

УДК 539.3

DOI: 10.32326/1814-9146-2025-87-4-427-443

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОЧНОСТИ СКАЛЬНЫХ ПОРОД ПРИ КОСВЕННОМ РАСТЯЖЕНИИ МЕТОДОМ РАСКАЛЫВАНИЯ*

© 2025 г.

**Брагов А.М., Басалин А.В., Ломунов А.К.,
Филиппов А.Р., Брагов И.А.**

*Национальный исследовательский Нижегородский государственный
университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Российская Федерация*

lomunov@mech.unn.ru

Поступила в редакцию 16.09.2025

Реализованы две модификации метода Кольского для исследования прочностных свойств хрупких материалов (горных пород) при растяжении методом раскалывания при сжатии образцов цилиндрической формы (бразильский тест) и кубической формы – раскалывание с использованием клиновидных насадок на торцах мерных стержней, примыкающих к образцу. Проведен цикл динамических испытаний на раскалывание образцов магматической горной породы габбро-диабаз кубической формы с размером ребра ~20 мм и цилиндрической формы (бразильский тест) диаметром ~22 мм и толщиной ~11 мм. Определена прочность на раскалывание образцов горной породы обеих конфигураций и построена ее зависимость от скорости роста напряжений. Эта зависимость соответствует известной тенденции повышения прочностных свойств горных пород при увеличении скорости роста напряжений. Прочностные свойства гранита габбро-диабаз, полученные при раскалывании цилиндрических образцов, в среднем на 25–30% выше, чем при раскалывании кубических образцов. Наряду с такими характеристиками процессов деформирования и разрушения, как скорость деформации или скорость роста напряжений, важную роль играет время от начала нагружения образца до начала его лавинообразного разрушения (инкубационное время). Построены зависимости инкубационного времени «жизни» материала от скорости роста напряжений при нагружении кубических образцов. Построенные зависимости прочности на раскалывание и времени до разрушения (инкубационное время «жизни») от скорости роста напряжений предполагается использовать в дальнейших исследованиях для оснащения каких-либо критериев разрушения, например, структурно-временного критерия разрушения Морозова – Петрова.

Проведенная высокоскоростная видеорегистрация процесса раскалывания образцов обеих геометрий позволила определить момент появления и процесс развития трещин в образцах. На кинограммах видно, что первая трещина для обоих типов испытаний появляется спустя около 11 мкс после первого информативного кадра видеорегистрации. Вопрос точной синхронизации во времени электрического процесса регистрации импульсов деформации в мерных стержнях и оптического процесса скоростной видео-

* Выполнено при финансовой поддержке РФ (грант № 25-19-00380).

регистрации деформирования образца остается открытым и требует дальнейшей проработки.

Ключевые слова: динамическая прочность, скальные породы, раскалывание, метод Кольского, бразильский тест.

Введение

Точные характеристики динамической прочности горных пород имеют большое значение для оценки устойчивости скальных конструкций при динамических нагрузках, а также для проектирования разрушения и фрагментации горных пород при взрывной и ударной технологии добычи полезных ископаемых [1, 2].

Механические свойства горных пород играют важнейшую роль во многих проектных решениях в нефтяной, горнодобывающей, военной и гражданской инженерии. Наиболее надежным источником информации об этих свойствах являются лабораторные испытания. Механические свойства горных пород включают в себя модуль упругости, коэффициент Пуассона и прочность (на одноосное сжатие и растяжение). Эти свойства горных пород можно оценить с помощью стандартных лабораторных испытаний. В инженерных исследованиях основное внимание уделяется лабораторным исследованиям прочности на одноосное сжатие образцов горных пород простейшей формы. Однако хорошо известно, что в среднем прочность горных пород на растяжение составляет менее 10% от их прочности на сжатие, поэтому горная порода с большей вероятностью разрушится при растяжении, чем при сжатии [3]. Таким образом, прочность на растяжение является важным критерием оценки устойчивости горных пород или скального массива к разрушению. Правильное определение предела прочности горных пород на растяжение при различных условиях нагружения, в частности при различных скоростях нагружения, представляет не только академический интерес, но и имеет практическое инженерное значение. Так, М. Дидерихс и П. Кайзер [4] утверждали, что прочность на растяжение является важным параметром, определяющим устойчивость пролетов подземных выработок.

Прочность на растяжение можно измерить прямым и косвенным методами. Для прямых испытаний на растяжение требуются либо образцы горных пород специальной формы (так называемая «собачья кость») [5], либо специальное крепление (как правило, клеевое) к нагружающим элементам образцов цилиндрической формы [5, 6]. Образец горной породы в форме собачьей кости изготавливается путем шлифования центральной части цилиндрического горного керна. Изготовление образца сложной конфигурации представляет большую сложность, поскольку его легко повредить в процессе подготовки. В условиях динамического нагружения реализовать такие испытания практически невозможно. Единственным способом прямого измерения прочности на растяжение при высоких скоростях деформации является клеевое соединение образца с нагружающими элементами [7, 8]. Однако такие эксперименты требуют больших временных затрат на их подготовку. Указанные сложности вынуждают использовать в практике динамических экспериментов косвенные методы определения прочности горных пород на растяжение. Для горных пород испытание на динамическое косвенное растяжение является наиболее удобным с точки зрения подготовки образцов, требований к испытаниям и наличия соответствующих стандартов.

Для измерения прочности хрупких сред (бетона, скальных пород, керамики и др.) на косвенное растяжение во всем мире используется испытание на раскалывание

при сжатии цилиндрического образца по диаметральной плоскости. Это испытание впервые было предложено бразильским инженером Фернандо Луис Лобу Карнейру в 1943 году на Пятой конференции Бразильской ассоциации по стандартизации [9], отсюда его название – бразильский тест. Диаметрально нагружение цилиндра вызывает практически равномерное растягивающее напряжение, перпендикулярное плоскости нагружения, а разрушающая нагрузка интерпретируется как нагрузка, при которой эти растягивающие напряжения достигают предела прочности материала на одноосное растяжение. Прочность на растяжение, основанная на этой интерпретации, известна как предел прочности на раскалывание. Для идеально хрупкого материала предел прочности на раскалывание совпадал бы с пределом прочности на одноосное растяжение. Поскольку реальные хрупкие среды (горные породы, бетоны) являются не идеально хрупким материалом, а так называемым квазихрупким материалом, хорошо известно, что полученная в результате таких испытаний прочность на раскалывание несколько отличается от истинной прочности на одноосное растяжение (как правило, завышается) [10]. В настоящее время бразильский тест – это стандартизированный метод статических испытаний, включенный в основные международные стандарты на бетон, такие как ASTM C-496, ISO 4105, BS 1881-117, ГОСТ 10180-90, и на горные породы ASTM Standard D3967-08.

Известна также статическая схема испытания на раскалывание бетонного куба [11], разработанная в соответствии с китайским стандартом SL352-2006. Простота изготовления образцов малодеформируемых хрупких сред кубической формы имеет преимущество по сравнению с изготовлением образцов цилиндрической формы.

