

УДК 539.375

EDN: MAEQMB DOI: 10.31429/vestnik-21-1-26-33

Влияние предварительной термической обработки на трещиностойкость горных пород

Л. А. Игушева  

Санкт-Петербургский государственный университет, Университетский пр., 28, Санкт-Петербург, 198504, Россия

✉ Игушева Людмила Александровна; ORCID 0000-0002-8252-9404; SPIN 9458-8932;
e-mail: igusheva15@gmail.com

Аннотация. Исследовано изменение динамической трещиностойкости гранита в результате действия предварительной термической обработки. На основе известных экспериментальных данных построены скоростные зависимости вязкости разрушения гранита, предварительно обработанного при температурах 25 °С, 100 °С, 250 °С, 450 °С, 600 °С и 850 °С. Для описания разрушения материала использован структурно-временной подход, базирующийся на понятии инкубационного времени. Показано, что с ростом скорости нагружения наблюдается увеличение вязкости разрушения для всех значений температуры. С ростом температуры динамическая вязкость разрушения уменьшается, а значение инкубационного времени увеличивается. Выявлен эффект инверсии трещиностойкости, состоящий в том, что гранит, обработанный при температуре 100 °С, обладает более высокой вязкостью разрушения при квазистатических нагрузках, однако легче разрушается при высокоскоростных воздействиях по сравнению с гранитом, обработанным при температуре 250 °С.

Ключевые слова: динамическая трещиностойкость, разрушение горных пород, гранит, инкубационное время, скорость нагружения.

Финансирование. Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Соглашение № 075-15-2022-1114 от 30 июня 2022 г.).

Цитирование: Игушева Л. А. Влияние предварительной термической обработки на трещиностойкость горных пород // Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества. 2024. Т. 21, № 1. С. 26–33. EDN: MAEQMB. DOI: 10.31429/vestnik-21-1-26-33

Поступила 10 февраля 2024 г. После доработки 5 марта 2024 г. Принято 11 марта 2024 г. Публикация 26 марта 2024 г.

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

© Автор(ы), 2024. Статья открытого доступа, распространяется по лицензии [Creative Commons Attribution 4.0 \(CC BY\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

The Preliminary Heat Treatment Influence on the Rock Fracture Toughness

L. A. Igusheva 

Saint Petersburg State University, Universitetsky Ave., 28, Saint Petersburg, 198504, Russia

✉ Liudmila A. Igusheva; ORCID 0000-0002-8252-9404; e-mail: igusheva15@gmail.com

Abstract. The change in the dynamic granite fracture toughness as a result of preliminary heat treatment studied. Based on known experimental data, the rate dependences of the fracture toughness of granite pre-treated at temperatures of 25 °C, 100 °C, 250 °C, 450 °C, 600 °C and 850 °C constructed. To describe the material fracture, the incubation time based approach used. With increase in the rate of stress intensity factor, an increase in fracture toughness observed for all temperature values. With increasing temperature, the dynamic fracture toughness decreases, and the incubation time increases. Granite processed at a temperature of 100 °C has higher fracture toughness under quasi-static loads, but more easily fracture under dynamic impacts compared to granite processed at a temperature of 250 °C.

Keywords: dynamic fracture toughness, rock fracture, granite, incubation time, loading rate.

Funding. This study was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Agreement No. 075-15-2022-1114 dated June 30, 2022).

Cite as: Igusheva, L. A., The preliminary heat treatment influence on the rock fracture toughness. *Ecological Bulletin of Research Centers of the Black Sea Economic Cooperation*, 2024, vol. 21, no. 1, pp. 26–33. DOI: 10.31429/vestnik-21-1-26-33

Received 10 February 2024. Revised 5 March 2024. Accepted 11 March 2024. Published 26 March 2024.

The author declare no competing interests.

© The Author(s), 2024. The article is open access, distributed under [Creative Commons Attribution 4.0 \(CC BY\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/) license.

Введение

В результате стремительного технического прогресса возводятся грандиозные конструкции, здания и сооружения, разрабатываются сложные механизмы, которые используются в разных средах: на суше, в воздухе, в воде. Прочность и надежность данных конструкций при эксплуатации играет важную роль, поскольку от этого зависит жизнь и безопасность людей. Непредвиденные разрушения различных сооружений могут привести не только к большому количеству человеческих жертв, но и к глобальным экологическим катастрофам. Примером такой катастрофы может служить разрушение в 2011 г. нескольких реакторов атомной электростанции «Фукусима-1», произошедшее вследствие землетрясения магнитудой 9 баллов [1]. В результате ядерной аварии были выброшены радиоактивные материалы, образовалась большая зараженная зона, множество людей лишились свои домов. Еще один недавний трагичный пример — сильнейшее землетрясение в Турции в 2023 году, которое привело к чрезвычайной ситуации и разрушению огромного количества зданий и сооружений [2].

