

В.П. Пустовойтенко, к.т.н.
 О.О. Сдвижкова, к.т.н., доц.
 О.М. Шашенко, д.т.н., проф.
 Національна гірнична академія України

ДО МЕТОДИКИ ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА КРИХКОСТІ ГІРСЬКИХ ПОРІД

Викладено методику визначення коефіцієнта крихкості гірських порід. Запропоновано конструкцію приладу для визначення межі міцності гірських порід на зсув. Подані дані випробувань гірських порід стосовно умов Кримського родовища вапняків та вуглевміщуючих порід Донбасу.

Стійкість підземних виробок залежить від багатьох факторів, але основним з них є міцність несучих елементів – ціликів, стелин камер. Дослідження, виконані в роботі [1], показують, що величина еквівалентного напруження, яка комплексно відбиває здатність вміщуючого породного масиву опиратися руйнуванню в складному напруженому стані, за інших рівних умов значною мірою залежить від ступеня його літогенезу, що визначає характер структурних зв'язків, тип цементу, співвідношення пружних і пластичних властивостей. Існує досить багато пропозицій з обліку ступеня літіфікації гірських порід в задачах геомеханіки. Одним з найбільш практичних є облік цієї обставини за допомогою так званого коефіцієнта крихкості ψ , який дорівнює відношенню межі міцності на одноісний розтяг R_p до межі міцності на одноосовий стиск R_c . У такому вигляді ця величина присутня в критеріях міцності [2], на основі яких виконуються розрахунки несучої здатності опорних елементів підземних споруд. Особливо характерний вплив ступеня літіфікації відносно осадових порід, для яких коефіцієнт крихкості може змінюватись в значних межах, наприклад, для піщаників Донбасу і глин Нікопольського марганцевого басейну. Формування і зміцнення осадових порід відбувається внаслідок утворення структур розчинення під тиском. Індикаторами є регенераційні зерна кварцу і типові структури цементу. Основні зони зміни типів цементів та сполучені з ними зміни фізико-механічних властивостей, згідно з А.Г. Коссовською та В.Д. Шутовим [3], наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Співвідношення ступеня зміни типів цементації порід у процесі літогенезу з фізико-механічними властивостями

Градація літогенезу	Зони постдіагенетичної зміни осадової речовини	Вуглемарочна шкала	Модель гірської породи	
			фізична	механічна
ДГ-ПК ₁	Зона незміненого глинистого цементу	Торф-буре вугілля (Б ₁)	Пухке пористе середовище з газово-рідинним заповненням порового простору: пливунне середовище	Паскаля
ПК ₂ -ПК ₃	Зона зміненого глинистого і кварц-регенераційного цементу	Б ₂ -Б ₃	Пористе середовище з газово-рідинним заповненням: пластичне середовище	Кулона
МК ₁ -МК ₂	Те ж	Д-Г	Пружно-в'язке-пластичне середовище	Бінгама-Шведова
МК ₃ -МК ₅	Те ж	Ж-ОС		
АК ₁ -АК ₂	Зона кварцитовидних структур і діоктаедрично-гідрослюдисто-хлоритового цементу	Т-ПА	Суцільне тверде тіло: пружно-в'язке середовище	Кельвіна
АК ₃ -АК ₄	Зона "шиповидних" піщаників і філіто-подібних сланців	А ₁ -А ₄	Пружне середовище Крихке середовище	Гаука Евкліда

З таблиці випливає, що від стадії бурого вугілля, де вміщуючі породи представлені незцементованими пісками і пластичними глинами, які легко розмочуються у воді і в ряді місць іноді знаходяться в пливунному стані, до стадії антрацитів і суперантрацитів відбувається поступове формування міцнісних властивостей з одночасним підвищенням ролі крихких і зменшенням ролі пластичних властивостей. Остання обставина значною мірою пов'язана зі зміною структури осадових порід, зокрема, збільшенням розміру зерен за рахунок вторинних процесів регенерації: мінеральна маса стає більш однорідною за міцністю, її опір крихкому руйнуванню знижується. Крихке руйнування, якщо розрив структурних зв'язків відбувається практично без порушення закону Гука при дуже малій деформації, є яскраво вираженою ознакою пружних властивостей матеріалу.

Гірські породи є середовищем, в якому проходить гірнична виробка. При досягненні визначеної глибини породний масив унаслідок концентрації напружень, викликаних утворенням порожнини, може руйнуватися, утворюючи область непружних деформацій. Очевидно, що величина граничної глибини і наступний процес руйнування для порід різного ступеня літіфікації (крихкості) будуть неоднаковими. Крихке руйнування відбувається з високою швидкістю і мінімальною дисипацією енергії. Деформування пластичних порід, при тій же межі міцності, вимагає значно більших витрат енергії і протікає досить повільно [4].

