

УДК 539.3

DOI: 10.32326/1814-9146-2025-87-3-389-400

## КОНЦЕПЦИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЧНОСТИ СКАЛЬНЫХ ПОРОД ПРИ РАСТЯЖЕНИИ\*

© 2025 г.

**Брагов А.М., Константинов А.Ю.,  
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 27.07.2025*

Разработана и реализована оригинальная модификация метода Кольского для исследования динамической прочности хрупких сред при растяжении путем реализации раскалывания образца в форме кубика или параллелепипеда в системе разрезного стержня Гопкинсона. Установка включает в себя газовую пушку в качестве нагружающего устройства и комплект стальных мерных стержней (нагружающего и опорного) диаметром 20 мм из высокопрочной стали, оснащенных тензодатчиками для измерения упругих импульсов деформации. Нагружение системы разрезного стержня Гопкинсона производилось стальным ударником длиной 150 мм, что позволило получить в нагружающем мерном стержне падающий импульс сжатия длительностью около 100 мкс. Путем вариации скорости ударника достигались разные амплитуды падающей волны, которые обеспечивали различные скорости нагружения образца. Для испытания хрупких материалов (горных пород), которые имеют почти линейную зависимость диаграммы напряжение–деформация вплоть до разрушения, необходим недиспергирующий плавно нарастающий импульс в нагружающем стержне. В качестве формирователя использовалось кольцо из тонкой медной проволоки, размещенное на ударяемом торце нагружающего стержня. Особенностью установки является то, что импульсная сжимающая нагрузка прикладывается к боковым поверхностям образца через клиновидные насадки на торцах мерных стержней. При нагружении образца хрупкого материала импульсом сжатия происходит его раскалывание по плоскости приложения динамической сжимающей нагрузки. Поскольку в таком типе испытаний измерить деформацию образца при растяжении крайне сложно, в результате испытаний по измерениям импульса в опорном мерном стержне получают только зависимость развития сжимающего усилия, действующего в образце. Далее определяется процесс развития растягивающего напряжения в образце, пик которого является искомым прочностью горной породы при растяжении.

Проведен цикл динамических испытаний на раскалывание образцов магматической горной породы габбро-диабаз кубической формы с размером ребра ~20 мм. Построены зависимости прочности на раскалывание и времени до разрушения (время «жизни») от скорости роста напряжений.

---

\* Выполнено при поддержке РНФ (грант №25-19-00380).

Полученные зависимости соответствуют известной тенденции повышения прочностных свойств и уменьшения инкубационного времени при разрушении горных пород с увеличением скорости роста напряжений и могут быть использованы для оснащения структурно-временного критерия разрушения Морозова – Петрова.

*Ключевые слова:* динамическая прочность, скальные породы, раскалывание, метод Кольского, математическая модель.

## **Введение**

Во многих горнодобывающих инженерных приложениях, таких как высокоскоростное бурение и взрывное нагружение, горные породы подвергаются динамической нагрузке. Особенностью горных пород является их низкая прочность при одноосном растяжении, которая обычно составляет 1/10 от прочности породы на одноосное сжатие [1]. Таким образом, скальный материал с большей вероятностью разрушится при растяжении, чем при сжатии.

Существует несколько методов для оценки динамической прочности горных пород и других хрупких сред (бетонов, керамик) на растяжение при высоких скоростях деформации. Самым популярным методом исследования динамического поведения горных пород при растяжении является метод Кольского с системой разрезного стержня Гопкинсона [2]. Используется как прямое растяжение образца горной породы цилиндрической или кубической формы путем его приклеивания к торцам мерных стержней [3, 4], так и косвенное растяжение с использованием модификации метода Кольского (бразильский тест) [5]. В бразильском испытании предполагается, что образец в виде короткого диска нагружается равномерным усилием, которое прикладывается диаметрально к образующим цилиндра. Этот метод в 2012 году Международное общество механики горных пород (ISRM) рекомендовало в качестве подходящего метода определения прочности на растяжение хрупких сред при динамической нагрузке [6]. Следует учитывать, что бразильское испытание может завышать предел прочности горных пород на растяжение из-за наличия двусосного напряженного состояния образца вместо одноосного растяжения. Кроме того, было признано [7], что концентрация сжимающих напряжений вблизи нагружающей пластины оказывает значительное влияние на результаты бразильских испытаний. Для уменьшения этого влияния предлагаются специально разработанные изогнутые нагружающие пластины или легко деформируемые прокладки между плоской нагружающей пластиной и образцом. Особенностью таких испытаний является необходимость соблюдения точности цилиндрической формы образцов при их изготовлении.