Вычисление прочности при косвенном растяжении (раскалывании) образцов и цилиндрической и кубической формы производится из условия линейно-упругого поведения материала до разрушения. Согласно теории изотропной упругости, формула для номинальной прочности на растяжение при раскалывании, предложенная С.П. Тимошенко [12], имеет вид: $\sigma_t = 2P_c / (\pi DB)$, где σ_t – прочность на растяжение при раскалывании, P_c – измеренная пиковая нагрузка, D – диаметр образца, B – толщина образца.

В статье [13] представлены результаты испытаний бетона на раскалывание цилиндрического и призматического образцов, сжимаемых вдоль двух диаметрально противоположных образующих, как схематически показано на рис. 1. В обеих схемах реализуется режим плоской деформации за счет точечно приложенной линейно распределенной на внешней поверхности образца сжимающей нагрузки и возникающим в результате растягивающим напряжением в поперечном направлении.

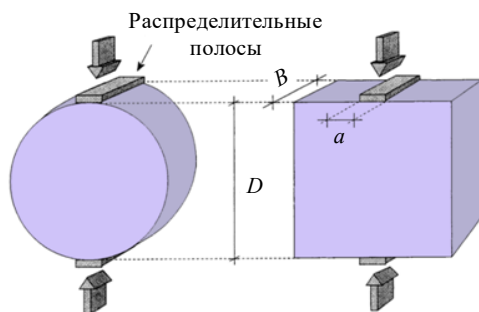


Рис. 1. Схема испытаний на раскалывание цилиндрических и призматических образцов

Для предотвращения множественных трещин и смятия в точках приложения нагрузки усилие распределяется по двум опорным полосам, ширина которых a различается в зависимости от стандарта. Для материалов линейно-упругого типа такая геометрия приводит к практически равномерному растягивающему напряжению вдоль плоскости нагружения, и ожидаемым видом разрушения является раскалывание образца на две половины поперек этой плоскости. Обнаружено небольшое (менее 2%) превышение прочности на раскалывание относительно прочности при прямом растяжении для кубических образцов по сравнению с цилиндрическими [13].

Указанные выше стандарты предусматривают статическое нагружение образцов. В динамической области нагружения статья [14] считается пионерской в плане реализации бразильского теста с помощью модификации метода Кольского с системой разрезного стержня Гопкинсона (РСГ). Классическая схема метода Кольского предполагает однородное напряженное состояние образца, которое обеспечивается за счет большой длительности импульса, нагружающего образец, и малым временем распространения волн в теле образца малого размера. При нагружении в образце происходит многократное прохождение нагружающего импульса и в нем после 4-5 пробегов волн устанавливается однородное напряженное состояние. Факт установления однородного напряженного состояния образца при испытаниях на раскалывание и цилиндрического, и кубического образцов контролируется по равенству сил на торцах образца, примыкающих к мерным стержням. Вследствие однородности напряженного состояния образцов процесс нагружения образца, как и в традиционном методе Кольского, может рассматриваться как квазистатический, и для расчета напряжения может применяться формула, предложенная С.П. Тимошенко [12] для статических испытаний, но с учетом регистрации процесса во времени:

$$\sigma_t = \frac{2P_c(t)}{\pi DB}, \quad (1)$$

где $P_c(t)$ – сжимающее усилие, приложенное к боковой поверхности цилиндрического образца. Благодаря простоте подготовки образцов и проведения испытаний бразильский тест является одним из самых популярных испытаний на растяжение для горных пород и камнеподобных геоматериалов [15–17]. Международное общество механики горных пород (ISRM) утвердило стандартизированный метод бразильского испытания для косвенного измерения предела динамической прочности на растяжение по формуле (1) [18]. К настоящему времени известны многочисленные статьи обзорного плана по успешному применению метода бразильского испытания для исследования динамической прочности различных хрупких сред (бетоны, горные породы) на раскалывание при сжатии (см., например [19–22] и литературу к ним).

В литературе было отмечено, что бразильское испытание на косвенное растяжение дает завышенные значения прочности горных пород на растяжение по сравнению с прямым испытанием на растяжение [23–25]. Целью настоящей статьи является сравнительное исследование динамической прочности на растяжение, полученной в системе РСГ при использовании классической схемы бразильского теста и в результате раскалывания образца кубической формы.

Экспериментальная методика и установка для испытаний

Для исследования динамической прочности горной породы габро-диабаз при косвенном растяжении использовалась установка [26], реализующая метод Кольского

с разрезным стержнем Гопкинсона на сжатие и включающая в себя газовую пушку и комплект стальных мерных стержней (нагружающего и опорного) диаметром 20 мм, оснащенных тензодатчиками для измерения упругих импульсов деформации (падающего $\varepsilon^I(t)$, отраженного $\varepsilon^R(t)$ и прошедшего $\varepsilon^T(t)$), рис. 2.

