных от массива областей, сопоставимых с размерами структурных элементов породы, измерение нагрузок, деформаций и разрушений, а также вычисление искомых характеристик и показателей (с учетом масштабного эффекта).

Натурный метод представляет собой надежный источник получения представительных механических характеристик, но является весьма трудоемким процессом с применением тяжелого оборудования.

Лабораторные методы испытаний применяют стационарные средства для изготовления образцов, испытательные машины со специальными нагрузочными приспособлениями и типовые измерительные приборы. Этот метод является достаточно доступным, а при качественном выполнении – достаточно надежным. Однако, когда изучаемый участок породного массива сложен структурно ослабленными породами, представительность лабораторных испытаний часто существенно снижается за счет проявления масштабного эффекта и неучета ослабляющего влияния структурных контактов породы. В последние годы находят широкое практическое применение методы расчета механических свойств породных массивов

по свойствам породных образцов с помощью специальных коэффициентов, учитывающих снижение прочности трещиноватого массива.

Показатель устойчивости каждой породы должен отражать прочность по сцеплению не в куске, а в массиве. Это может быть комплексно учтено коэффициентом ослабления, выражающим отношение сцепления в массиве к сцеплению в элементарном структурном блоке (в образце)

$$\lambda = C_M / C_0$$

или временного сопротивления сжатию структурной призмы к временному сопротивлению сжатию образца

$$\lambda = \sigma_{сж.стр}^0 / \sigma_{сж.обр}^0$$

Рассмотрим основные факторы, влияющие на прочность трещиноватого массива [1].

1. *Фактор относительной интенсивности трещиноватости*  $\lambda_w$  выражается отношением размера деформирующегося массива (высоты борта  $H$ ) к среднему размеру элементарного структурного блока  $l$ . Фактор – один из самых важных.

2. *Фактор разнопрочности пород*  $\lambda_{рп}$ .

В массиве всегда имеются отдельные структурные блоки пониженной прочности, которые оказывают заметное влияние на сопротивление массива сдвигу. Для массива с явно выраженной разнопрочностью данные о процентном содержании слабых блоков можно получить непосредственно изучением структуры на обнажениях откосов. В однородных породах результаты испытаний на прочность могут подчиняться нормальному закону распределения, если нет существенной разницы в прочности структурных блоков, и крайне асимметричному или даже двухвершинному распределению, если эта разница существует. Первый случай более характерен для пород слабых, второй – для скальных и полускальных. Данный фактор используют только при его точном выявлении.

2. *Фактор структурных блоков*  $\lambda_{\Delta}$ . В природе форма блоков в большинстве случаев отличается от прямоугольной, поэтому прочность массива зависит от угла скошен-

ности блоков. Этот фактор может уменьшить значение  $\lambda$  более чем в два раза. Практически угол  $\Delta$  определяется из фактических замеров элементов залегания трещин.

4. *Неизометричность структурных блоков*  $\lambda_n$ . Прочность массива зависит от отношения линейных размеров блоков  $b/a$  ( $b$  – вертикальный,  $a$  – горизонтальный размер относительно наложения пород). При отношении  $b/a < 1$  наблюдается незначительное упрочнение, при  $b/a > 1$  – снижение прочности массива по сравнению с массивом, сложенным из блоков с отношением средних размеров  $b/a = 1$  при всех прочих условиях.

Средние размеры структурных блоков определяются в натурных условиях на участках уступов путем массовых линейных измерений блоков, ориентированных вкрест простирания борта. При  $H/b \geq 10-15$  фактор неизометричности не учитывается, так как в этом случае изменение относительной интенсивности трещиноватости не влияет на  $\lambda$ .

5. *Фактор взаимного расположения блоков в соседних слоях*  $\lambda_{\Delta\alpha}$  учитывает влияние расположения блоков относительно друг друга. При наличии в массиве более трех-четырех систем трещин этот фактор не учитывается.