Кроме бразильского теста прочность на растяжение хрупких сред может определяться методом откола в стержнях [8]. В этом случае установка состоит из ударника, мерного стержня и пристыкованного к нему длинного хрупкого образца. Воздействие ударника создает в мерном стержне упругую волну сжатия, которая проходит вдоль стержня к образцу. На границе мерный стержень – образец часть сигнала проходит в образец-цилиндр, другая часть отражается обратно в мерный стержень. Прошедшая в стержневой образец волна сжатия отражается от его свободного конца волной растяжения. Интерференция волн сжатия и растяжения приводит к разрыву образца в сечении, когда импульс растяжения превышает амплитуду сжимающего импульса. Эксперименты по отколу возможны только при испытании хрупких материалов, проч-

ность которых на сжатие значительно выше, чем на растяжение. В противном случае образец может быть поврежден волной сжатия.

Известна также статическая схема испытания на раскалывание бетонного куба [9], 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. Схема такого испытания представлена на рис. 1.

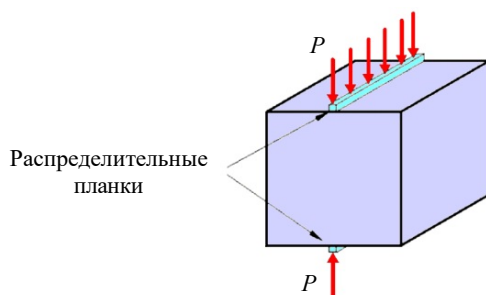


Рис. 1. Схема раскалывания кубического образца

Статическая нагрузка к плоскостям кубического образца прикладывается через стальные распределительные планки с поперечным сечением 5×5 мм. Прочность на раскалывание кубического образца рассчитывается по формуле, определенной из решения задачи Герца [10]:

$$\sigma_t = \frac{2P_c}{\pi A_s} = 0,636 \frac{P_c}{A_s}, \quad (1)$$

где  $\sigma_t$  – прочность на раскалывание куба;  $P_c$  – максимальная сжимающая нагрузка, при которой наступает раскалывание образца;  $A_s$  – площадь поперечного сечения образца.

Эта схема вполне может использоваться и при исследовании динамической прочности хрупких сред на растяжение с использованием метода Кольского.

### Экспериментальная методика

Для исследования прочности горных пород при растяжении реализована модификация метода Кольского на раскалывание образца кубической формы волной сжатия в системе разрезного стержня Гопкинсона (РСГ). Установка включает в себя газовую пушку в качестве нагружающего устройства и комплект стальных мерных стержней (нагружающего и опорного) диаметром 20 мм из высокопрочной стали, оснащенных тензодатчиками для измерения упругих импульсов деформации (падающего  $\varepsilon^I(t)$ , отраженного  $\varepsilon^R(t)$  и прошедшего  $\varepsilon^T(t)$ ), на основании которых традиционно определяются процессы развития напряжения и деформации исследуемого образца [2]. Схема испытания показана на рис. 2.

Для передачи сжимающего усилия с нагружающего мерного стержня 2 на образец 4 и из образца 4 в опорный мерный стержень 5 используются клиновидные насадки 3. Регистрация упругих импульсов деформаций в мерных стержнях производится малобазными тензорезисторами 1, наклеенными на боковую поверхность мерных стержней.

Прототипом таких высокоскоростных испытаний явилась методика на статическое

раскалывание бетонных образцов-кубов, описанная в ГОСТ 10180-90, Британском стандарте BS EN 12390-6-2000 и в китайском стандарте SL352-2006. Поскольку в методе Кольского длительность нагружающего образца импульса многократно превышает время прохождения волны по длине образца, в нем после нескольких пробегов волн устанавливается однородное напряженно-деформированное состояние [11]. Поэтому процесс нагружения подобен квазистатическому и для расчета напряжения может использоваться формула (1), применяемая в указанных ГОСТах.

