

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ханукаев А.Н. Энергия волн напряжений при разрушении пород взрывом. – М.: Госгортехиздат, 1962. – 200 с.: ил.
2. Баум Ф.А., Григорян С.С., Санасарян Н.С. Определение импульса взрыва вдоль образующей скважины и оптимальных параметров скважинного заряда // Взрывное дело. – 1964. – № 54/11. – С. 53-102.
3. Руководство по ведению взрывных работ на калийных рудниках Верхнекамского месторождения. – Пермь, 1984. – 195 с.
4. Лыхин П.А., Мальцев В.М. Нормированный импульс дробления как показатель дробимости горных пород // Физические проблемы разрушения массивов горных пород: сб. докл. Междунар. конф. – М.: РАН, 1999. – С.174-176.
5. Мальцев В.М. Расчет радиуса зоны трещинообразования одиночного удлиненного заряда ВВ // Стратегия и процессы освоения георесурсов: материалы ежегод. науч. сес. ГИ УрО РАН по результатам НИР в 2009 г. – Пермь, 2010. – С. 220-222.

УДК 622.02

DOI:10.7242/echo.2020.1.10

**О РЕЗУЛЬТАТАХ РАЗРАБОТКИ КРИТЕРИЯ ПРОЧНОСТИ
ДЛЯ УСЛОВИЙ ИСТИННОГО ТРЕХОСНОГО НАПРЯЖЕННОГО
СОСТОЯНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД**

И.Л. Паньков

Горный институт УрО РАН, г. Пермь

Аннотация: Разработан новый критерий прочности горных пород для условий истинного трехосного напряженного состояния, параметры которого находятся по результатам комплексного определения пределов прочности на одноосное растяжение, одноосное сжатие и двухосное равнокомпонентное сжатие. Приведены результаты комплексного определения прочностных показателей, а также параметров разработанного критерия для различных типов горных пород. Построены зависимости изменения предела прочности сильвинита от величины промежуточного и минимального главных напряжений.

Ключевые слова: горная порода, главные напряжения, критерий прочности, истинное трехосное напряженное состояние.

В настоящее время одним из наиболее мощных инструментов при решении задач геомеханического обеспечения безопасных условий разработки полезных ископаемых, добываемых в сложных горно-геологических условиях, является компьютерное моделирование напряженного состояния подрабатываемых горных массивов. Развитие возможностей вычислительной техники позволяет реализовывать решения задач в трехмерной постановке с определением всех трех компонент поля главных напряжений (т.н. истинного трехосного напряженного состояния). Данный подход подразумевает, что при оценке состояния массива должны использоваться критерии прочности, включающие в свое математическое выражение не только максимальные (σ_1) и минимальные (σ_3), но и промежуточные (σ_2) главные напряжения. Несмотря на большое количество предложенных различными исследователями критериальных зависимостей [1], список наиболее часто применяемых критериев для решения такого типа задач геомеханики весьма ограничен. К таким критериям, в первую очередь, относится эмпирический критерий Моги [2] и его степенная модификация, предложенная Колменарисом и Зобаком [3]. Также удовлетворительные результаты для различных типов горных пород дает обобщенный вариант линейного критерия Друкера-Прагера, предложенный Парижо [4], и, по своей сути, являющийся следствием обобщения энергетической теории прочности Мизеса [5].

Необходимо отметить, что одним из основных факторов, значительно затрудняющих исследования в области разработки критериев прочности, является высокая трудоемкость экспериментального определения прочностных показателей горных пород в условиях истинного трехосного напряженного состояния, а также значительная стоимость оборудования для проведения таких испытаний. В этой связи, разработка критериев прочности горных пород при истинном напряженном состоянии на основе результатов простых экспериментальных исследований, является крайне актуальной задачей, решение которой позволит значительно повысить надежность рекомендаций по повышению безопасных условий ведения горных работ в сложных горно-геологических условиях.

В рамках решения данной задачи разработан новый критерий прочности горных пород, учитывающий линейное влияние промежуточного главного напряжения и имеющий следующий вид:

$$\frac{\sigma_1^2}{\sigma_1 + A} = B + C\sigma_2 + \sigma_3, \quad (1)$$

где A, B, C - параметры критерия прочности.

