

УДК 622.023.23

ИЗМЕРЕНИЕ ПРОЧНОСТИ НА РАСТЯЖЕНИЕ БРАЗИЛЬСКИМ МЕТОДОМ

В. П. Ефимов

*Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН,
E-mail: efimov-pedan@mail.ru, Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия*

Результаты сравнения прочности при испытаниях на растяжение, выполненных прямым и бразильским способом, обсуждаются с позиции учета механических свойств породы. Показано, что статистические коэффициенты согласования по категориям пород дают лишь грубые оценки прямой прочности на разрыв по измеренной прочности бразильским методом. Предлагается для их сопоставления привлекать модели, учитывающие структуру материала. Отмечено, что учет двухосности поля напряжений, приводящий к уменьшению прочности, определенной бразильским способом, по сравнению с прямым растяжением и учет неравномерности растягивающих напряжений, приводящий к обратному эффекту, позволяют точнее согласовать значения прочности на растяжение, измеренные разными способами.

Горные породы, прочность на растяжение, бразильский метод, структурный параметр

DOI: 10.15372/FTPRPI20210605

Одна из основных механических характеристик горных пород и подобных им гетерогенных материалов — прочность на растяжение. Этот параметр отвечает за разрушение не только при чистом растяжении, но и при других видах напряженного состояния. Так, факт зарождения и первичного роста микротрещин растяжения, ориентированных в основном вдоль главного сжимающего напряжения при сжатии образцов горных пород, отмечен в [1, 2]. В [3] сделан акцент на зарождении первичных микротрещин растяжения при сдвиге. В [4] показано, что разрушение прочных керамических материалов при сжатии контролируется ростом осевых микротрещин растяжения. Исследованы вопросы разрушения горных пород с позиций кинетической термофлуктуационной концепции прочности [5, 6], подтверждающие модель разрушения твердых тел как процесс накопления множества хаотичных стабильных зародышевых трещин, размер которых задается структурой среды [7]. Характерные физические параметры горных пород, определенные из испытаний по разрушению исследуемых сред при различных напряженных состояниях, приводят к выводу о независимости начальной энергии разрушения хрупких горных пород от вида напряженного состояния. Другими словами, разрушение горных пород на первичной стадии накопления нарушений определяется прочностью на растяжение. Принимая во внимание тот факт, что прочность на растяжение

для горных пород практически на порядок меньше, чем прочность на сжатие, становится понятен интерес исследователей к наиболее точному определению данной прочностной характеристики.

Прочность горных пород на растяжение для многих технологических процессов является основным параметром, характеризующим разрушение породы. Он необходим для оценки сохранности и ресурса горных сооружений, несущей способности отдельных элементов конструкций. По изложенным причинам характеристики горных пород при растяжении имеют первостепенное значение для решения инженерно-технических задач.

Определение прочности на растяжение может проводиться прямыми и косвенными методами. Прямые испытания горных пород на разрыв наиболее достоверны, но из-за сложности подготовки образцов и специфического оборудования для проведения испытаний имеют высокую себестоимость. С учетом довольно сильной изменчивости и большого разброса механических характеристик горных пород для получения достоверной информации приходится проводить много испытаний. Чаще используются косвенные методы, такие как испытания на изгиб или бразильский тест, а прямые испытания на разрыв применяются обычно как калибровочные. Выполнение косвенных испытаний проще и значительно дешевле, но полученные значения прочности в этих случаях отличаются от испытаний, проведенных в однородном поле растяжения. В литературе, касающейся прочности горных пород на растяжение, большинство данных получено в результате использования бразильского метода.

Бразильский тест — простой косвенный метод испытаний, позволяющий получить предел прочности на растяжение хрупких горных пород, первоначально предложенный Карнейро для тестирования бетона [8]. Метод нашел применение при испытаниях горных пород. Дисковый образец, чаще всего толщиной, равной радиусу, диаметрально сжимается до разрушения между стальными плитами нагружающего устройства. Сжатие диска сосредоточенными силами, приложенными по диаметру, вызывает, согласно упругому решению, растягивающие напряжения, вдоль вертикального диаметра, которые практически постоянны, за исключением небольших контактных зон возле точек приложения нагрузки. Кроме того, упругое решение дает двухосное поле напряжений. В центральной части диска напряжения, ортогональные растяжению, являются сжимающими и втроекратно превосходят его. Расчетная прочность на растяжение при раскалывании диска определяется исходя из предположения, что разрушение возникает в центре диска, в зоне максимального растягивающего напряжения:

$$\sigma_{Bts} = \frac{F}{\pi R t}, \quad (1)$$

где F — усилие в момент разрушения; R , t — радиус и толщина диска.