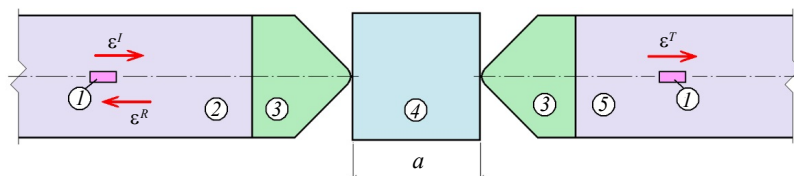


Рис. 2. Схема нагружения образца

При нагружении импульсом сжатия образца хрупкого материала происходит его раскалывание по плоскости приложения динамической сжимающей нагрузки. Тензодатчик на боковой поверхности опорного стержня регистрирует процесс развития сжимающего усилия, которое реализуется в образце:

$$P_c(t) = EA_b \varepsilon^T(t), \quad (2)$$

где  $E$  и  $A_b$  – модуль Юнга и площадь поперечного сечения опорного стержня соответственно,  $\varepsilon^T(t)$  – импульс деформации в опорном стержне.

Поскольку в этом типе испытаний измерить деформацию образца при растяжении крайне сложно, в результате испытаний по измерениям импульса в опорном мерном стержне получали только зависимость (2) развития сжимающего усилия  $P_c(t)$ , действующего в образце. Далее по формуле (1) определялся процесс развития растягивающего напряжения  $\sigma_l(t)$  в образце, пик которого является искомой прочностью горной породы при растяжении.

Для описания поведения хрупких сред при высокоскоростных воздействиях используются различные математические модели деформирования и критерия разрушения, среди которых важное место занимает структурно-временной критерий Морозова – Петрова [12, 13]. Критерий инкубационного времени разрушения позволяет рассчитывать наблюдаемые в экспериментах по разрушению твердых тел изменения динамических прочностных характеристик, существенно зависящие от формы, длительности и интенсивности воздействия. В обобщенном виде критерий можно записать как:

$$\frac{1}{\tau} \int_{t-\tau}^t \left( \frac{F(t')}{F_{cr}} \right)^\alpha dt' \leq 1,$$

где  $F(t')$  – интенсивность локального силового поля, вызывающего разрушение среды;  $F_{cr}$  – статический предел локального силового поля;  $\tau$  – инкубационное время, зависящее от релаксационного процесса, подготавливающего разрыв. Время разрушения определяется при выполнении равенства в условии. Ударное деформирование имеет две важнейшие характеристики: уровень и скорость приложения нагрузки. Параметры критерия определяют реакцию среды на эти характеристики ввода энергии. Инкубационное время  $\tau$  характеризует чувствительность среды к скорости приложения нагрузки в указанной точке среды (или скорости деформирования), параметр

$\alpha$  – чувствительность к уровню (или амплитуде) напряженности локального силового поля, вызывающего разрушение. Часто хорошее соответствие критерия экспериментальным данным удается получить при значении  $\alpha = 1$ . В этом случае предельное условие можно рассматривать как условие введения за период  $\tau$  структурно-силового импульса, достаточного для разрушения элементарного объема материала.

В частных случаях разрушения критерий инкубационного времени имеет вид:  
– разрушение при сжатии

$$\frac{1}{\tau} \int_{t-\tau}^t \sigma(t') dt' \leq \sigma_{cr}^{comp},$$

где  $\sigma(t')$  – зависимость среднего сжимающего напряжения в образце от времени,  
 $\sigma_{cr}^{comp}$  – статическая прочность на сжатие;  
– разрушение при растяжении

$$\frac{1}{\tau} \int_{t-\tau}^t \sigma(t') dt' \leq \sigma_{cr}^{tens},$$

где  $\sigma(t')$  – зависимость растягивающего напряжения в центре образца от времени,  
 $\sigma_{cr}^{tens}$  – статическая прочность на разрыв.

Физически это означает, что разрушение в некоторой точке материала произойдет в момент времени  $t$ , если интеграл от напряжения по некоторому временному интервалу, предшествующему моменту  $t$  длительностью  $\tau$ , отнесенный к этой длительности, превысит некоторое пороговое значение  $\sigma_{cr}$ . Определенные по результатам экспериментальных исследований зависимости прочности и времени до разрушения позволяют определить параметры этого критерия, который достаточно хорошо описывает скоростную чувствительность хрупких сред при динамическом нагружении.

### Результаты испытаний

Проведен цикл динамических испытаний на раскалывание образцов магматической горной породы габбро-диабаз кубической формы с размером ребра  $\sim 20$  мм. Нагружение системы РСГ производилось стальным ударником длиной 150 мм, что позволило получить в нагружающем мерном стержне падающий импульс сжатия длительностью около 100 мкс. Путем вариации скорости ударника достигались разные амплитуды падающей волны, которые обеспечивали 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.