В качестве примера применимости предлагаемого критерия, на рис. 1 приведены результаты ранее проводимых исследований по определению прочности ($\sigma_{пр}$) карналлита в камере объемного сжатия (схема Кармана), а также теоретической кривой, полученной с помощью уравнения (1), удовлетворительно описывающей экспериментальные данные.

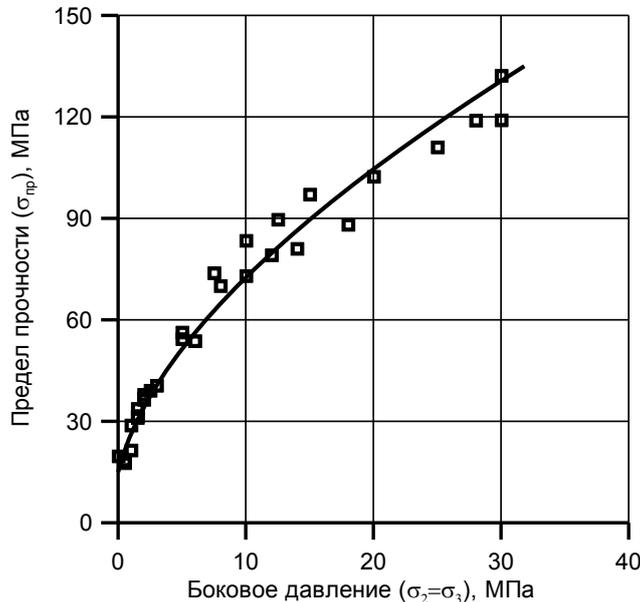


Рис. 1. Результаты сопоставления экспериментальных и теоретических данных определения предела прочности карналлита при различном боковом давлении

В общем случае, параметры критерия (1) находятся по результатам комплексного определения пределов прочности на одноосное растяжение (σ_p), одноосное сжатие ($\sigma_{сж1}$) и двухосное равнокомпонентное сжатие ($\sigma_{сж2}$).

Величина главных напряжений, соответствующих разрушению породы при различных схемах нагружения, составляет:

- при одноосном растяжении

$$\sigma_1 = \sigma_2 = 0, \sigma_3 = \sigma_p; \quad (2)$$

- при одноосном сжатии

$$\sigma_1 = \sigma_{сж1}, \sigma_2 = \sigma_3 = 0; \quad (3)$$

- при двухосном равнокомпонентном сжатии

$$\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_{сж2}, \sigma_3 = 0. \quad (4)$$

В соответствии с условиями (2) – (4), параметры критерия прочности (1), определяются по формулам:

$$B = -\sigma_p, \quad (5)$$

$$A = \frac{\sigma_{сж1}^2}{-\sigma_p} - \sigma_{сж1}, \quad (6)$$

$$C = \frac{\sigma_{сж2}}{\sigma_{сж2} + A} + \frac{\sigma_p}{\sigma_{сж2}}. \quad (7)$$

Схемы испытаний при комплексном определении прочностных показателей горных пород приведены на рис. 2.

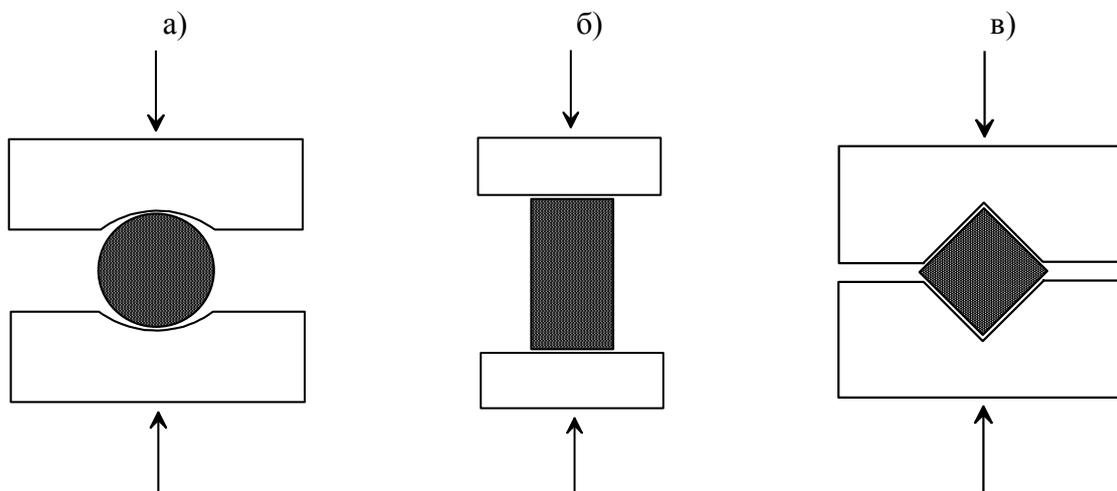


Рис. 2. Схемы испытаний при комплексном определении прочностных показателей горных пород:
а – одноосное растяжение (Бразильский метод); б – одноосное сжатие;
в – двухосное равнокомпонентное сжатие