Наличие существенных сжимающих напряжений в точках контактов может приводить к разрушению, начинающемуся из зоны возле этих точек. Такие испытания бракуются, как не соответствующие стандарту (в зачет принимаются образцы, сложенные по линии приложения нагрузки с инициацией разрушения из внутренней области). Для того чтобы избежать разрушения возле контактных зон и минимизировать количество отбракованных образцов, предложено много модификаций данного способа испытаний (рис. 1). В [9–11] отмечается, что применение разных по конфигурации плит или подкладок влияет на граничные условия, но мало меняет поле в центре диска, соответственно, несущественно изменяются значения вычисленной прочности по формуле (1) для образцов, разрушенных по стандарту. Модель разрушения под действием растягивающих напряжений применяется во всех схемах: по американскому стандарту (рис. 1а) [12], по международному стандарту (рис. 1б) [13], по китайскому

стандарту (рис. 1а) [14], при использовании схемы, предложенной в [15], (рис. 1з). В соотношении измеренных прочностей прямым и бразильским способом изменение граничных условий вносит малую поправку по сравнению с фактической разницей, наблюдающейся на практике. Как можно заметить из соотношения (1), обработка результатов испытаний игнорирует двухосность поля напряжений. Вопрос о влиянии двухосности поля напряжений на измеренную бразильским методом прочность и, соответственно, на соотношение прочностей, получаемых прямым растяжением и бразильским способом, актуален и сегодня.

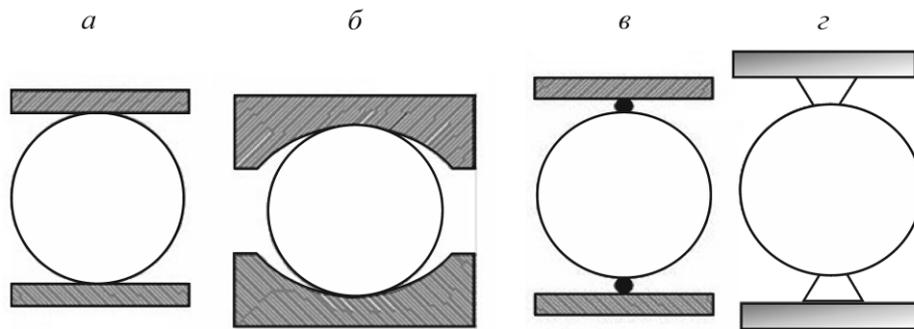


Рис. 1. Наиболее употребляемые схемы для проведения испытаний по бразильскому методу (описание в тексте)

В [16] отмечено, что за более чем полувековую историю использования и развития бразильского способа испытаний проделана огромная работа как в теоретическом, так и в экспериментальном плане, но практические подходы для согласования значений прочностей на прямое растяжение и бразильским методом до сих пор не найдены. Предложение сопоставлять значения прочности на растяжение, полученные прямым определением и бразильским методом, введением поправочных коэффициентов по категориям пород [16, 17], с точки зрения автора настоящей статьи, можно рассматривать как первое приближение, не всегда приемлемое.

ИСПЫТАНИЯ НА РАСТЯЖЕНИЕ ПРЯМЫМ ОПРЕДЕЛЕНИЕМ И БРАЗИЛЬСКИМ МЕТОДОМ

Экспериментальных исследований, посвященных сравнению значений прочности при прямом растяжении и бразильском испытании, относительно немного. Основываясь на данных из литературы в виде обзорных статей [17–19] и оригинальных работ, составлена табл. 1. Породы объединены в несколько групп: носящие одинаковое название и потому имеющие сходное строение (гранит, песчаник, мрамор, известняк, сланец), либо обладающие близкими значениями прочности на прямое растяжение. После каждой из групп помещено среднее значение и доверительный интервал отношения прочности, определенной бразильским способом, к прочности на прямое растяжение. Средние значения по категориям — 0.90–1.68, доверительный интервал — более 0.2. Если обратить внимание на песчаник, мрамор и известняк (осадочные породы), можно заметить, что предложенный в [17] поправочный коэффициент для категории осадочных пород не характерен для всего класса пород и может дать только грубую оценку прочности на растяжение по измеренным бразильским способом значениям прочности. Совсем грубую оценку, близкую к 1.2, дает среднее по всем породам. На основании этой оценки часто можно встретить утверждение, что бразильский метод дает более высокие значения прочности на растяжение, чем прямое испытание на разрыв. Принципиальное значение имеет факт более низкой прочности некоторых пород и материалов, определенных бразильским методом, чем прочность на прямое растяжение.