Достатньо чіткого загальноприйнятого критерію, відповідно до якого породи можуть бути віднесені до пластичних чи крихких, немає. Одні й ті ж породи, в залежності від виду напруженого стану, швидкості навантаження, температури, вологості і т.п., можуть поводитись і як крихкі, і як пластичні.

Пропонуємо оцінювати крихкість гірських порід відношенням роботи, витраченої на руйнування реального зразка, до роботи, витраченої на руйнування ідеально пружної породи з тією ж межею міцності [5]. У тій же роботі відзначається, що зазвичай підвищення межі міцності на одноосьовий стиск призводить до зменшення її пластичних властивостей, тобто порода стає більш крихкою.

В роботі [6] пропонується оцінювати крихкість гірських порід відношенням роботи, витраченої на деформування породного зразка в умовах одноосьового стиску до межі міцності, до роботи, витраченої на руйнування того ж зразка за межею міцності.

Л.А. Шрейнер [7] вказував на можливість оцінювати крихкість твердих тіл відношенням енергії зсувоутворення до сповненої енергії взаємодії в площині зсуву.

Відзначені ще деякі пропозиції щодо оцінки крихких властивостей гірських порід, однак всі вони, як і перераховані раніше, мають один загальний недолік: їх неможливо ввести в умову міцності, що є основою для математичного опису рівноважного стану породного масиву в околиці виробки. Такою величиною, вільною від зазначеного недоліку, є визначене вище відношення межі міцності на одновісний розтяг до межі міцності на одноосьовий стиск – ψ , що, на думку багатьох дослідників, є дуже показовим для порівняльної характеристики гірських порід за ступенем крихкості. Фізичний зміст величини ψ , за визначенням Г.С. Писаренка і А.А. Лебедева [8], полягає в тому, що вона «характеризує ступінь участі в макроруйнуванні зсувної деформації, що створює сприятливі умови для розпушення матеріалу та утворення тріщин».

Відношення ψ для гірських порід за даними різних авторів коливається від $1/3$ до $1/80$, де верхня межа відповідає глинистим породам, а нижня – найбільш крихким. Теоретично нижня межа величини ψ дорівнює $1/8$ (теорія крихкого руйнування Гриффітса) і розбіжність його з даними досліджень є наслідком того, що випробуваний зразок вже містить приховані мікротріщини, які знижують його міцність. У відношенні верхньої межі є всі підстави думати, що для зволжених глинистих порід граничне його значення наближене до одиниці [9]. Незначна кількість літературних даних, які підтверджують цю обставину, викликана недосконалістю методів досліджень гірських порід на розтягування.

Відомі методи визначення міцності гірських порід на розтягування поділяються на прямі і непрямі. Переважна більшість такого роду досліджень проводиться з використанням непрямих методів, що за характером прикладення зовнішніх сил до зразка можна розподілити на три групи [10]:

- методи розколювання стискаючими навантаженнями;
- методи розриву пустотілих зразків;
- методи вигину.

Методи прямих випробувань, в основі яких лежить розтягування зразків циліндричної форми, через складність, а часом, і неможливість виготовлення зразків необхідних розмірів, застосовуються вкрай рідко, як еталонні.

Таким чином, слабкі глинисті породи, для яких величина ψ може істотно відрізнятись від нуля, випробовують практично завжди із застосуванням або «бразильського» методу, або за методикою ВНДМІ із застосуванням співвісних пуансонів. Теоретичною основою даних методів є, відповідно, задачі Герца і Ляме, які справедливі тільки для пружних матеріалів, що підкоряються при деформуванні закону Гука аж до моменту руйнування. У слабких гірських породах з великим вмістом глинистих часток ділянка пружного деформування мала і, втрачаючи пружність, вони ще не руйнуються, зсувні деформації віддаляють момент поділу зразка на частини. З цієї причини непрямі методи визначення межі міцності на одновісний розтяг, що дають цілком прийнятні результати під час випробувань міцних порід, не можуть забезпечити необхідну точність у випадку слабких глинистих порід типу аргілітів, алевролітів, вапняків і т.п. Особливо великою повинна бути помилка при застосуванні найбільш розповсюдженого «бразильського» методу. Велике деформування зразка вже на початковій стадії навантаження неминуче призводить до істотного відхилення від вихідної розрахункової схеми Герца, що лежить в основі теоретичного обґрунтування методу.

Міцнісні механічні характеристики є граничним значенням напружень, що передують руйнуванню зразка в умовах одноосового стиску чи розтягування. Оскільки руйнування гірських порід можна оцінювати відповідною теорією міцності, аналітичний вираз якої також містить дані характеристики, то цілком закономірною є розробка непрямого методу визначення межі міцності на одновісний розтяг на основі аналізу такої теорії.