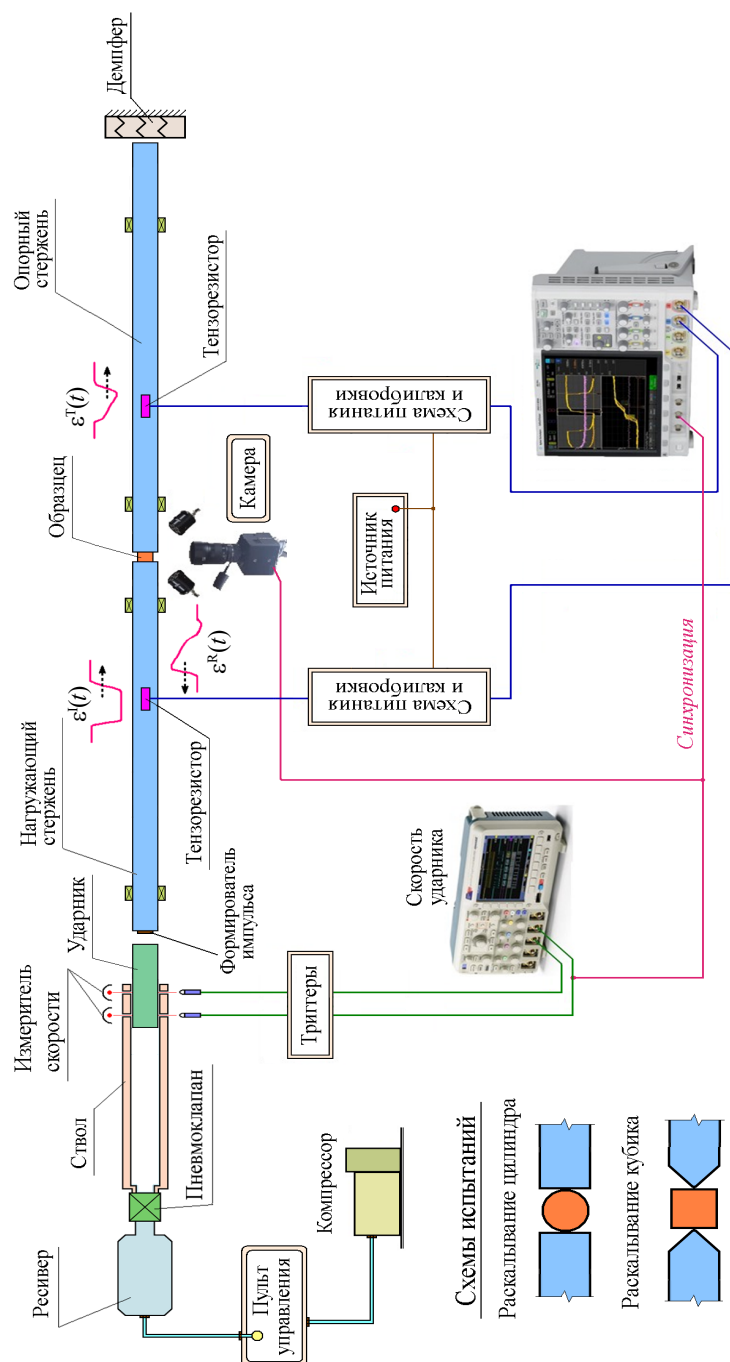


Рис. 2. Схема установки на раскалывание образцов

Программой испытаний предусматривалось сравнительное исследование прочности при косвенном растяжении образцов горной породы путем раскалывания образцов цилиндрической и кубической формы. Методика раскалывания образца цилиндрической формы (традиционный бразильский тест) отличается от простого испытания на одноосное сжатие цилиндрического образца способом передачи нагружающего импульса на образец. Раскалывание кубических образцов производится путем приложения динамической сжимающей нагрузки через клиновидные насадки на концах мерных стержней. Нагрузка прикладывается к диаметрально противоположным образующим цилиндрического образца или к противоположным граням кубического образца (см. рис. 2).

Как было отмечено [26], при динамических испытаниях образцов малодеформируемых хрупких сред необходимо обеспечить однородность напряженно-деформированного состояния образца в процессе нагружения. Для этого применяется технология формирования падающего импульса, которая предусматривает динамическое воздействие ударника по торцу нагружающего стержня через различные легко деформируемые прокладки, уменьшающие крутизну фронта падающего импульса. Благодаря этому в образце устанавливается однородное напряженно-деформированное состояние. В качестве формирователя импульса использовалось кольцо из отоженной медной проволоки диаметром 1,2 мм, размещенное на ударяемом торце нагружающего мерного стержня.

Пример получаемых в экспериментах упругих импульсов деформации при испытаниях на раскалывание показан на рис. 3. На луче 1 показан падающий импульс сжатия (отрицательной полярности) и отраженный импульс растяжения (положительной полярности), а на луче 2 показан прошедший импульс сжатия (отрицательной полярности).

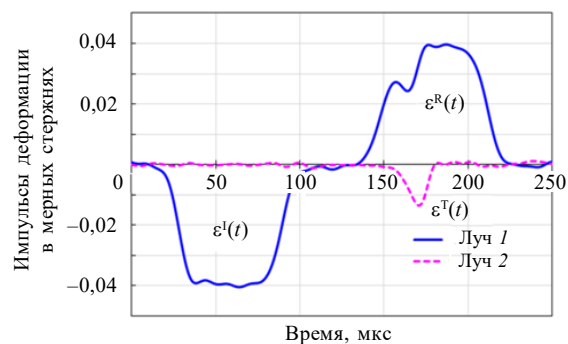


Рис. 3. Исходные импульсы в системе РСГ при испытаниях на раскалывание

Регистрация упругих импульсов деформации в мерных стержнях проводилась цифровым осциллографом и затем передавалась в компьютер для дальнейшей обработки. Для получения диаграмм деформирования образцов при косвенном растяжении использовалась оригинальная программа, написанная на языке PУTON. Программа позволяет регистрировать исходные импульсы в мерных стержнях, синхронизировать их между собой и получать требуемые зависимости напряжения раскалывания от времени.

Для получения достоверной информации о поведении образца горной породы при нагружении найденные экспериментально упругие импульсы в мерных стержнях должны быть синхронизированы во времени. Критерием правильной синхронизации

импульсов является совпадение суммы падающего и отраженного импульсов в нагружающем стержне (на одном торце образца) с прошедшим импульсом в опорном стержне (на другом торце образца).

Процесс динамического деформирования и разрушения образцов регистрируется с помощью высокоскоростной камеры Phantom VEO 710L.

Результаты исследования

Для динамических испытаний методом бразильского теста были изготовлены образцы из магматической породы габбро-диабаз в виде дисков диаметром ~ 22 мм и толщиной ~ 11 мм, а также кубической формы с длиной ребра ~ 21 мм.

Были проведены циклы динамических испытаний цилиндрических и кубических образцов на раскалывание. Для нагружения системы РСГ импульсами сжатия использовались ударники длиной 150 мм. Вариация скорости ударника от 12 до 24 м/с позволила получить падающие импульсы различной амплитуды, что обеспечивало различные скорости нагружения образца.

Поскольку при динамических испытаниях на раскалывание хрупких сред измерение деформации образца невозможно, в качестве сравнительной характеристики для построения скоростных зависимостей прочности используется не скорость деформации, а скорость роста напряжений.

На рис. 4 показан пример импульсов деформации (падающего и отраженного в нагружающем стержне, а также прошедшего в опорном стержне) после их синхронизации при испытании на раскалывание образца цилиндрической формы (бразильский диск). Для удобства восприятия все импульсы показаны условно положительными. На рисунке точка А на отраженном и прошедшем импульсах индицирует начало процесса лавинообразного разрушения образца.

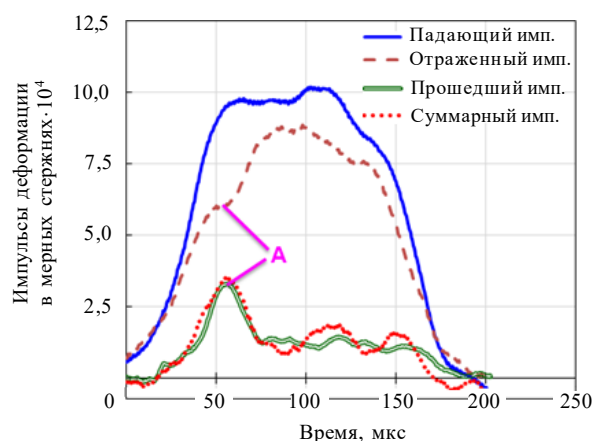


Рис. 4. Синхронизированные импульсы в системе РСГ при испытаниях бразильского диска

Хорошо видно, что при достижении пика напряжения в прошедшем импульсе (около 58 мкс) происходит его спад (что свидетельствует о начавшемся процессе разрушения образца) и синхронно начинается рост отраженного импульса (что свидетельствует о начавшемся росте деформации образца за счет ослабления сопротивляемости образца вследствие его разрушения). Такое временное совпадение говорит о правильной синхронизации зарегистрированных импульсов в обоих мерных стержнях. Хорошее совпадение суммарного импульса $\varepsilon^L(t) + \varepsilon^R(t)$ на границе образца,

контактирующей с нагружающим стержнем, и импульса $\varepsilon^T(t)$ на границе с опорным стержнем подтверждает выполнение основной предпосылки метода Кольского о равенстве сил на торцах образца и, следовательно, об однородном напряженно-деформированном состоянии в нем.