При динамических испытаниях образцов малодеформируемых хрупких сред необходимо обеспечить однородность напряженно-деформированного состояния. В отличие от пластичных металлов, хрупкие материалы имеют небольшие деформации разрушения ( $< 1\%$ ), и, следовательно, если загрузка происходит слишком быстро, как при обычном испытании SHPB, образец может начать разрушаться неравномерно (то есть лицевая сторона образца может быть разрушена, в то время как тыльная сторона остается еще неповрежденной). Должны быть удовлетворены условия постоянства скорости деформации и равновесия напряжений на торцах образца в течение большей части испытания. Чтобы выяснить, в какой степени выполняются

эти условия во время испытания, важно регистрировать временные зависимости импульсов деформации в обоих мерных стержнях [14, 15]. Время достижения равновесия на торцах образца в основном определяется скоростью роста нагружающей волны. Время прохождения, необходимое для того, чтобы передний фронт падающей волны проходил через образец один раз, определяется длиной образца и скоростью продольной волны в испытуемом материале  $t_0 = L_s/C_s$ . Было высказано предположение, что для достижения условия равенства напряжений время равновесия  $t_{eqil}$  должно быть в  $\pi$  раз [16] или по крайней мере в четыре раза [17] больше времени прохождения волны по образцу (например,  $L_s = 20$  мм,  $C_s \approx 5$  мм/мкс, следовательно,  $t_{eqil}$  в этом случае составляет около 20 мкс). Для испытания хрупких материалов (горных пород), которые имеют почти линейную зависимость диаграммы напряжение–деформация вплоть до разрушения, необходим недиспергирующий плавно нарастающий импульс в нагружающем стержне. Без правильного формирования падающего импульса трудно добиться динамического равновесия напряжений в таких материалах, потому что образец может начать разрушаться у его торца, контактирующего с нагружающим стержнем, после прихода падающей волны еще до достижения равновесия напряжения в теле образца [18]. Чтобы избежать этого, применяется технология формирования падающего импульса, которая предусматривает динамическое воздействие ударника по торцу нагружающего стержня через различные прокладки, смягчающие удар и уменьшающие крутизну фронта падающего импульса [19, 20]. Во время испытаний ударник воздействует на формирователь импульса перед нагружающим стержнем, создавая тем самым недисперсионный импульс, распространяющийся в нагружающий стержень. Этот падающий импульс с медленно нарастающим фронтом способствует динамическому балансу сил в образце [18]. В качестве формирователя использовалось кольцо из тонкой медной проволоки, размещенное на ударяемом торце нагружающего стержня.

Для получения достоверной информации о поведении образца горной породы при нагружении полученные 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).

На рис. 3 показаны импульсы деформации (падающий и отраженный в нагружающем стержне, а также прошедший в опорном стержне) после их синхронизации.

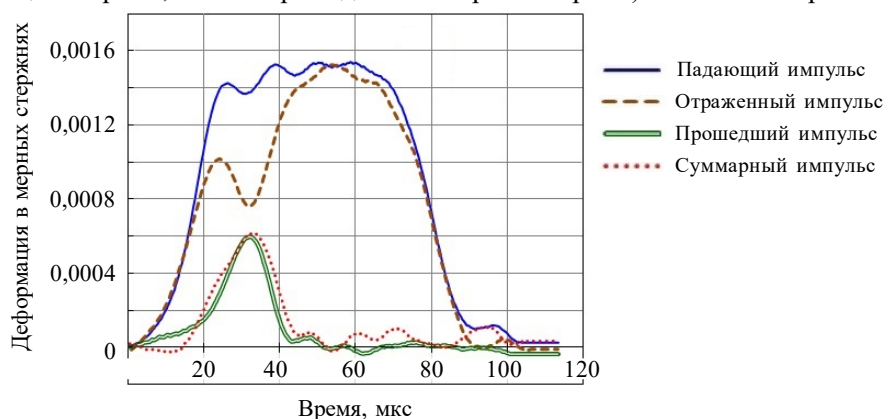


Рис. 3. Синхронизированные импульсы деформации в системе РСГ

Для удобства восприятия все импульсы показаны условно положительными. Хорошо видно, что при достижении пика напряжения в прошедшем импульсе (около 31 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 совпадение свидетельствует о правильной синхронизации зарегистрированных импульсов в обоих мерных стержнях. Хорошее согласование суммарного импульса  $\varepsilon^I(t) + \varepsilon^R(t)$  на границе образца, контактирующей с нагружающим стержнем, и импульса  $\varepsilon^T(t)$  на границе с опорным стержнем свидетельствует о выполнении основной предпосылки метода Кольского о равенстве сил на торцах образца и, следовательно, об однородном напряженно-деформированном состоянии в нем.