При расчете прочности горных пород инженеры опираются на значения прочностей материалов, вычисленные для случая стандартного статического режима нагружения. В действительности, как показывает практика, разрушение материалов чаще происходит в результате действия интенсивных динамических нагрузок: взрывов, ударов, отколов, вызванных техногенными и природными воздействиями, наводнениями, землетрясениями, пожарами. Зачастую данные процессы сопровождаются действием высокими температур, поэтому изучение механизмов изменения динамической прочности и трещиностойкости материалов, предварительно подвергнутых термической обработке, является важнейшей задачей [3]. Необходима оценка возможности возникновения и распространения динамически неустойчивых разрушений, а также выявление взрывоопасных участков. Требуется учет температурно-скоростных характеристик механизма разрушения горных пород.

Эксперименты показывают, что реакция материалов на динамические нагрузки отличается от случая статического воздействия [4]. Согласно [5] применение классической теории механики разрушения для определения динамической вязкости разрушения не является корректным. При изменении длительности нагрузки, формы профиля нагружающего импульса, геометрии образца и способа приложения нагрузки меняются скоростные зависимости динамической трещиностойкости материала. Кроме того, воздействие различных внешних факторов, таких как гидростатическое давление [6], температура [3], оказывает значительное влияние на динамическую вязкость разрушения горных пород. Значение динамической вязкости разрушения зависит от истории нагружения, в то время как статическая вязкость разрушения считается постоянной величиной и характеристикой материала.

Структурно-временной подход, в котором для определения прочностных характеристик материалов предложен критерий инкубационного времени разрушения [7–10], позволяет рассчитывать трещиностойкость материалов для всего диапазона скоростных воздействий [11]. Кроме того, структурно-временной подход позволяет описывать эффекты, свойственные процессам динамического разрушения, например, нестабильное поведение скоростных зависимостей прочности.

В данной работе на основе критерия инкубационного времени разрушения анализируется зависимость динамической вязкости разрушения термически обработанного гранита от скорости изменения коэффициента интенсивности напряжений. Производится сравнение теоретических расчетов с уже известными экспериментальными данными. Показано, что для предсказания разрушения материала с учетом предварительной термической обработки достаточно двух характеристик материала: инкубационного времени и статической вязкости разрушения.

1. Критерий инкубационного времени разрушения

В настоящее время в литературе представлены экспериментальные работы, посвященные изучению разрушения материалов в широком диапазоне скоростных воздействий [4, 12, 13]. Проводятся эксперименты как для случая статического нагружения, так и при динамических нагрузках. В классической теории механики разрушения считалось, что предел прочности

является константой материала и не зависит от внешних нагрузок. В действительности оказалось, что механический отклик материалов на высокоскоростные нагрузки значительно отличается от случая статического нагружения [14]. Классические критерии разрушения, такие как критерий максимального напряжения для разрушения бездефектных сред и критерий трещиностойкости Ирвина для среды с трещинами, широко используемые для предсказания разрушения при статических и квазистатических нагрузках, не позволяли описать эффекты, наблюдаемые при ударных воздействиях [15]. Отличительными особенностями динамического разрушения являются экспериментально подтвержденные зависимость предельных значений параметров разрушения от вида и формы приложенной нагрузки [16], а также эффект «задержки» разрушения [17], при котором разрушение происходит после достижения в образце максимального значения напряжения, а не при пиковой нагрузке. На прочность материала оказывают влияние характеристики прикладываемой к образцу нагрузки: скорость нагружения, амплитуда, длительность импульса, а также другие дополнительные внешние факторы: температура, давление, влагонасыщенность.

Для предсказания разрушения материалов при действии как статических, так и высокоскоростных нагрузок был предложен структурно-временной подход [7–10]. В рамках данного подхода вводится фундаментальное понятие — инкубационное время разрушения, которое связано с подготовительными релаксационными процессами, происходящими в материале, предшествующими макроразрушению. Инкубационное время является константой материала, характеризующей реакцию материала на динамические воздействия. Способ приложения нагрузки, форма импульса, геометрия образца не влияют на значения инкубационного времени [15].