Подобная ситуация наблюдается и при испытании на раскалывание кубического образца (рис. 5).

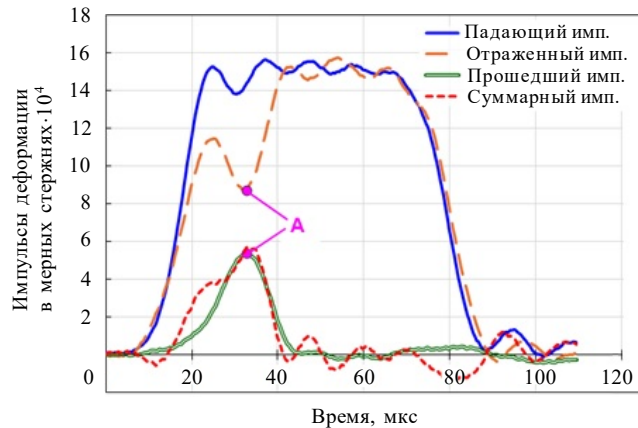


Рис. 5. Синхронизированные импульсы в системе РСГ при раскалывании кубического образца

На рис. 6 представлен пример полученной по формуле (1) зависимости развития во времени напряжения раскалывания цилиндрического образца, максимальная величина которого может быть принята за прочность горной породы при растяжении. На этом же рисунке пунктирной линией показана линейная аппроксимация участка активного нагружения и приведено ее уравнение, характеризующее скорость роста напряжений.

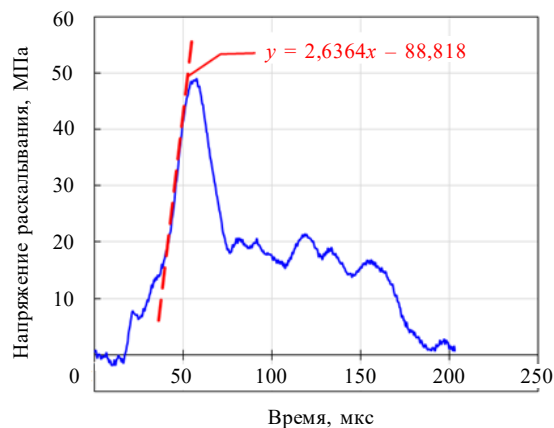


Рис. 6. Диаграмма раскалывания образца при испытаниях бразильского диска

На рис. 7 показан пример аналогичной зависимости при испытаниях образца кубической формы и приведено уравнение линейной аппроксимации участка активного нагружения, характеризующее скорость роста напряжений.

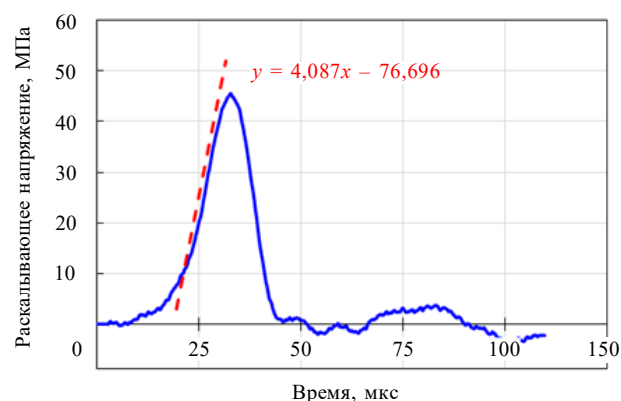


Рис. 7. Диаграмма раскалывания кубического образца

Полученные в результате серии экспериментов прочностные характеристики исследуемого гранита габбро-диабаз при косвенном растяжении цилиндрических и кубических образцов позволили оценить скоростные зависимости максимальных растягивающих напряжений (рис. 8). Эти зависимости могут быть аппроксимированы степенными уравнениями, показанными на рисунке.

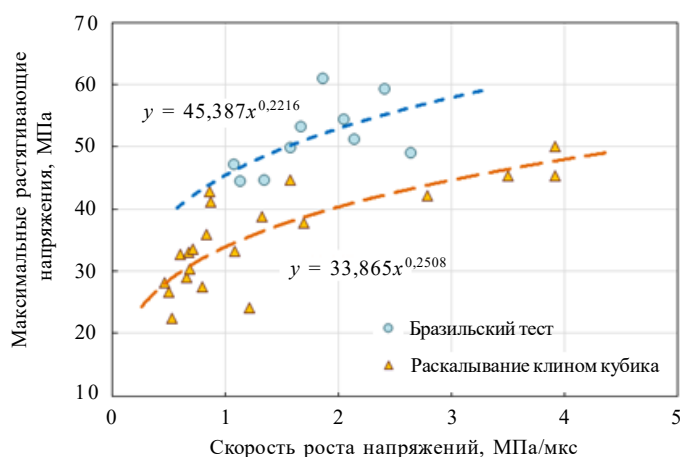


Рис. 8. Скоростные зависимости максимальных растягивающих напряжений

Хорошо видно, что полученная зависимость соответствует известной тенденции повышения прочностных свойств горных пород при увеличении скорости роста напряжений. Прочностные свойства гранита при раскалывании цилиндрических образцов в среднем на 20–25% выше, чем при раскалывании кубических образцов.

Важной характеристикой хрупких сред является инкубационное время «жизни» образца при приложении динамической нагрузки сжатия или растяжения. На участке активного роста напряжения в образце (см. рис. 6 и 7) происходит процесс подготовки образца к разрушению (инкубация) путем постепенного накопления в его теле внутренних повреждений. Время инкубации определяется по моменту достижения напряжением в материале своего максимума, после которого начинается лавинообразное разрушение материала.

Обработка результатов цикла проведенных испытаний на раскалывание цилиндрических и кубических образцов позволила в каждом испытании определить инкуба-

ционное время до разрушения (время «жизни») образцов при различных скоростях ударника, нагружающего систему РСГ, и построить зависимости времени «жизни» материала от скорости роста напряжений при нагружении цилиндрических и кубических образцов (рис. 9). Полученная зависимость аппроксимируется степенным уравнением, показанным на рисунке.