ТАБЛИЦА 1. Результаты испытаний на прямое растяжение и бразильским методом

Порода	σ_{uts}	σ_{Bts}	$\sigma_{Bts} / \sigma_{uts}$	Автор, год публикации, источник
Gosford песчаник	3.59	3.72	1.04	Jaeger, 1967, [20]
Песчаник*	2.96	7.80	2.64*	Pandey, 1986, [21]
Песчаник	6.49	10.68	1.65	Fuenkajorn, 2011, [22]
Песчаник	5.10	9.50	1.86	Jaeger, 1967, [20]
Песчаник	6.80	8.90	1.31	Unlu, 2014, [23]
Среднее значение			1.46 ± 0.50	
Carraга мрамор	6.90	8.72	1.26	Jaeger, 1967, [20]
Ufalei мрамор	5.90	6.90	1.17	Ефимов, 2009, [24]
Saraburi мрамор	6.33	8.02	1.27	Fuenkajorn, 2011, [22]
Мрамор	7.50	10.10	1.35	Jaeger, 1967, [20]
Среднее значение			1.26 ± 0.09	
Indiana известняк	5.86	6.21	1.06	Mellor, 1971, [25]
Saraburi известняк	9.31	10.90	1.17	Fuenkajorn, 2011, [2]
Известняк	7.10	6.00	0.85	Fuenkajorn, 2011, [22]
Известняк	11.90	11.80	0.99	Demirdag, 2019, [19]
Доломит	5.70	8.00	1.40	Ramana, 1987, [26]
Среднее значение			1.09 ± 0.21	
Barre гранит	13.45	14.34	1.07	Mellor, 1971, [25]
Гранит	11.10	13.46	1.21	Alehossein, 2004, [27]
Weishan гранит	9.53	11.24	1.18	Liu J., 2014, [28]
Bonnet гранит	6.90	8.80	1.27	Qi S., 2020, [29]
Базальт	10.00	13.00	1.30	Demirdag, 2019, [19]
Bowral трахит	13.72	12.00	0.87	Jaeger, 1967, [20]
Vitoshа сиенит	20.50	21.05	1.03	Andreev, 1991, [30]
Кварцит	16.30	13.00	0.80	Ramana, 1987, [26]
Среднее значение			1.09 ± 0.15	
Сланец schist	13.30	11.80	0.89	Ramana, 1987, [26]
Сланец shale	5.60	5.90	1.05	Hansen, 1987, [31]
Гнейс	8.20	9.80	1.20	Hakala, 1997, [32]
Среднее значение			1.04 ± 0.23	
Андезит	3.90	7.10	1.82	Ramana, 1987, [26]
Brisbane туф	5.65	9.20	1.63	Erarslan, 2012, [33]
Бетон	4.20	6.70	1.60	Demirdag, 2019, [19]
Среднее значение			1.68 ± 0.23	
Серый гипс	1.75	1.99	1.14	Andreev, 1991, [30]
Белый гипс	1.42	1.29	0.91	Andreev, 1991, [30]
Газобетон	0.86	0.54	0.63	Coviello, 2005, [34]
Gravina калькаренит	0.69	0.64	0.93	Coviello, 2005, [34]
Среднее значение			0.90 ± 0.25	
Среднее значение по всем породам			1.19 ± 0.12	

Примечание. σ_{uts} , σ_{Bts} — прочность на прямое растяжение и бразильским методом соответственно; * — значение, определенное Pandey [21], из статистики исключено

ЗАВИСИМОСТЬ ПРОЧНОСТИ НА РАСТЯЖЕНИЕ ПО БРАЗИЛЬСКОМУ МЕТОДУ ОТ РАЗМЕРОВ ОБРАЗЦА

Статистические данные о соотношении прочностей не дают ответа на практические вопросы: как зависят получаемые данные от размеров образцов, от механических характеристик пород. Масштабный эффект при измерении прямой прочности на растяжение в лабораторных условиях слабо освещен в литературе из-за сложностей проведения таких экспериментов. Для его оценки можно воспользоваться зависимостью прочности на трехточечный изгиб от толщины и ширины образцов горных пород. На рис. 2 представлена изгибная прочность долерита, гранита и мрамора в зависимости от толщины образцов. Ширина образцов ~ 20 мм. Схема исследований и выполнение испытаний на скорости подачи траверсы 0.5 мм/мин описаны в [6].

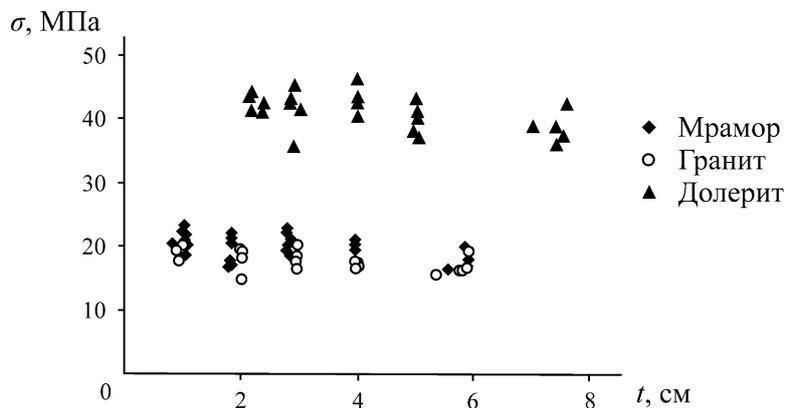


Рис. 2. Зависимость изгибной прочности горных пород от толщины образца

На рис. 3 приведена изгибная прочность для образцов мрамора толщиной 20 мм и разной ширины. Анализируя данные рисунков, приходим к выводу о слабом масштабном эффекте в рамках изменения размеров образцов при лабораторных испытаниях на изгиб. Подобный результат, т. е. слабое падение прочности при увеличении размеров образцов, можно ожидать для испытаний этих пород на прямое растяжение.



