

В.А.КОРШУНОВ, канд. техн. наук, старший научный сотрудник, *maok@bk.ru*
Ю.М.КАРТАШОВ, д-р техн. наук, главный научный сотрудник, *Iljinov_md@spmi.ru*
Санкт-Петербургский государственный горный институт (технический университет)

V.A.KORSHUNOV, *PhD in eng. sc., senior research assistant, maok@bk.ru*
Yu.M.KARTASHOV, *Dr. in eng. sc., chief research assistant, Iljinov_md@spmi.ru*
Saint Petersburg State Mining Institute (Technical University)

НОВЫЙ СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРЕДЕЛА ПРОЧНОСТИ ПРИ РАСТЯЖЕНИИ ГОРНЫХ ПОРОД

Разработан новый способ определения предела прочности при одноосном растяжении горных пород по результатам испытаний образцов произвольной формы. Способ заключается в разрушении образца сферическими инденторами и измерении размеров поверхностей отрыва и зон разрушенной породы в областях контакта с инденторами для последующей оценки предельного напряженного состояния. Получены уточненные формулы для вычисления предела прочности при одноосном растяжении методом разрушения образцов сферическими инденторами, существенно повышающие точность метода.

Ключевые слова: породы горные, образец произвольной формы, сферические инденторы, предел прочности при одноосном растяжении, предел прочности при чистом сдвиге, круги Мора.

A NEW TECHNIQUE FOR THE DETERMINATION OF ULTIMATE STRENGTH IN EXTENTION OF ROCKS

A new technique has been developed for the determination of ultimate strength in uniaxial extension by testing results of samples of arbitrary shape. This technique consists in the sample failure with spherical indentors and measuring of sizes of rupture surfaces and zones of failed rocks at contacts with indentors for the subsequent estimation of ultimate stress state. The revised formulas were obtained for calculation of ultimate strength in uniaxial extension with using the method of sample failure with spherical indentors, essentially improving the accuracy of the technique.

Key words: rocks, sample of arbitrary shape, spherical indentors, ultimate strength in uniaxial extension, ultimate strength in pure shift, Mohr circles.

Определение прочности горных пород при одноосном растяжении прямым растяжением цилиндрических или призматических образцов крайне затруднено из-за сложности изготовления образцов и техники испытаний. Поэтому в практике широкое применение получили косвенные методы определения прочности путем испытаний образцов на раскалывание сжимающими нагрузками: метод разрушения цилиндрических образцов сжатием по образующим, ме-

тод комплексного определения пределов прочности при одноосном растяжении и сжатии, метод разрушения образцов произвольной формы встречными сферическими инденторами (ГОСТ 21153.3-85; 24941-81).

Сущность таких косвенных методов заключается в разрушении образца путем создания в нем сложного напряженного состояния, характеризуемого как сжимающей, так и растягивающей составляющими, и последующей оценке прочности при одноос-

ном растяжении по величине растягивающей составляющей напряжений. При этом влиянием на результаты испытаний образца сжимающих напряжений пренебрегается.

Очевидно, что точность определения прочности при растяжении подобными косвенными методами, как правило, тем выше, чем меньшей относительной величины достигают в процессе испытаний сжимающие напряжения. Не случайно применимость рекомендованного Международным обществом по горной механике в качестве стандартного «бразильского» метода косвенного определения прочности при растяжении (метода разрушения цилиндрических образцов сжатием по образующим) ограничена величиной отношения сжимающих и растягивающих главных напряжений, не превышающей трех [3].

Наиболее доступным и производительным косвенным методом определения прочности горных пород при растяжении признан метод испытаний образцов произвольной формы встречными сферическими инденторами. Сущность метода сферических инденторов заключается в испытании образца горной породы осевым усилием двух стальных шариков до раскалывания с последующим измерением площади поверхности разрушения (разрыва) (рис.1).

Основной недостаток метода заключается в его невысокой точности. Об этом свидетельствуют результаты сопоставительных испытаний 30 проб кернов, отобранных при бурении геотехнических скважин на месторождении алмазов имени В.Гриба. Было установлено, что среднеарифметические значения пределов прочности при растяжении, определенные методом сферических инденторов, приблизительно в два раза меньше значений прочности, определенных «бразильским» методом. Отличие в среднеарифметических значениях пределов прочности при одноосном растяжении составило: для доломитов – 3,03 раза, для туфов – 1,43, для туфопесчаников – 2,03, для песчаников – 1,77, для аргиллитов – 2,16, для кимберлитов – 1,81.