На рис. 4 представлена полученная по формуле (1) зависимость развития напряжения раскалывания образца, максимальная величина которой 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 в данном эксперименте.

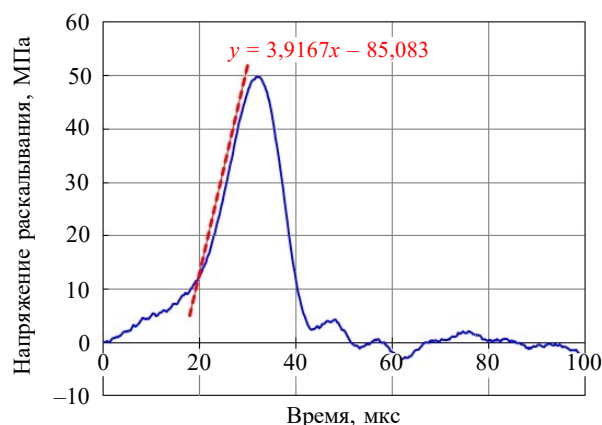


Рис. 4. Диаграмма раскалывания образца

В результате проведенного цикла испытаний образцов габбро-диабазы при различных скоростях ударника определена прочность на раскалывание и построена ее зависимость от скорости роста напряжений, которая приведена на рис. 5.

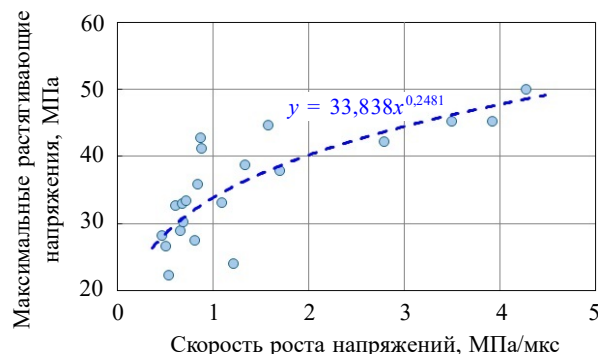


Рис. 5. Зависимость величины раскалывающих напряжений от скорости роста напряжений

Зависимость может быть аппроксимирована различными уравнениями, на рисунке показана степенная аппроксимация и приведено ее уравнение.

Можно отметить, что полученная зависимость соответствует известной тенденции повышения прочностных свойств горных пород при увеличении скорости деформации (при сжатии) или скорости роста напряжений (при раскалывании).

Важной характеристикой хрупких сред является инкубационное время «жизни» образца при приложении динамической нагрузки сжатия или растяжения. На участке активного роста напряжения в образце (на рис. 4) 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 позволила определить время до разрушения (время «жизни») образцов при различных скоростях ударника, нагружающего систему РСГ, и построить зависимость времени «жизни» материала от скорости роста напряжений (рис. 6).

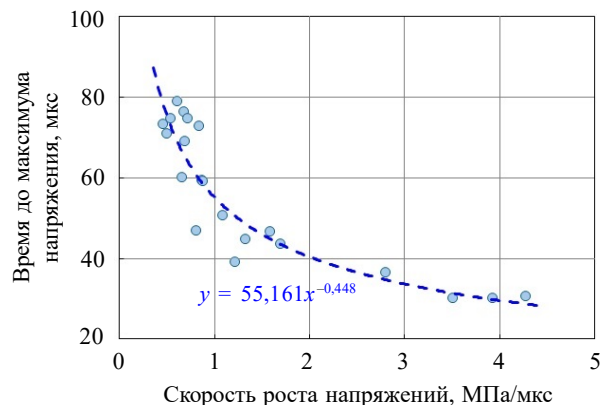


Рис. 6. Зависимость длительности «жизни» образца от скорости роста напряжений

Можно отметить соответствие полученных результатов известной тенденции уменьшения инкубационного времени с увеличением скорости роста напряжений. Полученные прочностные и временные параметры разрушения исследованного гранита позволяют определить параметры структурно-временного критерия Петрова – Морозова: структурную прочность при раскалывании и инкубационное время разрушения [21].