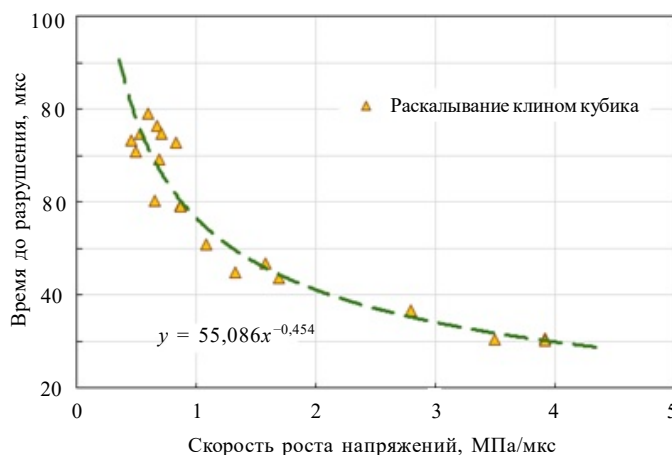


Рис. 9. Скоростные зависимости времени до разрушения

Полученная скоростная зависимость инкубационного времени соответствуют известной тенденции уменьшения инкубационного времени с увеличением скорости роста напряжений. Прочностные и временные параметры разрушения исследованного гранита позволяют определить параметры структурно-временного критерия прочности Петрова – Морозова [27]. Инкубационное время – это независимый от геометрии образца и способа его нагружения параметр, являющийся важнейшей характеристикой для оценки прочности конструкционных материалов при высокоскоростном воздействии [28]. Качественно оно связано с релаксационными процессами роста микродефектов в структуре материала. Полученные ранее экспериментальные данные о динамическом разрушении хрупких сред (бетоны и горные породы) методами на раскалывание с успехом применялись для определения теоретических скоростных зависимостей прочности, которые показали очень хорошее совпадение с экспериментальными данными [29–31].

Кроме регистрации импульсов в системе РСГ проводилась высокоскоростная видеорегистрация процесса раскалывания образца, которая позволяла определить момент появления и процесс развития трещины в образце, а также его разрушение. При скорости съемки 300000 кадр/с размер кадра составляет 192×64 пкс, время экспозиции каждого кадра составляет 1 мкс, интервал между кадрами 3,32 мкс. На рис. 10 показаны кадры начальной стадии процесса деформирования и разрушения образцов цилиндрической формы (а) и кубической формы (б). На кадрах нагружающий стержень располагается справа, а опорный стержень слева от образцов. Соответственно нагружающий импульс прикладывается к образцам справа налево.

Как видно на рис. 2, для синхронизации регистрирующего осциллографа и скоростной камеры используется импульс, полученный с измерителя скорости ударника на конце ствола газовой пушки. Поэтому полезная информация и на экране осциллографа, и на зарегистрированных кадрах появляется только спустя опреде-

ленное время, включающее время движения ударника до ударяемого торца нагружающего мерного стержня и время распространения упругого импульса в нагружающем мерном стержне до регистрирующего тензодатчика (для осциллографа) и до образца (для камеры). Первым информативным кадром на кинограмме назначается кадр, на котором обнаруживается перемещение торца нагружающего стержня (в бразильском тесте) или клина на торце нагружающего стержня (при раскалывании кубического образца) по сравнению с предыдущим кадром. Соответственно от этого кадра начинается отсчет времени процесса деформирования образцов. Вопрос назначения первого кадра регистрации процесса деформирования требует дальнейшей проработки.

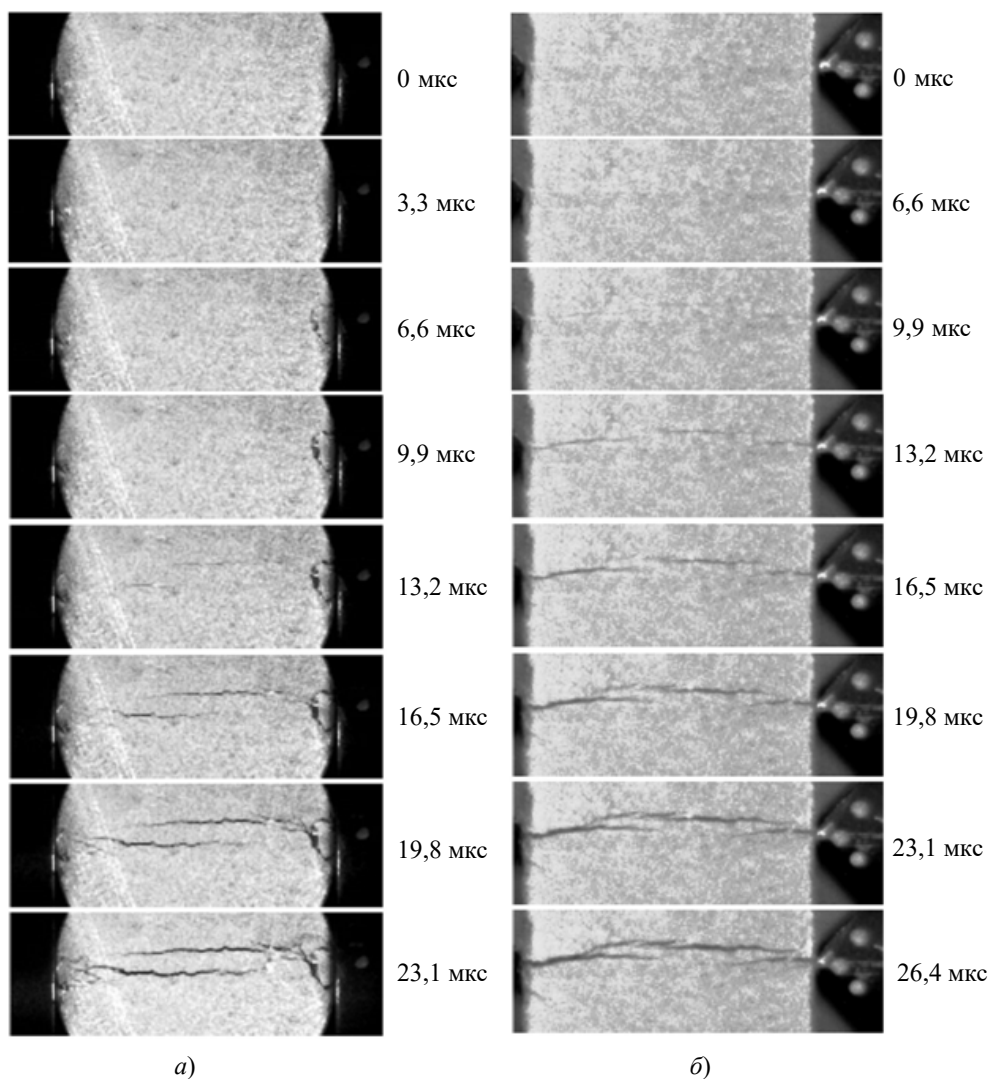


Рис. 10. Кинограммы процесса раскалывания цилиндрического (а) и кубического (б) образцов

На кинограммах видно, что первая трещина для обоих типов испытаний появляется по времени около 11 мкс от первого информативного кадра видеорегистрации. При нагружении цилиндрического образца (бразильский тест) на начальных кадрах

хорошо видно образование зоны разрушения непосредственно у плоского торца нагружающего стержня, что обычно наблюдается и при статических испытаниях. Раскалывание и цилиндрического, и кубического образцов происходит не строго по плоскости нагружения сжатием: трещины появляются и у нагружаемого торца образца, и у опорного, изгибаются и ветвятся, что является следствием неоднородности структуры горной породы.