6. *Направление действия первого главного напряжения в массиве*  $\lambda_{\sigma}$ . Фактор учитывает изменение сопротивления сдвигу массива в откосе.

На прямолинейном участке поверхности скольжения, наклоненной под углом  $45^\circ - \rho/2$  к вертикали, направление напряжения  $\sigma_1$  совпадает с направлением силы тяжести и поэтому при определении прочности массива в предельно-напряженном клине давления этот фактор не учитывается.

7. *Кососекущие трещины*  $\lambda_m$ . Под кососекущими трещинами понимаются такие, которые пересекают основные системы под углом  $40-45^\circ$  и делят прямоугольный или ромбический структурный блок пополам. Влияние этого фактора весьма велико и требует особенно точного определения.

Прочность массива уменьшается в зависимости от процентного содержания кососекущих трещин  $m$ , имеющих падение в

сторону откоса. Практически величина  $m$  определяется подсчетом соотношения случаев различного залегания кососекущих трещин. В некоторых случаях величину  $m$  можно найти по интенсивности трещиноватости, определив на откосах интенсивность и среднюю протяженность кососекущих трещин, а при известном размере структурных блоков можно узнать и их процентное содержание.

Рекомендована следующая формула для определения коэффициента структурного ослабления [1]:

- при достаточной изученности структуры массива

$$\lambda_1 = \lambda_w \lambda_\Delta \lambda_\sigma \lambda_M \lambda_{rp} \lambda_n \lambda_{\Delta\alpha};$$

- при недостаточной изученности структуры массива

$$\lambda'_1 = \lambda_w \lambda_\Delta \lambda_\sigma \lambda_M.$$

Факторы 1, 3, 5, 6 являются основополагающими, влияющими на прочность массива.

С одной стороны, формула учитывает большинство факторов, влияющих на коэффициент структурного ослабления, и ее применение в конкретных условиях дает высокую степень точности, с другой стороны, большое число эмпирических коэффициентов может дать значительную погрешность при вычислении в условиях, отличающихся от условий, в которых проводились исследования.

Рассмотрим другой критерий перехода от прочности образца к прочности массива по методике Хоека – Брауна [4]. Прочность на одноосное сжатие выражается как

$$\sigma_{сж.массива}^0 = \sigma_{сж.обр}^0 s^a,$$

где  $s$  и  $a$  – безразмерные константы для горного массива,

$$s = e^{\left(\frac{GSI-100}{9-3D}\right)}; \quad a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left( e^{\frac{-GSI}{15}} - e^{\frac{-20}{3}} \right),$$

$GSI, D$  – эмпирические константы, учитывающие степень трещиноватости, взрывную поврежденность и релаксационные особенности пород.

Упрощенная классификация скальных массивов по 100-балльной шкале ( $GSI$ ):

Класс	Описательная характеристика	Оценка в баллах
I	Очень хороший массив	100 ← 90
II	Хороший массив	90 ← 70
III	Удовлетворительный массив	70 ← 50
IV	Плохой массив	50 ← 25
V	Очень плохой массив	< 25

Оценка коэффициента нарушения  $D$ :

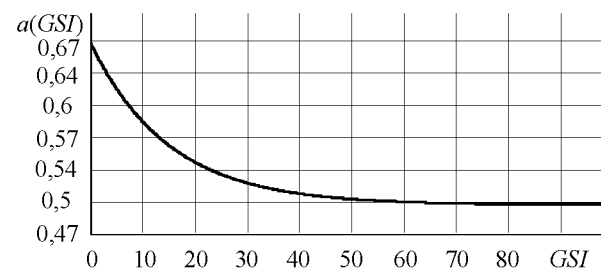
Описание нарушения горного массива	$D$
Практически монолитные, обусловленные хорошим качеством взрывания и механизацией горных работ	0
Мелкотрещиноватые, обусловленные механизацией горных работ	0,5
Умеренно трещиноватые, обусловленные маломасштабным ведением буровзрывных работ	0,7
Сильнотрещиноватые, обусловленные массовыми взрывами	0,8
Чрезвычайно трещиноватые повреждения массива, обусловленные массовыми взрывами и снятием напряжений при удалении вскрыши	1

Как видно из рисунка, во многих случаях показатель  $a$  можно принимать равным 0,5.