Рис. 3. Зависимость изгибной прочности мрамора от ширины образца

Масштабный эффект при проведении испытаний бразильским методом изучен больше. В [35] приведены данные о зависимости прочности сланца, определенной бразильским методом, от размеров образцов с диаметром от 25 до 100 мм при толщине, равной 1/2 диаметра. Отмечена функционально падающая зависимость прочности от диаметра образцов и выявлены несколько принципиальных моментов: взаимосвязь между прочностью на растяжение и разме-

ром образца зависит от механических свойств материала; для образцов заданной формы предел прочности имеет верхнюю и нижнюю границы при изменении размеров образцов. Отношение толщины к диаметру образца мало влияет на полученные значения прочности бразильским методом [19], поэтому влияние размера образцов на значение прочности данным методом проверено на образцах цементного камня только при изменении диаметра: 20, 40, 60 мм. Образцы испытывались раздавливанием между плоскими стальными плитами, как на рис. 1а. Зависимость прочности по бразильскому методу от диаметра образца представлена на рис. 4. Черные кружки — средние значения прочности образцов одного диаметра. Данная функциональная зависимость отображает известный факт падения прочности с увеличением размеров образца, но выражена она заметно сильнее, чем на рис. 2 и 3. Это объясняется тем, что в неоднородных полях напряжений проявляются структурные особенности среды. В геометрии испытаний с линейным распределением напряжений этот эффект обнаруживается меньше, чем при испытании бразильским методом.

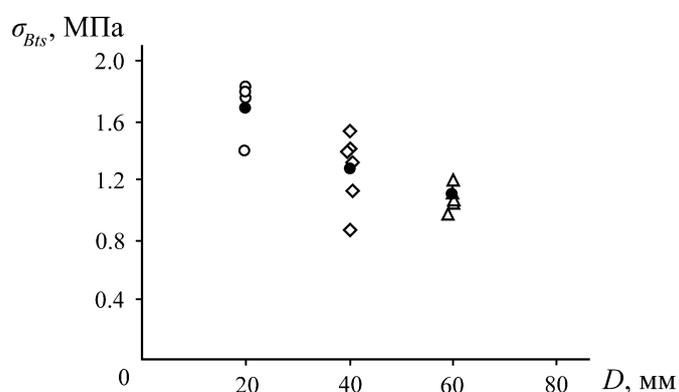


Рис. 4. Прочность на растяжение образцов цементного камня по бразильскому методу в зависимости от диаметра

РАСЧЕТНАЯ МОДЕЛЬ С УЧЕТОМ СТРУКТУРЫ СРЕДЫ

Большинство экспериментальных результатов противоречат утверждению, что значения разрушающих напряжений при испытаниях бразильским методом должны быть ниже, чем при прямом разрыве за счет вклада в деформацию растяжения от поперечного сжатия [36–38]. С одной стороны, данный эффект, вызывающий двухосность поля напряжений, наблюдается для некоторых материалов с мелкой структурой [39]. С другой стороны, поле напряжений в диске поперек возникающей трещины неоднородно, имеет ниспадающий характер (рис. 5а). В таком поле материал с крупной структурой при достижении напряжения на линии приложения нагрузки, равной прочности на прямое растяжение в однородном поле, окажется недогруженным, и потребуются увеличение нагрузки для разрушения. Таким образом, проявление структуры среды приводит к увеличению прочности по бразильскому методу и превышению ее над прямой одноосной. Как показали многочисленные эксперименты, в неоднородных полях напряжений лучшее соответствие результатам испытаний достигается при применении нелокальных критериев прочности. Учет характеристик среды при моделировании разрушения в неоднородном поле растягивающих напряжений в диске при применении интегрального критерия разрушения иллюстрируют кривые рис. 5.

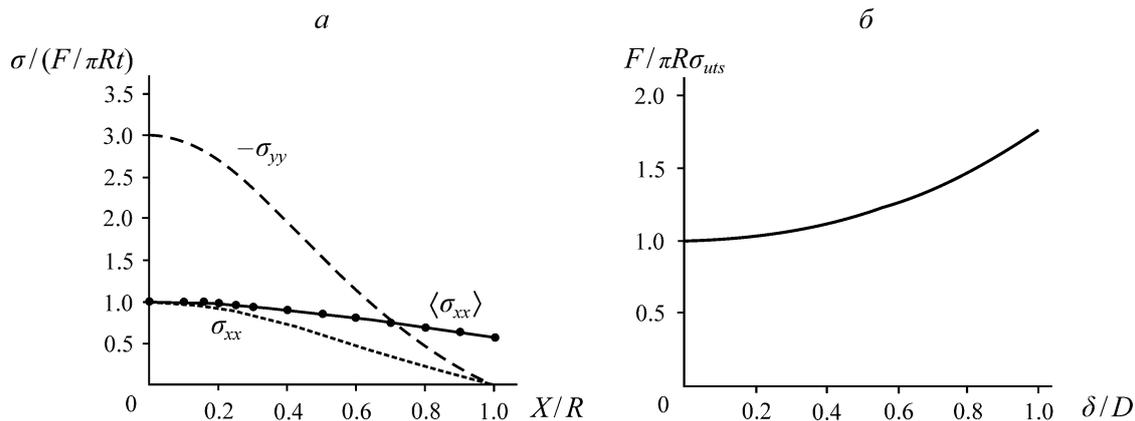


Рис. 5. Распределение напряжений в центре ядра по оси X (а) и отношение прочности бразильским методом к прочности на растяжение при применении интегрального критерия разрушения (б)