Причина столь значительного отклонения результатов испытаний горных пород

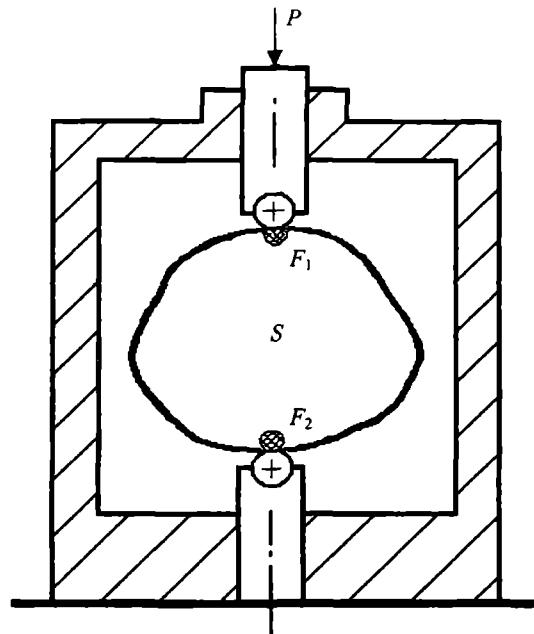


Рис.1. Схема нагружения образца сферическими инденторами

методом сферических инденторов объясняется пренебрежением влияния на разрушающую силу сжимающих напряжений в областях контакта образца с инденторами, которые многократно превышают растягивающие напряжения.

В лаборатории физико-механических свойств и разрушения горных пород Научного центра геомеханики и проблем горного производства СПГГИ (ТУ) проведены исследования, направленные на повышение точности метода сферических инденторов. Результатом исследований явилась разработка нового способа определения предела прочности при одноосном растяжении.

Сущность разработанного способа заключается в разрушении образца сферическими инденторами и измерении размеров поверхностей отрыва и зон разрушенной породы (РП) на контакте с инденторами для последующей оценки предела прочности при одноосном растяжении. Таким образом, отличие от стандартной методики испытаний (ГОСТ 21153.3-85) состоит в дополнительном измерении размеров зон РП на контакте с инденторами. Аналогичный подход использовался ранее при разработке комплексного метода определения показателей объемной прочности горных пород [2].