Параметр  $s^a$  в критерии Хоека – Брауна учитывает степень нарушенности массива и снижения его прочности на сжатие по сравнению с образцом.

Методика Хоека – Брауна не имеет строго теоретического обоснования, основывается на эмпирическом подходе и пригодна лишь в узких пределах изменения опытных данных, в ходе которых эта формула была получена.

Г.Л.Фисенко по результатам натурных испытаний установил зависимость [3] меж-



Пределы изменения показателя степени  $a$  в зависимости от параметра свойств массива  $GSI$  в критерии Хоека – Брауна

Таблица 1

Значение коэффициента  $a$  для различных пород

Группа пород	Наименование пород и характер трещиноватости	Величина сцепления в монолите, МПа	Величина коэффициента $a$
III	Слабоуплотненные и слаботрещиноватые песчано-глинистые отложения, сильно выветрелые полностью каолинизированные изверженные	0,4-0,9	0,5
	Уплотненные песчано-глинистые, в основном, нормальносекущей трещиноватости	0,1-2,0	2
II	Сильно каолинизированные изверженные	3,0-8,0	2
	Уплотненные песчано-глинистые с развитой кососекущей трещиноватостью, каолинизированные изверженные	3,0-8,0	3
	Средней крепости слоистые, нормальносекущей трещиноватости	10-15	3
		15-17	4
		17-20	5
I	Крепкие, преимущественно нормальносекущей трещиноватости	20-30	6
	Крепкие изверженные с развитой кососекущей трещиноватостью	>30	7
		>20	10

Таблица 2

## Классификация пород по трещиноватости

Категории по трещиноватости	Степень трещиноватости (блочности) массива	Среднее расстояние между трещинами, м	Цельная трещиноватость, м <sup>-1</sup>
I	Чрезвычайно трещиноватые (мелкоблочные)	До 0,1	Более 10
II	Сильнотрещиноватые (среднеблочные)	0,1-0,5	10-2
III	Среднетрещиноватые (крупноблочные)	0,5-0,1	2-1
IV	Малотрещиноватые (весьма крупноблочные)	1-1,5	1-0,65
V	Практически монолитные	Свыше 1,5	До 0,65

Таблица 3

Определение коэффициента нарушения  $D$  с помощью расстояния между трещинами

Категории по трещиноватости	Описание нарушения горного массива	Среднее расстояние между трещинами, м	$D$
I	Чрезвычайно трещиноватые повреждения массива, обусловленные массовыми взрывами и снятием напряжений при удалении вскрыши	До 0,1	1
II	Сильнотрещиноватые, обусловленные массовыми взрывами	0,1-0,5	0,8
III	Умеренно трещиноватые, обусловленные маломасштабным ведением буровзрывных работ	0,5-0,1	0,7
IV	Мелкотрещиноватые, обусловленные механизацией горных работ	1-1,5	0,5
V	Практически монолитные, при отсутствии буровзрывных работ	Свыше 1,5	0

ду сцеплением в образце и в массиве для поверхностей, не совпадающих с поверхностями ослабления, которая может быть выражена эмпирической формулой:

$$C_m = \frac{C}{1 + a \cdot \ln\left(\frac{H}{l}\right)},$$

где  $a$  – коэффициент, зависящий от прочности пород в монолитном образце и характера их трещиноватости (табл. 1).

Формула Г.Л.Фисенко применима к массивам, ослабленным системами трещин, близкими к взаимно перпендикулярным, в которых преобладают не скольжение между блоками, а их отрыв и поворот.