Эффективные растягивающие напряжения, определенные условием, что при разрушении среднее напряжение на структурном элементе равно прочности на растяжение в однородном поле, задаются следующим соотношением:

$$\sigma_{uts} = \langle \sigma_{xx} \rangle = \frac{1}{\delta} \int_0^{\delta} \sigma_{xx}(x) dx,$$

где δ — параметр структуры.

Выполнив интегрирование распределения растягивающих напряжений в диске по оси X [40], получим

$$\langle \sigma_{xx} \rangle = \frac{F}{\pi R t} \frac{R}{\delta} \left(2 \operatorname{arctg} \frac{\delta}{R} - \frac{\delta}{R} \right).$$

Здесь $\langle \sigma_{xx} \rangle$ — эффективные растягивающие напряжения, которые, как видно из рис. 5а, имеют ниспадающий характер. На рис. 5б представлена обратная зависимость, а именно, расчетное отношение прочности, полученной бразильским методом, к прочности на одноосное растяжение при применении интегрального критерия разрушения.

В [41] предложена двухпараметрическая модель разрушения хрупких сред в неоднородных полях напряжений. Она основана на нелокальном критерии предельной работы растягивающих напряжений при соответствующих деформациях. В рамках этой модели имеется объяснение встречающимся нечасто экспериментальным результатам превышения прочности на прямое растяжение над прочностью, определенной бразильским способом. Структура среды, по мнению автора, может иметь разные размеры в продольном и поперечном направлении относительно развития трещины.

На рис. 6 представлена расчетная зависимость отношения прочностей на растяжение, измеренных прямым и бразильским методом, для материала с коэффициентом Пуассона, равным $\nu = 0.2$, в зависимости от соотношения поперечного и продольного размера структуры в условиях плоской деформации. Зависимость отношения $\sigma_{Bts} / \sigma_{uts}$ при соотношении поперечного размера структуры к продольному, равном 1.7, показала наилучшее соответствие экспериментальным данным для бетона с заполнителями разного размера.

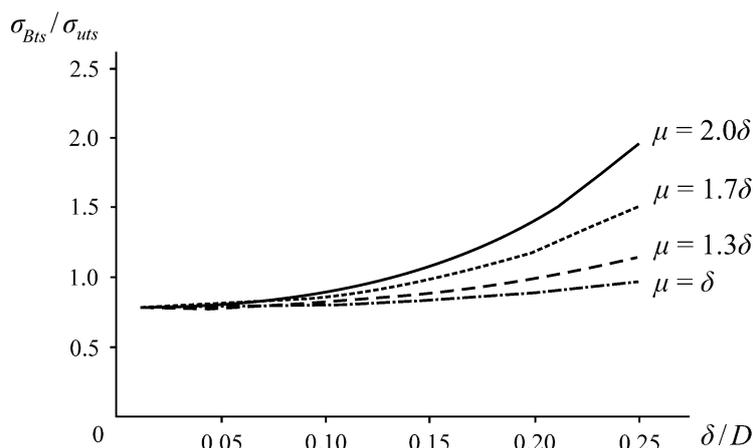


Рис. 6. Отношение прочностей на растяжение бразильским методом и одноосным растяжением (μ — поперечный размер структурного элемента [41])

Смещение графиков на рис. 6 ниже 1 определяется вкладом пуассоновской деформации от поперечного сжатия в деформацию растяжения, т. е. двухосностью поля напряжений. Данный эффект зависит от коэффициента Пуассона, при его изменении в широких пределах график отношения прочностей опускается до 0.65–0.90 для плоской деформации. Для характерных горным породам значений коэффициента Пуассона $\nu = 0.15–0.30$ отношение $\sigma_{Bts} / \sigma_{uts}$ составляет 0.70–0.82. Учет спада поля напряжений и требование выполнения критерия разрушения на структуре среды приводит к повышению этого отношения в зависимости от соотношения структуры материала и диаметра испытываемого зерна.

Как видно из рис. 5б и 6, отношение значений, полученных бразильским методом и одноосным растяжением, с увеличением параметра структуры среды должно возрастать независимо от принятой модели разрушения. Проверим это на уже приведенных экспериментальных данных для образцов из цементного камня (рис. 4). Структурный параметр определим как $\delta = 2 / \pi (K_{lc} / \sigma_{uts})^2$ [42]. Значение трещиностойкости $K_{lc} = 0.12$ МПа $^{1/2}$ измерено методом трехточечного изгиба балок с надрезом. Методика, примерные размеры образца и обработка результатов изложена в [43]. Взяв за значение прочности на растяжение прочность, определенную бразильским методом для диска 60 мм, найдем значение структурного параметра $\delta = 9.5$ мм. На рис. 7 зависимость, изображенная на рис. 4, перестроена по оси абсцисс от безразмерного отношения структурного параметра к диаметру образца.