З рівняння граничної огинаючої кіл Мору [1] випливає, що при $\sigma = 0$ (стан чистого зсуву), основні міцнісні характеристики пов'язані між собою залежністю:

$$R_c = 0,5 \sqrt{R_c R_p}, \quad (1)$$

де R_c – межа опору матеріалу зсувним зусиллям при відсутності нормальної складової напружень.

Таким чином, якщо виконати порівняно нескладні випробування конкретної гірської породи на одноосовий стиск і чистий зсув, то відповідно до (1) межа міцності на одновісний розтяг може бути визначена за формулою:

$$R_p = \frac{4R_c^2}{R_c}. \quad (2)$$

Дослідженню процесу випробувань гірських порід в умовах одноосового стиску присвячено багато робіт, він досить добре вивчений. Визначення зсувних характеристик проводиться значно рідше. Практично завжди такі дослідження проводяться або на зразках кубічної форми (зсув зі стиском), або на зразках-балочках (чистий зсув). У будь-якому випадку використання породних зразків у формі правильних багатогранників сполучено із складністю виготовлення, а із слабких порід виготовити їх взагалі практично неможливо.

Найпростіше одержати зразки з кернів гірських порід з наступною їх обробкою на каменерізній машині і доведенням на шліфувальному колі. При цьому завжди можна забезпечити необхідну нормативами точність.

На рис. 1 подана схема приладу для визначення межі міцності гірських порід в умовах чистого зсуву. Він складається з циліндричного корпусу 1, в якому на трьох направляючих 5 розташований пуансон 2. Діаметр робочої частини пуансона – 10 мм. Породний зразок 3 поміщують через бічний проріз на дно корпусу, співвісність зразка, пуансона й отвору 11 забезпечується конструкцією приладу і за допомогою фіксаторів 4. Між фіксуєчим диском 7 і зразком для вибору неминучих зазорів розташована прокладка 6 з вакуумної гуми. Навантаження приладу виконується за допомогою гвинта 9. У випадку міцних порід прилад служить приставкою до серійного пресового устаткування. Навантаження фіксується на приладі типу ИД-62, тензодатчик розташовується на мембрані 8. В залежності від міцності випробуваних порід існує набір мембран товщиною 1, 2, 3, 4 і 5 мм. Зруйнована порода прибирається за допомогою піддона 10.

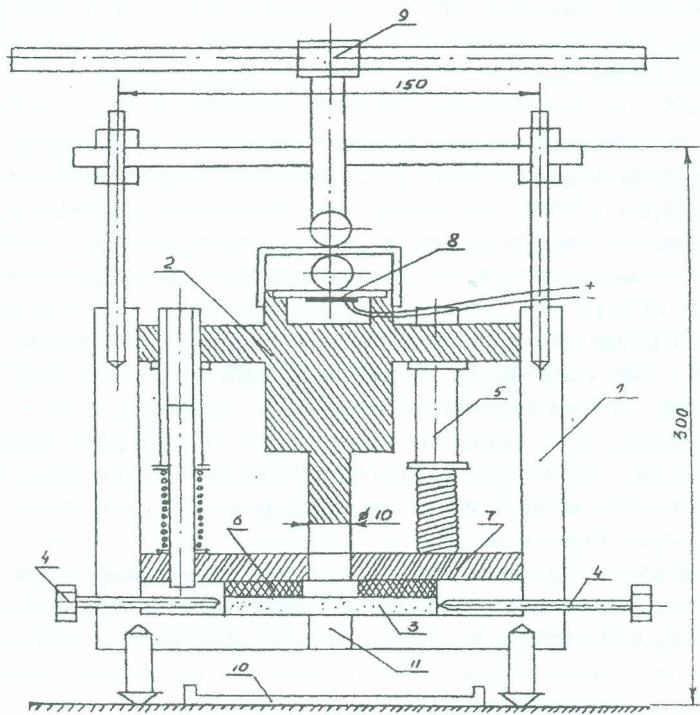


Рис. 1. Зсувний прилад:

1 – корпус; 2 – пуансон; 3 – зразок; 4 – фіксатори; 5 – направляючі; 6 – гумова прокладка; 7 – фіксуючий диск; 8 – мембрана з тензодатчиком; 9 – навантажуючий гвинт; 10 – піддон; 11 – отвір

Породні зразки виготовляються шляхом розпилювання керна діаметром 50...70 мм на диски товщиною 3...5 мм. Керна перед розпилюванням відповідним чином підготовлюється, зокрема, проводиться перевірка перпендикулярності твірної циліндра до основи. Диски доводяться до готовності на шліфувальному колі.

Величина межі міцності на зсув визначається за формулою:

$$R_{\tau} = \frac{P}{\pi \delta}, \text{ МПа}, \quad (3)$$

де P – максимальне руйнівне навантаження; δ – товщина зразка-диска.