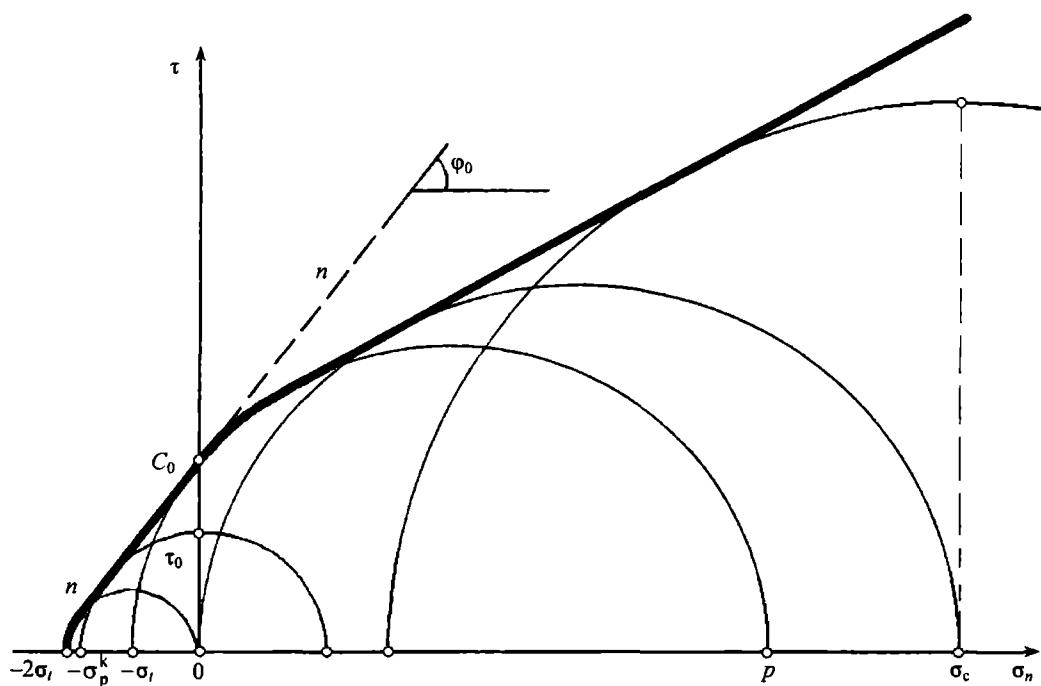


Рис.2. Паспорт прочности горной породы

Способ реализуется следующим образом (рис.1). Образец в виде куска горной породы произвольной, в том числе неправильной, формы устанавливают между сферическими инденторами и равномерно нагружают. По мере роста нагрузки в образце под лунками вдавливания образуются эллипсоидальные зоны РП. Эти зоны развиваются в процессе нагружения вглубь образца, увеличиваясь в размерах. Вследствие неоднородности вещественного состава и строения, присущих горным породам, происходит неравномерное увеличение зон РП. Более интенсивно развивается зона разрушений в слабейшей по прочности области. При достижении предельного напряженного состояния на границе большей из зон возникает трещина отрыва, которая прорастает через ось нагружения и смыкается со второй зоной, раскалывая образец. В момент раскола образца фиксируют максимальную (разрушающую) силу P .

После испытания в разрушенном образце измеряют линейные размеры поверхности разрыва и вычисляют ее площадь S . Затем в разрушенном образце дополнитель-но измеряют линейные размеры зон РП в

областях контакта с инденторами. После вычисления площадей F_1 и F_2 эллиптических поверхностей зон РП на контакте с обоими инденторами выбирают большее из двух значений F .

Предельное напряженное состояние, соответствующее образованию трещины отрыва, оценивали сочетанием $\{\sigma_r; p\}$ минимального главного нормального напряжения, равного растягивающему напряжению разрыва образца σ_r , и максимального главного нормального напряжения, равного радиальному напряжению p на поверхности большей из зон РП, по формулам:

$$\sigma_t = P/S; \quad (1)$$

$$p = P/F, \quad (2)$$

где P – разрушающая нагрузка; S – площадь поверхности отрыва; F – площадь поверхности большей из зон разрушенной породы.

Это предельное напряженное состояние иллюстрирует круг напряжений Мора на графике нормальных и касательных напряжений, пересекающий ось нормальных напряжений в точках $-\sigma$, и p (рис.2). Точка пересечения круга Мора с осью касательных

напряжений была принята для оценки предельного сопротивления срезу C_0 (сцепления) при отсутствии нормальных напряжений, а наклон касательной ll к кругу Мора – для оценки соответствующего коэффициента внутреннего трения $\operatorname{tg} \phi_0$ [2],

$$C_0 = \sqrt{p\sigma}, \quad (3)$$

$$\operatorname{tg} \phi_0 = \frac{p - \sigma}{2\sqrt{p\sigma}}. \quad (4)$$

Для оценки предела прочности при растяжении σ_p^k огибающая предельных кругов Мора в области действия растягивающих напряжений была принята в первом приближении прямолинейной. Это позволило определить величины предела прочности при чистом сдвиге τ_0 и предельную максимальную величину $\sigma_{p\max}$ растягивающего напряжения, согласующуюся с достигнутым при расколе образца инденторами предельным напряженным состоянием растяжения со сжатием,

$$\tau_0 = \frac{2\sigma, p}{p + \sigma}; \quad (5)$$

$$\sigma_{p\max} = 2\sigma. \quad (6)$$

Анализ формул (5) и (6) показал, что для большинства горных пород, имеющих отношение пределов прочности при одноосном сжатии и растяжении σ_c/σ_p от 5 до 30, отличие τ_0 от $\sigma_{p\max}$ не превышает 8 %. Это позволило сделать вывод о допустимости принятия в качестве предела прочности σ_p^k при одноосном растяжении величины растягивающего напряжения, численно равной пределу прочности при чистом сдвиге τ_0 .