Экспериментальная апробация разработанной методики проводилась на породах Верхнекамского месторождения калийных солей (Россия), а также месторождений «Аксу», «Жолынбет» и «Северный Катпар» (Казахстан). Вид разрушенных образцов после проведения испытаний приведен на рис. 3.

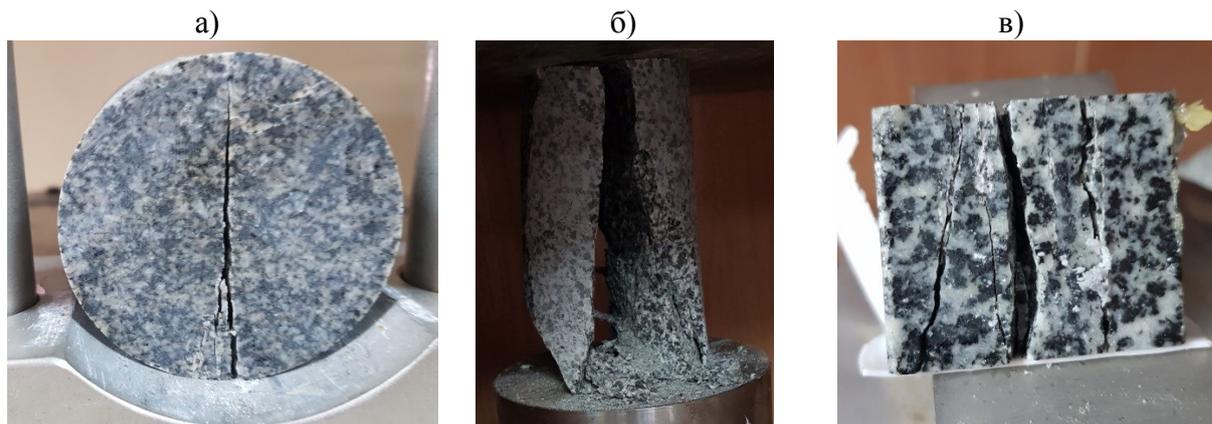


Рис. 3. Характерный вид разрушенных образцов после проведения испытаний:
а – одноосное растяжение; б – одноосное сжатие; в – двухосное равнокомпонентное сжатие

Как видно из рис.3, характер разрушения испытанных образцов определяется влиянием поперечной к действующей нагрузке деформации в направлении свободной поверхности.

Осредненные результаты комплексного определения прочностных показателей, а также значения параметров критерия прочности (1) для различных типов пород, вычисленных по формулам (5) - (7), представлены в табл.

Таблица

Результаты комплексного определения прочностных показателей и параметров критерия прочности для различных типов горных пород

Порода	Кол-во проб	Показатели прочности			Параметры критерия		
		σ_r , МПа	$\sigma_{сж1}$, МПа	$\sigma_{сж2}$, МПа	A, МПа	B, МПа	C
Месторождения «Аксу» и «Жолынбет», Казахстан							
алевролит	8	-7,1	59,4	113,6	437,6	7,1	0,14
диорит	16	-16,0	99,6	135,2	520,4	16,0	0,09
песчаник	5	-6,0	51,1	79,5	384,1	6,0	0,10
Дайки андезитовых порфиритов	4	-12,1	60,8	99,5	244,7	12,1	0,17
Месторождение «Северный Катпар», Казахстан							
Мраморизованный известняк	18	-5,5	34,6	67,6	183,1	5,5	0,19
Углистый алевролит	5	-3,5	16,9	25,2	64,7	3,5	0,14
Верхнекамское месторождение калийных солей, Россия							
Каменная соль	3	-2,5	20,2	43,5	143,0	2,5	0,18
Сильвинит	6	-2,6	23,1	92,1	182,1	2,6	0,31
Карналлит	3	-0,3	4,9	17,5	75,1	0,3	0,17

По результатам определения параметров критерия прочности (см. табл.) получены зависимости влияния минимального и промежуточного главных напряжений на предел прочности сильвинита (рис. 4).