Для досліджень на чисте зрушення були підготовлені зразки мшанкового і туррителового вапняків Криму, вапняки, пісковики, аргіліти й алевроліти Центральної і Східної частин Донбасу. Диски виготовлялися товщиною 2, 3, 4, 5, 7 і 10 мм для того, щоб встановити такі геометричні параметри, за яких забезпечувалося б одержання достатньо надійної інформації.

В результаті досліджень встановлено, що для міцних порід оптимальне значення товщини зразка повинне бути 3...4 мм, для зразків середньої міцності – 5...6 мм, для слабких зразків глинистих порід – 8...10 мм.

Отримані значення міцнісних характеристик випробуваних гірських порід наведені в табл. 2.

Таблиця 2

Міцнісні характеристики деяких осадових порід

Порода	Межа міцності, МПа (коефіцієнт варіації, %)			ψ
	Одноосьовий стиск	Чистий зсув	Одновісний розтяг	
Вапняк туррителовий (Крим)	4,3 (36,5)	0,65 (21,2)	0,39 (26,2)	0,09
Вапняк мшанковий (Крим)	5,6 (37,2)	0,9 (18,7)	0,57 (24,3)	0,10
Вапняк (Центральний Донбас)	48,3 (19,2)	6,9 (16,2)	3,9 (18,7)	0,085
Пісковик (Центральний Донбас)	64,5 (18,7)	9,9 (12,1)	4,8 (16,0)	0,075
Аргіліт (Східний Донбас)	31,5 (28,3)	7,2 (14,2)	6,5 (25,3)	0,21
Алевроліт (Східний Донбас)	26,5 (31,2)	6,8 (18,6)	7,1 (26,2)	0,27

Як видно з табл. 2, отримані значення межі міцності на одновісний розтяг відповідають існуючим уявленням і не істотно розходяться з даними, що наводяться іншими дослідниками. Метод досліджень, що пропонується, менш трудомісткий у порівнянні з існуючими, досить надійний і ефективний при встановленні ступеня крихкості слабких гірських порід.

ЛІТЕРАТУРА:

1. *Шашенко А.Н.* Устойчивость подземных выработок в неоднородном породном массиве. Дисс. ... д.т.н. ДГИ: Днепропетровск, 1988. – 507 с.
2. Расчеты на прочность в машиностроении / С.Д. Пономарев, В.Л. Бидерман, К.К. Лихарев и др. – Т. 1. – М.: Машгиз, 1956. – 884 с.
3. *Коссовская А.Г., Шутов В.Д.* Проблема эпигенеза // Эпигенез и его минеральные индикаторы. – М.: Наука, 1971. – С. 9–34.
4. *Спивак А.И., Попов А.Н.* Механика горных пород. – М.: Недра, 1975. – 200 с.
5. *Лавров В.В.* Природа масштабного эффекта у льда и прочность ледяного покрова. – ДАН СССР, 1958. – 122. – № 4. – 248 с.
6. *Полилов А.Н.* Объяснение масштабного эффекта на основе энергетического критерия разрушения. – Механика твердого тела, 1984. – № 1. – С. 106–110.
7. *Шрейнер Л.А.* Физические основы механики горных пород. – М.: Гостоптехиздат, 1959. – 211 с.
8. *Писаренко Г.С., Лебедев А.А.* Сопrotивление материалов деформированию и разрушению при сложном напряженном состоянии. – К.: Наукова думка, 1969. – 209 с.
9. Методы определения прочности глинистых пород / Под ред. Г.К. Бондарика. – М.: Недра, 1974. – 216 с.
10. Свойства горных пород и методы их определения / Ю.М. Карташов, Б.В. Матвеев, Г.В. Михеев и др. – М.: Недра, 1979. – 269 с.

ПУСТОВОЙТЕНКО Валерій Павлович – кандидат технічних наук, міністр транспорту України.

Наукові інтереси:

– проблеми геомеханічного забезпечення підземного будівництва.

тел (0562) 45-99-72, E-mail: ShashenkoA@nmuu.dp.ua.

СДВИЖКОВА Олена Олександрівна – кандидат технічних наук, доцент кафедри вищої математики Національної гірничої академії України.

Наукові інтереси:

– проблеми статистичної геомеханіки.

тел (0562) 47-17-17, E-mail: ShashenkoA@nmuu.dp.ua.

ШАШЕНКО Олександр Миколайович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри будівельних геотехнологій і конструкцій Національної гірничої академії України.

Наукові інтереси:

– проблеми геомеханіки, стійкість гірничих виробок.

тел (0562) 47-13-72, E-mail: ShashenkoA@nmuu.dp.ua.

Подано 20.09.2001