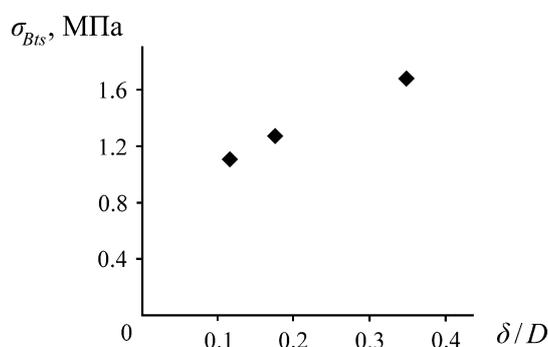


Рис. 7. Зависимость прочности цементного камня, определенной бразильским методом, от безразмерного параметра δ/D

Как видно из рис. 7, зависимость прочности на растяжение по бразильскому методу от размеров образцов определяется главным образом отношением структурного параметра среды к диаметру испытанного образца, что, в свою очередь, определяется механическими характеристиками материала. Данные этого рисунка согласованы с зависимостями, изображенными на рис. 5б и 6.

Используя данные из табл. 1 и литературных источников, составим табл. 2, в которой представлена необходимая информация. Структурный параметр, составленный из механических характеристик пород, требует задания значений трещиностойкости. Для тех пород, которые указаны в табл. 2, этих значений нет, поэтому они взяты как средние значения по категориям пород из обзора [44] и обозначены звездочкой (верхний индекс).

ТАБЛИЦА 2. Экспериментальные значения прочностей на растяжение σ_{uts} , σ_{Bts} , трещиностойкость пород K_{Ic} и отношение структурного параметра δ к диаметру керна D

Порода	σ_{uts} , МПа	σ_{Bts} , МПа	$\sigma_{Bts} / \sigma_{uts}$	D , мм	K_{Ic} , МПа $m^{1/2}$	δ , мм	δ / D
Мрамор ufalei	5.90	6.90	1.17	38	0.90	14.82	0.39
Гранит	11.10	13.46	1.21	58	2.30	27.35	0.47
Туф	5.65	9.23	1.63	52	1.10	24.14	0.46
Vonnet гранит	6.90	8.80	1.27	63	0.94	11.70	0.19
Weishan гранит	9.53	11.24	1.18	63	1.14	9.11	0.14
Известняк	11.90	11.80	0.99	54	1.37*	8.44	0.16
Базальт	10.00	13.00	1.30	54	1.80*	20.64	0.38
Сланец	3.30	3.45	1.04	50	0.37*	8.01	0.16
Песчаник*	5.50	8.20	1.46	50	0.67*	14.20	0.28
Мрамор*	6.66	8.44	1.26	50	0.85*	10.40	0.21
Гранит*	11.70	12.70	1.17	50	0.90*	4.70	0.10
Известняк*	8.00	8.60	1.09	50	1.37*	13.20	0.26
Гипс*	1.58	1.64	1.02	50	0.15*	5.74	0.11

* — усредненные значения трещиностойкости для выбранной категории горных пород из [44]. Диаметр дисков принят 50 мм, как наиболее часто встречающийся размер образцов.

На рис. 8 представлены результаты обработки данных из табл. 2. Зависимость отношения прочности бразильским методом к прочности на одноосное растяжение построена от отношения структурного параметра породы к диаметру керна.

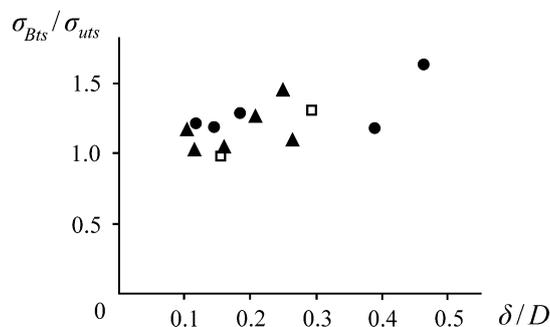


Рис. 8. Отношение прочности, определенной бразильским методом, к прямому растяжению в зависимости от относительного параметра структуры

Все точки разделены на три группы. Значения, обозначенные кружками, соответствуют данным из оригинальных работ, в которых указана вся необходимая информация. Квадратиками определены значения с привлечением трещиностойкости [44], как средняя для соответствующей категории пород. Треугольниками обозначены значения для пород, для которых экспериментально определено отношение $\sigma_{Bts} / \sigma_{uts}$, а соотношение δ / D вычислено для диаметра керна, равного 50 мм. Сравнение рис. 7 и 8 с рис. 5б и 6 указывает их функциональную схожесть, что подтверждает зависимость значений прочности, полученных бразильским методом, от диаметра испытываемого керна.