Основным инструментом структурно-временного подхода является критерий инкубационного времени разрушения [7–10], используемый для предсказания разрушения материала. В общем виде критерий записывается следующим условием

$$\frac{1}{\tau} \int_{t-\tau}^t \left(\frac{F(t')}{F_c} \right)^\alpha dt' \leq 1, \quad (1.1)$$

где $F(t)$ — интенсивность локального силового поля; F_c — предел локального силового поля для случая статического нагружения; τ — инкубационное время. Время разрушения t_* определяется как момент, в который в условии (1.1) выполняется знак равенства. Параметр α — характеризует чувствительность к уровню напряженности силового поля, вызывающего разрушение. При рассмотрении задачи в упругой постановке $\alpha = 1$.

Критерий разрушения (1.1) позволяет учитывать тот факт, что разрушение в материале происходит не мгновенно, а является процессом, протекающим во времени. Макроскопическому разрушению материала и для статических, и для динамических внешних воздействий предшествует инкубационный период, являющийся важным фактором процесса разрушения, наличием которого объясняются специфические эффекты, наблюдаемые при быстрых, ударных нагрузках, например, зависимость прочности от скорости деформации. В структурно-временном подходе вводится свойство материала — инкубационное время, характеризующее отклик на динамические нагрузки. Инкубационное время материала может быть определено экспериментально.

Преимуществом критерия инкубационного времени разрушения является тот факт, что он справедлив как для динамических, так и для статических нагрузок. При статических воздействиях критерий (1.1) принимает вид классического критерия прочности.

В структурно-временной теории инкубационное время считается прочностной характеристикой материала при динамических процессах. Время инкубации характеризует реакцию материала на динамические нагрузки, а именно длительность неявных процессов развития микродефектов в материале, предшествующих разрушению на макроуровне. Структурно-временная теория позволяет описывать процессы разрушения в широком спектре динамических задач, в том числе и для задач распространения трещин [11].

2. Динамическая вязкость разрушения гранита

Критерий инкубационного времени разрушения для определения динамической вязкости разрушения принимает вид [11]

$$\frac{1}{\tau} \int_{t-\tau}^t K_I(t') dt' \leq K_{Ic}, \quad (2.1)$$

где K_{Ic} — статический коэффициент интенсивности напряжений моды I разрушения, τ — инкубационное время разрушения при предельном условии на вязкость разрушения.

Коэффициент интенсивности напряжений K_{Ic} при статическом внешнем воздействии является характеристикой материала, эта величина определяет количество энергии, необходимое для возникновения новых поверхностей в материале. В статическом случае, если в области разрушения коэффициент интенсивности напряжений достигает значения K_{Ic} , то начинается распространение трещины. Трещина продвигается в материале до тех пор, пока значение K_I не станет меньше K_{Ic} [18]. Выполнение равенства в выражении (2.1) определяет условие инициирования продвижения трещины в среде с трещиной.

В данной работе использованы экспериментальные результаты [3] по динамическому разрушению полукруглого образца гранита с надрезом (рис. 1а). В статье [3] рассматривается изменение скоростной зависимости динамической вязкости разрушения при растяжении гранита в результате предварительного воздействия температуры. Разрушение гранита происходит по моде I с использованием системы разрезных стержней Гопкинсона. В работе [3] для подготовки к динамическим испытаниям сначала образцы постепенно нагревали до фиксированной температуры, затем некоторое время температура поддерживалась постоянной для равномерного прогрева образцов. После этого образцы остужались в естественных условиях при комнатной температуре (25°) до комнатной температуры 25°. Далее данные образцы подвергались динамическим воздействиям с разными скоростями нагружения. Динамический коэффициент интенсивности напряжений моды I разрушения определялся как максимальное значение коэффициента интенсивности напряжений в образце. В данных экспериментах существует временной диапазон, на котором внешняя сила воздействия изменялась по линейному закону. Таким образом, для расчетов в данной работе предполагается, что внешняя сила может быть определена формулой $P(t) = \dot{P}tH(t)$, где \dot{P} — скорость возрастания силы, $H(t)$ — функция Хевисайда.