### Заключение

Реализована новая методика Кольского по исследованию прочностных свойств хрупких материалов (горных пород) при растяжении методом раскалывания. Полученные результаты по динамическому поведению гранитных образцов кубической формы при раскалывании с различными скоростями нагружения соответствуют известной тенденции повышения прочностных свойств горных пород при увеличении скорости деформации (при сжатии) или скорости роста напряжений (при раскалывании). Построенные зависимости прочности на раскалывание и времени до разрушения (инкубационное время «жизни») от скорости роста напряжений могут быть



использованы для оснащения структурно-временного критерия разрушения Морозова – Петрова.

#### Список литературы

1. Aadnøy B., Looyeh R. Chapter 9 – Rock strength and rock failure. *Petroleum Rock Mechanics: Drilling Operations and Well Design*. 2019. P. 145–163. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815903-3.00009-1>.
2. Брагов А.М., Ломунов А.К. *Использование метода Кольского для исследования процессов высокоскоростного деформирования материалов различной физической природы*. Н. Новгород: Изд-во ННГУ, 2017. 148 с.
3. 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. №2 (38). С. 9–17.
4. Гонов М.Е. Комплексное исследование свойств мелкозернистого бетона при динамическом растяжении и срезе. *Проблемы прочности и пластичности*. 2020. Т. 82. №4. С. 442–457. DOI: 10.32326/1814-9146-2020-82-4-442-457.
5. 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. Vol. 4. No C8. P. 8-101–8-106. <http://dx.doi.org/10.1051/jp4:1994815>.
6. Bieniawski Z.T., Hawkes I. ISRM Suggested methods for determining tensile strength of rock materials. Part 2: Suggested method for determining indirect tensile strength by the Brazil test. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 1978. Vol. 15(3). P. 99–103. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(78\)90003-7](https://doi.org/10.1016/0148-9062(78)90003-7).
7. Li D., Wong L.N.Y. The Brazilian disc test for rock mechanics applications: review and new insights. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2013. Vol. 46. P. 269–287. <https://doi.org/10.1007/s00603-012-0257-7>.
8. Klepaczko J.R., Brara A. An experimental method for dynamic tensile testing of concrete by spalling. *International Journal of Impact Engineering*. 2001. Vol. 25. Iss. 4. P. 387–409. [https://doi.org/10.1016/S0734-743X\(00\)00050-6](https://doi.org/10.1016/S0734-743X(00)00050-6).
9. Chai Q., Huang S., Wan F., Wu F., Feng L. A new experimental method to measure and calculate the tensile strength of concrete. *Frontiers in Materials*. 2023. Vol. 10. Article No 1216747. DOI: 10.3389/fmats.2023.1216747.
10. Тимошенко С.П. *Теория упругости*. М.: ОНТИ, Глав. ред. техн.-теорет. лит-ры, 1937. 451 с.
11. Брагов А.М., Игумнов Л.А., Ломунов А.К. *Высокоскоростная деформация мелкозернистого бетона и фибробетона*. Н. Новгород: Изд-во ННГУ, 2015. 269 с.
12. Morozov N., Petrov Y. *Dynamics of Fracture*. Berlin–Heidelberg–New York: Springer-Verlag, 2000. 98 p.
13. Petrov Y.V., Utkin A.A. Dependence of the dynamic strength on loading rate. *Material Science*. 1989. Vol. 25. No 2. P. 153–156. <http://rd.springer.com/article/10.1007/BF00780499>.
14. Foster J.T. Comments on the validity of test conditions for Kolsky bar testing of elastic-brittle materials. *Experimental Mechanics*. 2012. Vol. 52(9). P. 1559–1563. <https://doi.org/10.1007/s11340-012-9592-6>.
15. Yang L.M., Shim V.P.W. An analysis of stress uniformity in split Hopkinson bar test specimens. *International Journal of Impact Engineering*. 2005. Vol. 31. Iss. 2. P. 129–150. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2003.09.002.
16. Davies E.D.H., Hunter S.C. The dynamic compression testing of solids by the method of the split Hopkinson pressure bar. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 1963. Vol. 11. Iss. 3. P. 155–179. [https://doi.org/10.1016/0022-5096\(63\)90050-4](https://doi.org/10.1016/0022-5096(63)90050-4).
17. Ravichandran G., Subhash G. Critical appraisal of limiting strain rates for compression testing of ceramics in a split Hopkinson pressure bar. *The American Ceramic Society*. 1994. Vol. 77. Iss. 1. P. 263–267. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1994.tb06987.x>.
18. Frew D.J., Forrestal M.J., Chen W. A split Hopkinson pressure bar technique to deter-

mine compressive stress-strain data for rock materials. *Experimental Mechanics*. 2001. Vol. 41. P. 40–46. <https://doi.org/10.1007/BF02323102>.