Процесс выравнивания напряженно-деформированного состояния образца при его нагружении импульсом сжатия происходит постепенно [26], внутренние напряжения во всем теле образца плавно нарастают, вызывая появление в нем микротрещин. При этом видимых трещин на внешней поверхности образца еще не наблюдается. По мере нарастания внутренних напряжений происходит процесс развития и слияния микротрещин в макротрещины, что приводит к появлению поверхностных трещин, видимых на кадрах съемки, и разрушению образца. При этом образец еще некоторое время сохраняет свою несущую способность, и напряжения в нем продолжают линейно нарастать, о чем свидетельствует прошедший импульс в опорном стержне на рис. 4. При достижении напряжениями максимума длина ширина и количество трещин превышают критический порог и начинается лавинообразный процесс разрушения, сопровождающийся сбросом напряжений и ростом деформаций, что хорошо видно на рис. 5.

Вопрос точной синхронизации во времени электрического процесса регистрации импульсов деформации в мерных стержнях и оптического процесса скоростной видеорегистрации деформирования образца остается открытым и требует дальнейшей проработки.

Заключение

Реализованы две модификации метода Кольского для исследования прочностных свойств хрупких материалов (горных пород) при растяжении методом раскалывания образцов цилиндрической формы (бразильский тест) и кубической формы (раскалывание с использованием клиновидных насадок на торцах мерных стержней, примыкающих к образцу). Проведенные сравнительные испытания на раскалывание образцов габро-диабазы цилиндрической и кубической формы показали некоторое (в среднем на 25–30%) превышение прочностных свойств на растяжение у образцов цилиндрической формы по сравнению с кубическими образцами. Инкубационное время деформирования до начала лавинообразного разрушения у цилиндрических образцов больше, чем у кубических на 20%. Анализ причин таких отличий требует дополнительных исследований.

Полученные результаты по динамической прочности на растяжение образцов горной породы соответствуют известной тенденции повышения прочностных свойств горных пород при увеличении скорости роста напряжений. Построенные зависимости прочности на раскалывание и времени до разрушения (инкубационное время «жизни») от скорости роста напряжений предполагается использовать в дальнейшей работе для оснащения структурно-временного критерия разрушения Морозова – Петрова.

Список литературы

1. Gao C. *Petroleum Production Technology*. Beijing, China: Science Press, 2017. 257 p.
2. Zhao J., Zhou Y.X., Hefny A.M., Cai J.G., Chen S.G., Li H.B., Liu J.F., Jain M., Foo S.T., Seah C.C. Rock dynamics research related to cavern development for ammunition storage.

- Tunnelling and Underground Spate Technology*. 1999. Vol. 14. Iss. 4. P. 513–526. [https://doi.org/10.1016/S0886-7798\(00\)00013-4](https://doi.org/10.1016/S0886-7798(00)00013-4).
3. Zhang Q. Mechanical behaviour of rock materials under dynamic loading. *Doctor Sciences Dissertation*. Lausanne, Switzerland. 2014.
4. Diederichs M.S., Kaiser P.K. Tensile strength and abutment relaxation as failure control mechanisms in underground excavations. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 1999. Vol. 36. Iss. 1. P. 69–96. [https://doi.org/10.1016/S0148-9062\(98\)00179-X](https://doi.org/10.1016/S0148-9062(98)00179-X).
5. Perras M.A., Diederichs M.S. A review of the tensile strength of rock: concepts and testing. *Geotechnical and Geological Engineering*. 2014. Vol. 32. P. 525–546. <https://doi.org/10.1007/s10706-014-9732-0>.
6. Patel S., Martin C.D. Application of flattened brazilian test to investigate rocks under confined extension. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2018. Vol. 51. P. 3719–3736. <https://doi.org/10.1007/s00603-018-1559-1>.
7. Брагов А.М., Ломунов А.К., Константинов А.Ю., Ламзин Д.А. Модификация метода Кольского для испытаний хрупких материалов на растяжение. *Приволжский научный журнал*. 2016. Вып. 2. №38. С. 9–17.
8. Гонов М.Е. Комплексное исследование свойств мелкозернистого бетона при динамическом растяжении и срезе. *Проблемы прочности и пластичности*. 2020. Т. 82. №4. С. 442–457. <https://doi.org/10.32326/1814-9146-2020-82-4-442-457>.
9. Carneiro F.L.L.B. A new method to determine the tensile strength of concrete. *Proceedings of the 5th Meeting of the Brazilian Association for Technical Rules*. Sao Paulo, Brazil, 16 Sept. 1943. P. 126–129 (In Portuguese).
10. Olesen J.F., Østergaard L., Stang-H. Nonlinear fracture mechanics and plasticity of the split cylinder test. *Materials and Structures*. 2006. Vol. 39. P. 421–432. <https://doi.org/10.1617/s11527-005-9018-3>.
11. Chai Q., Huang S., Wan F., Wu F., Feng L. A new experimental method to measure and calculate the tensile strength of concrete. *Front. Mater.* 2023. Vol. 10. Article No 1216747. <https://doi.org/10.3389/fmats.2023.1216747>.
12. Timoshenko S.P., Goodier J.N. *Theory of Elasticity*. New York: McGraw-Hill, 1970. 608 p.
13. Rocco C., Guinea G.V., Planas J., Elices M. Review of the splitting-test standards from a fracture mechanics point of view. *Cement and Concrete Research*. 2001. Vol. 31. Iss. 1. P. 73–82. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00425-7](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00425-7).
14. Rodriguez T., Navarro C., Sanchez-Galvez V. Splitting tests: an alternative to determine the dynamic tensile strength of ceramic materials. *Journal de Physique IV*. 1994. P. 101–106. <https://doi.org/10.1051/jp4:1994815>.
15. Wang Q.Z., Jia X.M., Kou S.Q., Zhang Z.X., Lindqvist P.A. The flattened Brazilian disc specimen used for testing elastic modulus, tensile strength and fracture toughness of brittle rocks: analytical and numerical results. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2004. Vol. 41. Iss. 2. P. 245–253. [https://doi.org/10.1016/S1365-1609\(03\)00093-5](https://doi.org/10.1016/S1365-1609(03)00093-5).
16. Aydin A., Basu A. The use of Brazilian test as a quantitative measure of rock weathering. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2006. Vol. 39. P. 77–85. <https://doi.org/10.1007/s00603-005-0069-0>.
17. Coviello A., Lagioia R., Nova R. On the measurement of the tensile strength of soft rocks. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2005. Vol. 38. P. 251–273. <https://doi.org/10.1007/s00603-005-0054-7>.
18. Suggested methods for determining tensile strength of rock materials. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*. 1978. Vol. 15. Iss. 3. P. 99–103.
19. Khosravani M.R., Weinberg K. A review on split Hopkinson bar experiments on the dynamic characterisation of concrete. *Construction and Building Materials*. 2018. Vol. 190. P. 1264–1283. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.09.187>.
20. Zhang Q.B., Zhao J. A review of dynamic experimental techniques and mechanical behaviour of rock materials. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2014. Vol. 47. P. 1411–1478. DOI: 10.5455/jib.20130610023623.
21. Li D., Ngai L., Wong Y. The brazilian disc test for rock mechanics applications. *Review*

and New Insights. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2013. Vol. 46. P. 269–287. DOI: 10.1007/s00603-012-0257-7.