ВЫВОДЫ

В большинстве случаев прочность пород, определенная бразильским методом, выше, чем при прямом растяжении в среднем на 20 %. При этом имеются факты превышения прямой прочности на растяжение над полученной по бразильскому методу. Для пород, принадлежащих к разным группам, средние значения этого отношения 0.90 – 1.68 при доверительном интервале более 0.2. Для прочных пород, имеющих не крупное зерно, превышение значений прочности, определенных бразильским методом, над прямым растяжением составляет менее 10 %.

Показано, что учет двухосности поля напряжений приводит к уменьшению значений прочности, измеренных бразильским методом, по сравнению с прямым растяжением. Учет неравномерности распределения растягивающих напряжений приводит к обратному эффекту.

Проведенные испытания образцов цементного камня подтверждают, что отношение прочности на растяжение бразильским методом к прямой прочности на растяжение возрастает с увеличением относительного параметра структуры. Такая зависимость обусловлена механическими свойствами материала и прослеживается для горных пород. Представленные модели расчета прямой прочности на растяжение по измеренным значениям прочности, полученным бразильским методом с учетом структуры среды, позволяют точнее определять прочность на разрыв, чем статистические коэффициенты для согласования прочностей по категориям пород.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hoek E. and Bieniawski Z. T. Brittle fracture propagation in rock under compression, *Int. J. Fracture Mech.*, 1965, Vol. 1. — P. 137–155.
2. Lin P., Wong Robina H. C., and Tang C. A. Experimental study of coalescence mechanisms and failure under uniaxial compression of granite containing multiple holes, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 2015, Vol. 77. — P. 313–327.
3. Healy D., Jones R. R., and Holdsworth R. E. New insights into the development of brittle shear fractures from a 3D numerical model of microcrack interaction, *Earth and Planetary Sci. Letters*, 2006, Vol. 249, Issue 1–2. — P. 14–28.
4. Lankford J. The role of tensile microfracture in the strain rate dependence of compressive strength of fine-grained limestone — analogy with strong ceramics, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.*, 1981, Vol. 18. — P. 173–175.
5. Векслер Ю. А. Долговечность горных пород при сжатии // ФТПРПИ. — 1979. — № 3. — С. 71–76.

6. **Ефимов В. П.** Исследование длительной прочности горных пород в режиме постоянной скорости нагружения // ФТПРПИ. — 2007. — № 6. — С. 37–44.
7. **Гелазов М. А., Куксенко В. С., Слущер А. И.** Фибриллярная структура и субмикроскопические трещины в ориентированных кристаллических полимерах // ФТТ. — 1970. — Т. 12. — С. 100–108.
8. **Carneiro F.** A new method to determine the tensile strength of concrete, Proc. of the 5th Meeting of the Brazilian Association for Technical Rules, 1943. — P. 126–129.
9. **Lavrov A. and Vervoort A.** Theoretical treatment of tangential loading effects on the Brazilian test stress distribution, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 2002, Vol. 39. — P. 275–283.
10. **Kourkoulis S. K., Markides Ch. F., and Chatzistergos P. E.** The Brazilian disc under parabolically varying load: Theoretical and experimental study of the displacement field, Int. J. Solids Structures, 2012, Vol. 49. — P. 959–972.
11. **Markides C. F. and Kourkoulis S. K.** The influence of jaw's curvature on the results of the Brazilian disc test, J. Rock Mech. Geotech. Eng., 2016, Vol. 8, No. 2. — P. 127–146.
12. **ASTM D 3967-08.** Standard test method for splitting tensile strength of intact rock core specimens, 2008, ASTM International, West Conshohocken, USA.
13. **ISRM** Suggested methods for determining tensile strength of rock materials, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr., 1978, Vol. 15, No. 3. — P. 99–103.
14. **National** standards compilation group of people's republic of China, GB/T 50266-99 standard for tests method of engineering rock masses, Beijing, China Plan Press, 1999 [in Chinese].
15. **Brawn E. T. and Trollope D.** The failure of linear brittle materials under effective tensile stress, J. Rock Mech. Eng. Geol., 1967, Vol. 5. — P. 229–241.
16. **Briševac Z., Kujundžić T., and Čajić S.** Current cognition of rock tensile strength testing by Brazilian test, The Mining-Geology-Petroleum Engineering Bulletin, 2015. — P. 101–114.
17. **Perras M. A. and Diederichs M. S.** A review of the tensile strength of rock. Concepts and testing, J. Geotech. Geol. Eng., 2014, Vol. 32, No. 2. — P. 525–546.
18. **Li D. and Wong L.** The Brazilian disc test for rock mechanics applications: review and new insights, J. Rock Mech. Rock Eng., 2013, Vol. 46. — P. 269–287.
19. **Demirdag S., Tufekci K., Sengun N., Efe T., and Altindag R.** Determination of the direct tensile strength of granite rock by using a new dumbbell shape and its relationship with Brazilian tensile strength, IOP Conf. Series: Earth and Environmental Sci., 2019, Vol. 221. — Article ID 012094.
20. **Jaeger J. C.** Failure of rocks under tensile conditions, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr., 1967, Vol. 4, No. 2. — P. 219–227.
21. **Pandey P. and Singh D. P.** Deformation of a rock in different tensile tests, J. Eng. Geol., 1986, Vol. 22, No. 3. — P. 281–292.
22. **Fuenkajorn K. and Klanphumeesri S.** Laboratory determination of direct tensile strength and deformability of intact rocks, Geotech. Testing J., 2011, Vol. 34, No. 1. — P. 97–102.
23. **Unlu T. and Yilmaz O.** A new method developed for determining direct tensile strength of intact rock Materials, Rockmec'2014 — XIth Regional Rock Mech. Symp., 2014. — P. 97–106.
24. **Efimov V. P.** The rock strength in different tension conditions, J. Min. Sci., 2009, Vol. 45, No. 6. — P. 569–575.
25. **Mellor M. and Hawkes I.** Measurement of tensile strength by diametral compression of discs and annuli, J. Eng. Geol., 1971, Vol. 5, No. 3. — P. 173–225.
26. **Ramana Y. V. and Sarma L. P.** Split-collar tensile test grips for short rock cores, J. Eng. Geol., 1987, Vol. 23. — P. 255–261.