19. Frantz C.E., Follansbee P.S., Wright W.J. New experimental techniques with the split Hopkinson pressure bar. In: *8th International Conference on High Energy Rate Fabrication*. San Antonio, Texas, USA. 1984. P. 17–21. DOI: 10.2172/6854600.

20. Брагов А.М., Ломунов А.К. Особенности построения диаграмм деформирования методом Кольского. *Прикладные проблемы прочности и пластичности. Алгоритмизация и автоматизация решения задач упругости и пластичности: Всесоюз. межвуз. сб. Горьк. ун-та*. 1984. С. 125–137.

21. 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. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2012.12.019.

### References

1. Aadnøy B., Looyeh R. Chapter 9 – Rock strength and rock failure. *Petroleum Rock Mechanics: Drilling Operations and Well Design*. 2019. P. 145–163. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815903-3.00009-1>.

2. Bragov A.M., Lomunov A.K. *Ispolzovanie metoda Kolskogo dlya issledovaniya protsessov vysokoskorostnogo deformirovaniya materialov razlichnoy fizicheskoy prirody [Use of the Kolsky Bar Method for Studying High-Rate Deformation Processes in Materials of Various Physical Natures]*. Nizhny Novgorod. NNGU Publ. 2017. 148 p. (In Russian).

3. 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 [Privolzhsky Scientific Journal]*. 2016. No 2 (38). P. 9–17 (In Russian).

4. Gonov M.E. Kompleksnoe issledovanie svoystv melkozernistogo betona pri dinamicheskom rastyazhenii i sreze [Comprehensive study of the properties of fine-grained under dynamic tension and shear]. *Problemy prochnosti i plastichnosti [Problems of Strength and Plasticity]*. 2020. Vol. 82. No 4. P. 442–457 (In Russian).

5. 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. Vol. 4. No C8. P. 8-101–8-106. <http://dx.doi.org/10.1051/jp4:1994815>.

6. Bieniawski Z.T., Hawkes I. ISRM 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.* 1978. Vol. 15(3). P. 99–103. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(78\)90003-7](https://doi.org/10.1016/0148-9062(78)90003-7).

7. Li D., Wong L.N.Y. The Brazilian disc test for rock mechanics applications: review and new insights. *Rock. Mech. Rock. Eng.* 2013. Vol. 46. P. 269–287. <https://doi.org/10.1007/s00603-012-0257-7>.

8. Klepaczko J.R., Brara A. An experimental method for dynamic tensile testing of concrete by spalling. *Int. J. Impact Eng.* 2001. Vol. 25. Iss. 4. P. 387–409. [https://doi.org/10.1016/S0734-743X\(00\)00050-6](https://doi.org/10.1016/S0734-743X(00)00050-6).

9. Chai Q., Huang S., Wan F., Wu F., Feng L. A new experimental method to measure and calculate the tensile strength of concrete. *Frontiers in Materials*. 2023. Vol. 10. Article No 1216747. DOI: 10.3389/fmats.2023.1216747.

10. Timoshenko S. *Theory of Elasticity*. London. New York. McGraw-Hill. 1934. 416 p.

11. Bragov A.M., Igumnov L.A., Lomunov A.K. *Vysokoskorostnaya deformatsiya melkozernistogo betona i fibrobeta [High-Speed Deformation of Fine-Grained Concrete and Fiber-Reinforced Concrete]*. Nizhny Novgorod. NNGU Publ. 2015. 269 p.

12. Morozov N., Petrov Y. *Dynamics of Fracture*. Berlin. Heidelberg. New York. Springer-Verlag. 2000. 98 p.

13. Petrov Y.V., Utkin A.A. Dependence of the dynamic strength on loading rate. *Material Science*. 1989. Vol. 25. No 2. P. 153–156. <http://rd.springer.com/article/10.1007/BF00780499>.