Сделанный вывод находится в полном соответствии с результатами испытаний цилиндрических образцов скальных материалов в условиях сложных напряженных состояний, выполненных И.Г.Гончаровым, согласно которым максимум прочности на растяжение наблюдается при напряженном состоянии, соответствующем деформации чистого сдвига [1].

Формула (5) с учетом (1) и (2) преобразуется к виду

$$\sigma_p^k = \frac{2P}{S + F} \quad (7)$$

Экспериментальная проверка предложенного способа выполнена путем сопоставительных испытаний нескольких проб горных пород в соответствии с предлагаемым способом, методом сферических инденторов и «бразильским» методом (см. таблицу). Значения величины σ_p^k , определяемой предложенным способом, более чем в два раза отличаются от значений прочности, вычисленных в соответствии с методом сферических инденторов, и близки к значениям прочности, вычисленным в соответствии с «бразильским» методом испытаний.

Результаты сопоставительных испытаний

Состав пробы горных пород	Среднеарифметические значения предела прочности при одноосном растяжении, МПа		
	Предлагаемый способ	Метод сферических инденторов	«Бразильский» метод
Доломит	6,87	2,78	7,71
Туф	1,70	1,34	1,92
Песчаник с брекчией	0,16	0,08	0,21
Песчаник	0,42	0,22	0,54
Аргиллит	0,24	0,19	0,43
Аргиллит	0,66	0,35	0,76
Алевролит	0,93	0,49	1,06
Кимберлит	8,84	2,69	7,63

Анализ формул (5), (6) и (7) показал, что с погрешностью, не превышающей 5 %, формула (7) может быть упрощена до следующего вида:

$$\sigma_p^k = \frac{1,8P}{S}. \quad (8)$$

На практике применение упрощенной формулы (8) позволяет снизить трудоемкость испытаний за счет сокращения операций по измерению параметров зон РП до уровня метода сферических инденторов при обеспечении точности определения предела прочности при растяжении на уровне «бразильского» метода.

Выводы

1. Разработан новый способ определения предела прочности горных пород при одноосном растяжении по результатам испытаний образцов произвольной формы встречными сферическими инденторами. Способ сопоставим по точности с методом разрушения цилиндрических образцов сжатием по образующим, но менее трудоемок.

2. Получены уточненные формулы для вычисления предела прочности при одноосном растяжении методом разрушения образцов сферическими инденторами, существенно повышающие точность метода. Рекомендуется внесение соответствующих изменений в ГОСТ 21153.3-85 при обработке результатов испытания методом разрушения образцов произвольной формы встречными сферическими инденторами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гончаров И.Г Прочность каменных материалов в условиях различных напряженных состояний. Л.-М.:

Государственное изд-во литературы по строительству, архитектуре и строительным материалам, 1960. 124 с.

2. Коршунов В.А. Определение показателей объемной прочности образцов горных пород при их нагружении сферическими инденторами / В.А.Коршунов, Ю.М.Карташов // Труды Международной конференции. Геотехника. Оценка состояния оснований и сооружений / ВНИИГ Том 1. СПб, 2001. С.33-41.

3. Suggested methods for determining tensile strength of rock materials. Part 2: Suggested method for determining indirect tensile strength by the Brazil test // Int. J. Rock Mech. Min. Sci. and Geotech. Abstr. Vol.15. Pergamon Press Ltd. 1978. P.99-103.

REFERENCES

1. Goncharov I.G. Strength of rock materials under various stress states. Leningrad-Moscow: State Publ. on Construction, Architecture and Building Materials, 1960. 124 p.

2. Korshunov V.A., Kartashov Yu.M. Determination of indices of volumetric strength of rock samples under their loading with spherical indentors // Proceedings of International Conference «Geotechnics. Estimation of state of foundations and structures» / VNIIG. Vol.1. Saint Petersburg, 2001. P.33-41.

3. Suggested methods for determining tensile strength of rock materials. Part 2: Suggested method for determining indirect tensile strength by the Brazil test // Int. J. Rock Mech. Min. Sci. and Geotech. Abstr. Vol.15. Pergamon Press Ltd. 1978. P.99-103.