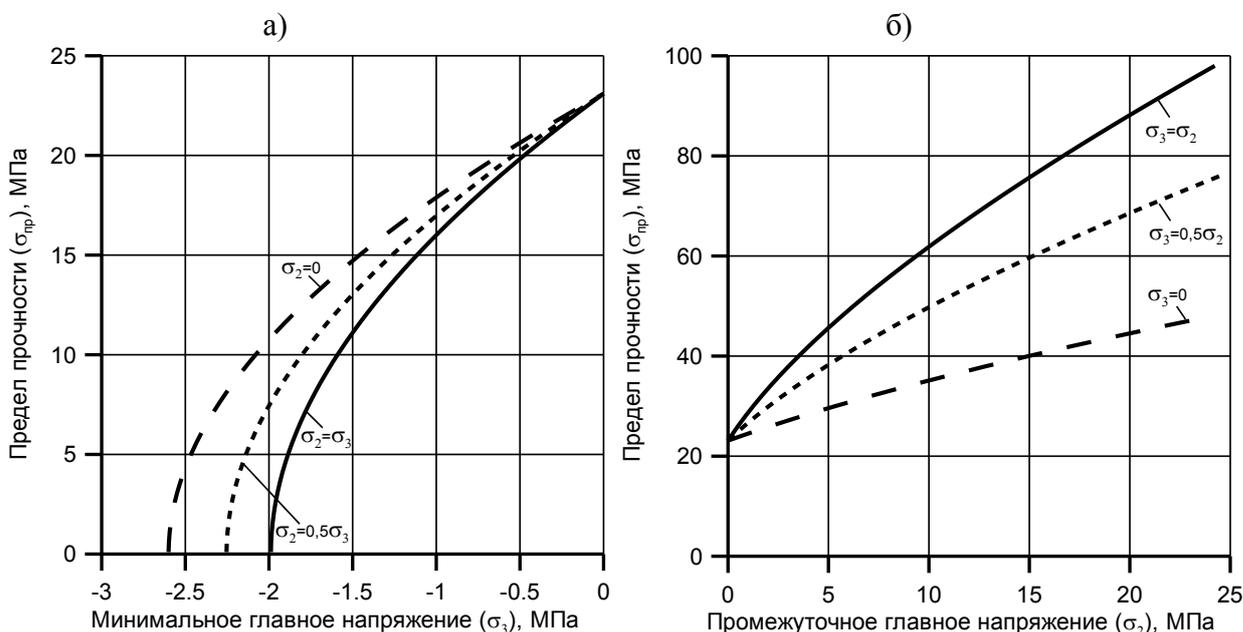


Рис. 4. Зависимости изменения предела прочности сильвинита от минимального и промежуточного главных напряжений в зоне растяжения (а) и сжатия (б)

Предлагаемый критерий прочности, а также разработанная методика комплексного определения прочностных показателей горных пород, позволит существенно снизить уровень трудозатрат проведения экспериментальных исследований с одновременным повышением качества геомеханической оценки состояния элементов системы разработки, применяемой при подземной добыче полезных ископаемых в сложных горно-геологических условиях.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Пермского края в рамках научного проекта №19-45-590004 и программы ФНИ (проект № 0422-2019-0148-С-01, регистрационный номер темы НИОКТР: АААА-А18-118040690032-2).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Литвинский Г.Г. Аналитическая теория прочности горных пород и массивов: Монография / ДонГТУ. – Донецк: Норд-Пресс, 2008. – 207 с.
2. Mogi K. Effect of the intermediate principal stress on rock failure // Journal of Geophysical Research. – 1967. – V. 72. – P. 5117-5131.
3. Colmenares L.B., Zoback M.D. A statistical evaluation of intact rock failure criteria constrained by polyaxial test data for five different rocks // International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences. – 2002. – V. 39. – P. 695-729.
4. Pariseau W.G. Fitting failure criteria to laboratory strength tests // International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences. – 2007. – V. 44. – P. 637-646.
5. Ma Lin-jian, Liu Xin-yu, Fang Qin, Ma Shu-na. Statistical evaluation of five failure criteria for intact salt rock // J. Cent. South Univ. Technol. – 2011. – V. 18. – P. 925-931.