14. Foster J.T. Comments on the validity of test conditions for Kolsky bar testing of elastic-brittle materials. *Exp. Mech.* 2012. Vol. 52(9). P. 1559–1563. <https://doi.org/10.1007/s11340-012-9592-6>.
15. Yang L.M., Shim V.P.W. An analysis of stress uniformity in split Hopkinson bar test specimens. *Int. J. Impact Eng.* 2005. Vol. 31. Iss. 2. P. 129–150. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2003.09.002.
16. Davies E.D.H., Hunter S.C. The dynamic compression testing of solids by the method of the split Hopkinson pressure bar. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 1963. Vol. 11. Iss. 3. P. 155–179. [https://doi.org/10.1016/0022-5096\(63\)90050-4](https://doi.org/10.1016/0022-5096(63)90050-4).
17. Ravichandran G., Subhash G. Critical appraisal of limiting strain rates for compression testing of ceramics in a split Hopkinson pressure bar. *The American Ceramic Society*. 1994. Vol. 77. Iss. 1. P. 263–267. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1994.tb06987.x>.
18. Frew D.J., Forrestal M.J., Chen W. A split Hopkinson pressure bar technique to determine compressive stress-strain data for rock materials. *Exp. Mech.* 2001. Vol. 41. P. 40–46. <https://doi.org/10.1007/BF02323102>.
19. Frantz C.E., Follansbee P.S., Wright W.J. New experimental techniques with the split Hopkinson pressure bar. In: *8th International Conference on High Energy Rate Fabrication*. San Antonio, Texas, USA. 1984. P. 17–21. DOI: 10.2172/6854600.
20. Bragov A.M., Lomunov A.K. Osobennosti postroeniya diagramm deformirovaniya metodom Kolskogo [Features of constructing deformation diagrams using the Kolsky method]. *Prikladnye problemy prochnosti i plastichnosti. Algoritmizatsiya i avtomatizatsiya resheniya zadach uprugosti i plastichnosti: Vsesoyuznyy mezhvuzovskiy sbornik [Applied Problems of Strength and Plasticity. Algorithmization and Automation of Solving Problems of Elasticity and Plasticity: All-Union Interuniversity Collection]*. Gorky University. 1984. P. 125–137 (In Russian).
21. 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. *Eng. Fract. Mech.* 2013. Vol. 110. P. 477–488. DOI: 10.1016/j.engfrac-mech.2012.12.019.

## CONCEPT FOR STUDYING THE TENSILE STRENGTH OF ROCKS\*

**Bragov A.M., Konstantinov A.Yu., 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 2025/07/27*

An original modification of the Kolsky method for studying the dynamic strength of brittle media under tension by splitting a sample in the form of a cube or parallelepiped in the split Hopkinson pressure bar system has been developed and implemented. The setup includes a gas gun as a loading device and a set of steel measuring bars (loading and support) with a diameter of 20 mm made of high-strength steel, equipped with strain gauges for measuring elastic deformation pulses. The SHPB system was loaded with a 150 mm long steel striker, which made it possible to obtain a falling compression pulse with a duration of about 100  $\mu$ s in the loading measuring bar. By varying the striker velocity, different amplitudes of the incident wave were achieved, which provided different sample loading rates. To test brittle materials (rocks) that have a nearly linear stress-strain diagram dependence up to failure, a non-dispersive smoothly increasing pulse in the loading bar is required. In the work, a ring of thin copper wire

---

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

placed on the impact end of the loading bar was used as a former. A feature of the setup is that the pulsed compressive load is applied to the side surfaces of the sample through wedge-shaped attachments on the ends of the measuring bars. When loading a brittle material sample with a compression pulse, it splits along the plane of application of the dynamic compressive load. Since it is extremely difficult to measure the strain of the sample under tension in this type of testing, as a result of tests by measuring the pulse in the supporting measuring bar, only the dependence of the development of the compressive force  $P_c(t)$  acting in the sample is obtained. Then, the process of development of the tensile stress  $\sigma_t(t)$  in the sample is determined, the peak of which is the sought-after tensile strength of the rock.

A cycle of dynamic tests on splitting of igneous rock samples of gabbro-diabase of cubic shape with edge size of ~20 mm was carried out. Dependences of splitting strength and time to failure (time of “life”) on the rate of growth of stresses were constructed. The obtained dependences correspond to the known tendency of increasing strength properties and decreasing incubation time during destruction of rocks with increasing rate of growth of stresses and can be used for equipping the Morozov – Petrov structural-time criterion of fracture.

*Keywords:* dynamic strength, rocks, splitting, Kolsky method, mathematical model.