22. Wang Q.Z., Jia X.M., Kou S.Q., Zhang Z.X., Lindqvist P.A. The flattened Brazilian disc specimen used for testing elastic modulus, tensile strength and fracture toughness of brittle rocks: analytical and numerical results. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2004. Vol. 41. Iss. 2. P. 245–253. DOI: 10.1016/s1365-1609(03)00093-5.

23. Musaed N.J. Al-Awad. Modification of the Brazilian indirect tensile strength formula for better estimation of the tensile strength of rocks and rock-like geomaterials. *Journal of King Saud University – Engineering Sciences*. 2022. Vol. 34. Iss. 2. P. 147–154. <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2020.08.003>.

24. Serati M., Williams D.J. Puzzles in tensile strength determination of hard rocks. *The 53rd US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium*. New York, USA, 23–26 June 2019. Vol. 5. P. 3728–3732.

25. Derek M. The impact of behaviour of rocks in tunnel excavation design. In: *Rock Engineering and Rock Mechanics: Structures in and on Rock Masses*. London: Taylor & Francis group, 2014. P. 51–62.

26. Брагов А.М., Константинов А.Ю., Ломунов А.К., Филиппов А.Р., Брагов И.А. Концепция исследования прочности скальных пород при растяжении. *Проблемы прочности и пластичности*. 2025. Т. 87. №3. С. 389–400. <https://doi.org/10.32326/1814-9146-2025-87-3-389-400>.

27. Bragov A.M., Petrov Yu.V., Karihaloo B.L., Konstantinov A.Yu., Lamzin D.A., Lomunov A.K., Smirnov I.V. Dynamic strengths and toughness of an ultra high performance fibre reinforced concrete. *Engineering Fracture Mechanics*. 2013. Vol. 110. P. 477–488. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2012.12.019>.

28. Норель Б.К., Петров Ю.В., Селютин Н.С. *Энергетические и временные характеристики предельного состояния горных пород*. СПб.: Изд-во С.-Петербург. ун-та, 2018. 132 с.

29. Bragov A.M., Konstantinov A.Y., Lamzin D.A., Lomunov A.K., Karihaloo B.L., Petrov Y.V., Smirnov I.V. High-rate deformation and fracture of fiber reinforced concrete. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 2012. Vol. 53. Iss. 6. P. 926–933. DOI: 10.1134/S0021894412060168.

30. Petrov Y.V., Karihaloo B.L., Bratov V.V., Bragov A.M. Multi-scale dynamic fracture model for quasi-brittle materials. *International Journal of Engineering Science*. 2012. Vol. 61. P. 3–9. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0020722512001243>.

31. Petrov Yu.V., Bragov A.M., Evstifeev A., Cadoni E. Structural-temporal approach for dynamic strength characterization of gabbro-dabase. *The European Physical Journal*. 2015. Vol. 94. No 1. Article No 01042. DOI: 10.1051/epjconf/20159401042.

References

1. Gao C. *Petroleum Production Technology*. Beijing, China. Science Press. 2017. 257 p.
2. Zhao J., Zhou Y.X., Hefny A.M., Cai J.G., Chen S.G., Li H.B., Liu J.F., Jain M., Foo S.T., Seah C.C. Rock dynamics research related to cavern development for ammunition storage. *Tunn. Undergr. Space*. 1999. Vol. 14. Iss. 4. P. 513–526. [https://doi.org/10.1016/S0886-7798\(00\)00013-4](https://doi.org/10.1016/S0886-7798(00)00013-4).
3. Zhang Q. Mechanical behaviour of rock materials under dynamic loading. *D. Sci. Dissertation*. Lausanne, Switzerland. 2014.
4. Diederichs M.S., Kaiser P.K. Tensile strength and abutment relaxation as failure control mechanisms in underground excavations. *Int. J. Rock. Mech. Min. Sci.* 1999. Vol. 36. Iss. 1. P. 69–96. [https://doi.org/10.1016/S0148-9062\(98\)00179-X](https://doi.org/10.1016/S0148-9062(98)00179-X).
5. Perras M.A., Diederichs M.S. A review of the tensile strength of rock: concepts and testing. *Geotechnical and Geological Engineering*. 2014. Vol. 32. P. 525–546. <https://doi.org/10.1007/s10706-014-9732-0>.
6. Patel S., Martin C.D. Application of flattened brazilian test to investigate rocks under confined extension. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2018. Vol. 51. P. 3719–3736. <https://doi.org/10.1007/s00603-018-1559-1>.