27. **Alehossein H. and Boland J. N.** Strength, toughness, damage and fatigue of rock, Proc. Int. Conf. Structural Integrity Fracture, 2004, Brisbane, Australia, Article ID 836.
28. **Liu J., Chen L., Wang C., Man K., Wang L., Wang J., and Su R.** Characterizing the mechanical tensile behavior of Beishan granite with different experimental methods, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 2014, Vol. 69. — P. 50–58.
29. **Qi S. W., Lan H. X., Martin D., and Huang X. L.** Factors controlling the difference in Brazilian and direct tensile strengths of the lac du bonnet granite, J. Rock Mech. Rock Eng., 2020, Vol. 53. — P. 1005–1019.
30. **Andreev G. E.** A review of the Brazilian test for rock tensile strength determination. Part I: Calculation formula, J. Min. Sci. Technol., 1991, Vol. 13, No. 3. — P. 445–456.
31. **Hansen F. D. and Vogt T. J.** Thermomechanical properties of selected shales, Oak Ridge National Laboratory Report, 1987. — 95 p.
32. **Hakala M. and Heikkila E.** Posiva laboratory testing reports WR-97-04, WR-97-07e, 1997. <http://www.posiva.fi/>.
33. **Erarslan N. and Williams D.** Experimental, numerical and analytical studies on tensile strength of rocks, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 2012, Vol. 49. — P. 21–30.
34. **Coviello A., Lagioia R., and Nova R.** On the measurement of the tensile strength of soft rocks, J. Rock Mech. Rock Eng., 2005, Vol. 38, No. 4. — P. 251–273.
35. **Li K., Cheng Y., Yin Z. Y., Han D., and Meng J.** Size effects in a transversely isotropic rock under Brazilian tests: Laboratory testing, J. Rock Mech. Rock Eng., 2020, Vol. 53. — P. 2623–2642.
36. **Лермит Р.** Проблемы технологии бетона. — М.: Госстройиздат, 1959. — 297 с.
37. **Яшин А. В.** Неодноосные напряженно-деформированные состояния бетона. В кн. Прочность, структурные изменения и деформации бетона. — М.: Стройиздат, 1978. — С. 196–222.
38. **Мальцов К. А., Пак А. П.** Учет сложного напряженного состояния при расчетах прочности бетона в сооружениях // Изв. ВНИИГ. — 1972. — Т. 100. — С. 205–214.
39. **Зайцев Г. Г., Барабанов В. Н., Лаухина Н. С.** Сравнительный метод определения предела прочности графита методом сжатия цилиндрических образцов по образующей // Конструкционные материалы на основе графита: сб. тр. — 1971. — № 6. — С. 153–156.
40. **Фрохт М.** Фотоупругость. — М., 1950. — Т. 2. — 488 с.
41. **Трапезников Л. П.** Температурная трещиностойкость массивных бетонных конструкций. — М.: Энергоатомиздат, 1986. — 272 с.
42. **Леган М. А.** О взаимосвязи градиентных критериев локальной прочности в зоне концентрации напряжений с линейной механикой разрушения // ПМТФ. — 1993. — № 4. — С. 146–154.
43. **Ефимов В. П.** Влияние скорости нагружения на трещиностойкость горных пород с позиций кинетической термофлуктуационной концепции разрушения // ФТПРПИ. — 2016. — № 2. — С. 57–64.
44. **Zhang Z. X.** An empirical relation between mode I fracture toughness and the tensile strength of rock, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 2002, Vol. 39. — P. 401–406.

Поступила в редакцию 01/X 2021

После доработки 05/XI 2021

Принята к публикации 11/XI 2021