Приведенная методика относительно проста и удобна. Ее можно использовать как для крепких, так и для слабых пород.

Сравним применение приведенных методик для следующего случая: прочность пород на одноосное сжатие 8 МПа; сцепление в образце  $C_0 = 3$  МПа; высота уступа  $H = 10$  м; средний размер элементарного структурного блока  $l = 0,35$  м; развитая косесекущая трещиноватость, взрывная отбойка.

Коэффициент структурного ослабления  $\lambda_1 = 0,069$  [2];  $\lambda_2 = 0,006$  [3];  $\lambda_3 = 0,019$  [1].

При применении различных методов коэффициент структурного ослабления изменяется более чем в 10 раз. Рассмотрим причины столь больших расхождений.

При определении коэффициента структурного ослабления методом, рекомендованным инструкцией ВНИМИ [1], получен результат, средний по величине относительно других методов. Применение этого метода возможно лишь при тщательном исследовании горного массива, что в некоторых случаях бывает затруднительно, а также не дает полного физического представления о массиве, так как формула представляет собой произведение коэффициентов разной природы. Метод Хоека – Брауна дает заниженный результат. Это обусловлено широким диапазоном классификации *GSI*. Пример зависимости коэффициента структурного ослабления от параметра *GSI*:

<i>GSI</i>	Коэффициент структурного ослабления
25	0,002
35	0,006
48,1	0,019
50	0,022

Так, к примеру, при  $GSI = 48,1$  коэффициент структурного ослабления будет таким же, как и при применении метода ВНИМИ.

Таким образом, необходимо обоснование применения параметра *GSI*.

В формуле Хоека – Брауна важную роль играет параметр  $D$ , но так как он носит описательный характер, его необходимо уточнять. Существует сходная классификация пород по трещиноватости (табл.2) в которой блочность массива определяют исходя из среднего расстояния между трещина-

ми. Эти две классификации настолько близки по принципам построения и даже значениям коэффициентов, что предполагается объединить их в единую классификацию (табл.3).

Методика Г.Л.Фисенко [2] дает завышенные результаты и требует уточнения. Одним из главных факторов является параметр  $a$ . Влияние формы блоков и интенсивности трещиноватости на прочность трещиноватого массива существенно сказываются только в случае, когда  $H/l \leq 20-40$ , а при  $H/l > 40$  практически не сказывается.

На этапе проектирования разработки новых месторождений натурные испытания и обратные расчеты не могут быть проведены из-за отсутствия обнажений пород. Эти обстоятельства делают весьма ценными поиски функций или коэффициентов, связывающих значения прочности массива с характеристиками малых образцов.

Коэффициент структурного ослабления является общим критерием перехода от прочности образца к прочности массива, но, к сожалению, применение разных методик для определения коэффициента структурного ослабления дает различные результаты. Таким образом, этот вопрос является не до конца изученным и требует дальнейшего исследования.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Инструкция по расчету устойчивости бортов разрезов при их ликвидации и обеспечению сохранности прилегающих к разрезам территорий / ВНИМИ. Л., 1977. С.32-36.
2. Фисенко Г.Л. Устойчивость бортов карьеров и отвалов. М.: Недра, 1965. 378 с.
3. Hoek E., Caranza-Torres C., Corcum B. Hoek-Brown failure criterion // Proceedings of the North American Rock Mechanics Society. Mining Innovation and Technology. Toronto. 2002. P.267-273.

## REFERENCES

1. The instruction on calculation of stability of strip pit slopes at their liquidation and providing of safety for territories adjoining to strip pit / VNIMI. Leningrad, 1977. P.32-36.
2. Fisenko G.L. Stability of slopes for open pit mining and hillock. Moscow: Nedra, 1965. P.378.
3. Hoek E., Caranza-Torres C., Corcum B. Hoek-Brown failure criterion // Proceedings of the North American Rock Mechanics Society. Mining Innovation and Technology. Toronto. 2002. P.267-273.