7. Bragov A.M., Lomunov A.K., Konstantinov A.Yu., Lamzin D.A. Modifikatsiya metoda Kolskogo dlya ispytaniy khrupkikh materialov na rastyazhenie [Modification of the Kolsky method for tension tests of brittle materials]. *Privolzhskiy nauchnyy zhurnal [The Privolzhsky Scientific Journal]*. 2016. Iss. 2. No 38. P. 9–17 (In Russian).
8. Gonov M.E. Kompleksnoe issledovanie svoystv melkozernistogo betona pri dinamicheskom rastyazhenii i sreze [Comprehensive study of the properties of fine-grained concrete under dynamic tension and shear]. *Problemy prochnosti i plastichnosti [Problems of Strength and Plasticity]*. 2020. Vol. 82. No 4. P. 442–457 (In Russian).
9. Carneiro F.L.L.B. A new method to determine the tensile strength of concrete. *Proceedings of the 5th Meeting of the Brazilian Association for Technical Rules*. Sao Paulo, Brazil, 16 Sept. 1943. 16. P. 126–129 (In Portuguese).
10. Olesen J.F., Østergaard L., Stang H. Nonlinear fracture mechanics and plasticity of the split cylinder test. *Mater. Struct.* 2006. Vol. 39. P. 421–432. <https://doi.org/10.1617/s11527-005-9018-3>.
11. Chai Q., Huang S., Wan F., Wu F., Feng L. A new experimental method to measure and calculate the tensile strength of concrete. *Front. Mater.* 2023. Vol. 10. Article No 1216747. <https://doi.org/10.3389/fmats.2023.1216747>.
12. Timoshenko S.P., Goodier J.N. *Theory of Elasticity*. New York. McGraw-Hill. 1970. 608 p.
13. Rocco C., Guinea G.V., Planas J., Elices M. Review of the splitting-test standards from a fracture mechanics point of view. *Cem. Concr. Res.* 2001. Vol. 31. Iss. 1. P. 73–82. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00425-7](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00425-7).
14. Rodriguez T., Navarro C., Sanchez-Galvez V. Splitting tests: an alternative to determine the dynamic tensile strength of ceramic materials. *Journal de Physique IV*. 1994. P. 101–106. <https://doi.org/10.1051/jp4:1994815>.
15. Wang Q.Z., Jia X.M., Kou S.Q., Zhang Z.X., Lindqvist P.A. The flattened Brazilian disc specimen used for testing elastic modulus, tensile strength and fracture toughness of brittle rocks: analytical and numerical results. *Int. J. Rock. Mech. Min. Sci.* 2004. Vol. 41. Iss. 2. P. 245–253. [https://doi.org/10.1016/S1365-1609\(03\)00093-5](https://doi.org/10.1016/S1365-1609(03)00093-5).
16. Aydin A., Basu A. The use of Brazilian test as a quantitative measure of rock weathering. *Rock. Mech. Rock. Eng.* 2006. Vol. 39. P. 77–85. <https://doi.org/10.1007/s00603-005-0069-0>.
17. Coviello A., Lagioia R., Nova R. On the measurement of the tensile strength of soft rocks. *Rock. Mech. Rock. Eng.* 2005. Vol. 38. P. 251–273. <https://doi.org/10.1007/s00603-005-0054-7>.
18. Suggested methods for determining tensile strength of rock materials. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*. 1978. Vol. 15. Iss. 6. P. 99–103.
19. Khosravani M.R., Weinberg K. A review on split Hopkinson bar experiments on the dynamic characterisation of concrete. *Construction and Building Materials*. 2018. Vol. 190. P. 1264–1283. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.09.187>.
20. Zhang Q.B., Zhao J. A review of dynamic experimental techniques and mechanical behaviour of rock materials. *Rock Mech. Rock Eng.* 2014. Vol. 47. P. 1411–1478. DOI: 10.5455/jib.20130610023623.
21. Li D., Ngai L., Wong Y. The brazilian disc test for rock mechanics applications. Review and new insights. *Rock Mech. Rock Eng.* 2013. Vol. 46. P. 269–287. DOI: 10.1007/s00603-012-0257-7.
22. Wang Q.Z., Jia X.M., Kou S.Q., Zhang Z.X., Lindqvist P.A. The flattened Brazilian disc specimen used for testing elastic modulus, tensile strength and fracture toughness of brittle rocks: analytical and numerical results. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 2004. Vol. 41. Iss. 2. P. 245–253. DOI: 10.1016/s1365-1609(03)00093-5.
23. Musaed N.J. Al-Awad. Modification of the Brazilian indirect tensile strength formula for better estimation of the tensile strength of rocks and rock-like geomaterials. *Journal of King Saud University – Engineering Sciences*. 2022. Vol. 34. Iss. 2. P. 147–154. <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2020.08.003>.
24. Serati M., Williams D.J. Puzzles in tensile strength determination of hard rocks. *The*

53rd US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium. New York, USA, 23–26 June 2019. Vol. 5. P. 3728–3732.

25. Derek M. The impact of behaviour of rocks in tunnel excavation design. In: *Rock Engineering and Rock Mechanics: Structures in and on Rock Masses*. London: Taylor & Francis group, 2014. P. 51–62.

26. Bragov A.M., Konstantinov A.Yu., Lomunov A.K., Filippov A.R., Bragov I.A. Konseptsiya issledovaniya prochnosti skalnykh porod pri rastyazhenii [Concept for studying the tensile strength of rocks]. *Problemy prochnosti i plastichnosti [Problems of Strength and Plasticity]*. 2025. Vol. 87. No 3. P. 389–400 (In Russian).

27. Bragov A.M., Petrov Yu.V., Karihaloo B.L., Konstantinov A.Yu., Lamzin D.A., Lomunov A.K., Smirnov I.V. Dynamic strengths and toughness of an ultra high performance fibre reinforced concrete. *Engineering Fracture Mechanics*. 2013. Vol. 110. P. 477–488. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2012.12.019>.

28. Norel B.K., Petrov Yu.V., Selyutina N.S. *Energeticheskie i vremennye kharakteristiki predelnogo sostoyaniya gornykh porod [Energy and temporal characteristics of the ultimate state of rocks]*. Saint Petersburg. Publishing house of St. Petersburg University. 2018. 132 p. (In Russian).

29. Bragov A.M., Konstantinov A.Y., Lamzin D.A., Lomunov A.K., Karihaloo B.L., Petrov Y.V., Smirnov I.V. High-rate deformation and fracture of fiber reinforced concrete. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 2012. Vol. 53. Iss. 6. P. 926–933. DOI: 10.1134/S0021894412060168.

30. Petrov Y.V., Karihaloo B.L., Bratov V.V., Bragov A.M. Multi-scale dynamic fracture model for quasi-brittle materials. *International Journal of Engineering Science*. 2012. Vol. 61. P. 3–9. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0020722512001243>.

31. Petrov Yu.V., Bragov A.M., Evstifeev A., Cadoni E. Structural-temporal approach for dynamic strength characterization of gabbro-diabase. *The European Physical Journal*. 2015. Vol. 94. No 1. Article No 01042. DOI: 10.1051/epjconf/20159401042.

DETERMINATION OF THE STRENGTH OF ROCKS UNDER INDIRECT TENSION BY THE SPLITTING METHOD*

Bragov A.M., Basalin A.V., Lomunov A.K., Filippov A.R., Bragov I.A.

*National Research Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod,
Nizhny Novgorod, Russian Federation*

lomunov@mech.unn.ru

Received by the Editor 2025/09/16

Two modifications of the Kolsky method have been implemented for studying the tensile strength properties of brittle materials (rocks) by splitting cylindrical specimens (Brazilian test) as well as cubic specimens (splitting using wedge-shaped attachments on the ends of measuring rods adjacent to the specimen). A series of dynamic splitting tests were conducted on cubic gabbro-diabase igneous rock specimens with an edge size of ~20 mm and cylindrical (Brazilian test) specimens with a diameter of ~22 mm and a thickness of ~11 mm. The splitting strength of rock specimens of both configurations was determined and its dependence on the stress growth rate was plotted. This dependence is consistent with the known tendency for the strength properties of rocks to increase with increasing stress growth rate. The strength properties of granite obtained by splitting cylindrical specimens are, on average, 25–30% higher than those obtained by splitting cubic specimens. The dependence of the material incubation time on the stress growth rate under loading of cylindrical constructed. The

* The research was supported by Russian Science Foundation (project No 25-19-00380).

constructed dependences of the splitting strength and the time to failure (incubation time of “life”) on the rate of stress growth are supposed to be used in further work to equip some destruction criteria, for example, the Morozov – Petrov structural-time destruction criterion. High-speed video recording of the cracking process of specimens of both geometries allows us to determine the moment of crack initiation and development in the specimen. The video recordings show that the first crack for both types appeared approximately 11 μ s after the first frame of video data. The question of precisely synchronizing the electrical process of recording deformation pulses in the pressure bars with the optical process of high-speed video recording of specimen deformation remains open and requires further investigation.

Keywords: dynamic strength, rock, splitting, Kolsky method, Brazilian test.