Для экспериментов на трехточечный изгиб полукруглого образца с надрезом коэффициент интенсивности напряжений линейно зависит от внешней динамической силы, действующей

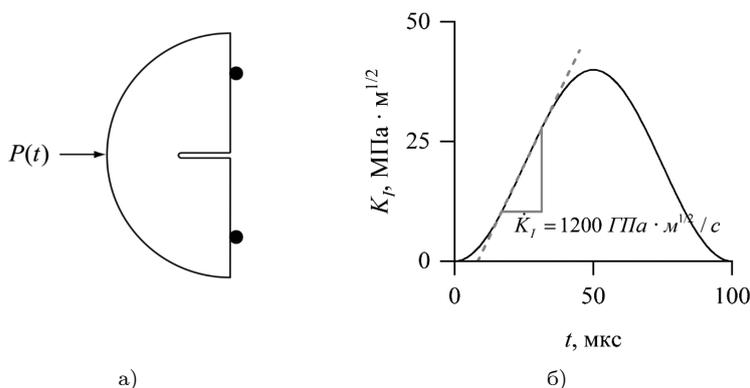


Рис. 1. Схема эксперимента для определения вязкости разрушения (а), определение скорости изменения коэффициента интенсивности напряжений (б)

Fig. 1. Scheme of experiment for determining fracture toughness (a), determining the rate of change of the stress intensity factor (b)

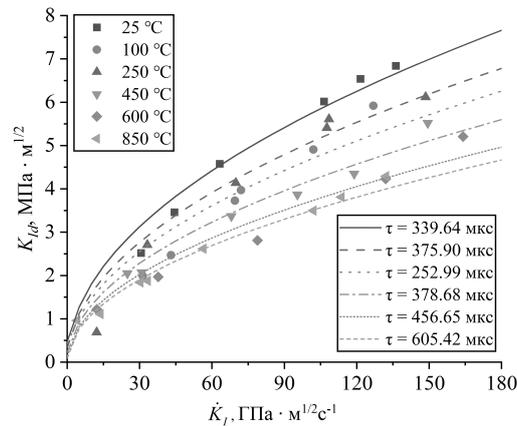


Рис. 2. Скоростные зависимости динамической вязкости разрушения для гранита, рассчитанные при различных температурах, экспериментальные данные [3]

Fig. 2. Rate dependences of dynamic fracture toughness for granite, calculated at different temperatures, experimental data [3]

на образец [19]. Коэффициент пропорциональности зависит от геометрии образца и расстояния между опорными штифтами. Соответственно для расчетов, учитывая выражения динамической силы, зависимость коэффициента интенсивности напряжений принимает вид $K_I(t) = \dot{K}_I t H(t)$, где \dot{K}_I — скорость изменения коэффициента интенсивности напряжений.

Скорость изменения коэффициента интенсивности напряжений определяется как тангенс угла наклона касательной к графику изменения во времени коэффициента интенсивности напряжений (рис. 16).

Применяя критерий инкубационного времени разрушения (2.1) для нахождения зависимостей динамического коэффициента интенсивности напряжений K_{Id} от скорости вязкости разрушения \dot{K}_I , получаем следующее выражение:

$$K_{Id}(\dot{K}_I) = \begin{cases} K_{Ic} + \frac{\tau}{2} \dot{K}_I, & \frac{K_{Ic}}{\dot{K}_I} \geq \frac{\tau}{2}, \\ \sqrt{2K_{Ic}\tau\dot{K}_I}, & \frac{K_{Ic}}{\dot{K}_I} < \frac{\tau}{2}. \end{cases} \quad (2.2)$$

Для построения теоретических зависимостей (2.2) инкубационное время оценивается методом наименьших квадратов по экспериментальным результатам [3]. Значения статической вязкости разрушения после предварительной обработки различными температурами были изучены в работе [20]. Было показано, что статическая вязкость разрушения уменьшается с увеличением температуры. Основываясь на экспериментальных данных [20], значения статической вязкости разрушения гранита при температурах предварительной обработки 25°, 100°, 250°, 450°, 600°, 850° равнялись 0,482 МПа·м^{1/2}, 0,434 МПа·м^{1/2}, 0,3376 МПа·м^{1/2}, 0,2272 МПа·м^{1/2}, 0,1488 МПа·м^{1/2} и 0,1036 МПа·м^{1/2} соответственно.

Зависимости динамической вязкости разрушения от скорости изменения коэффициента интенсивности напряжений (2.2), построенные на основе экспериментальных данных [3], показаны на рис. 2. Экспериментальные данные [3] получены при испытаниях образцов гранита на трехточечный изгиб при предварительном нагреве образцов до температуры 25°, 100°, 250°, 450°, 600°, 850°.

Наблюдается качественное соответствие экспериментальных данных с расчетными кривыми (2.2). При увеличении скорости изменения коэффициента интенсивности напряжений для всех значений температур происходит рост динамической вязкости разрушения, причем чем выше температура, тем увеличение динамической вязкости при возрастании скорости нагружения становится меньше. При увеличении температуры нагревания наблюдается небольшое

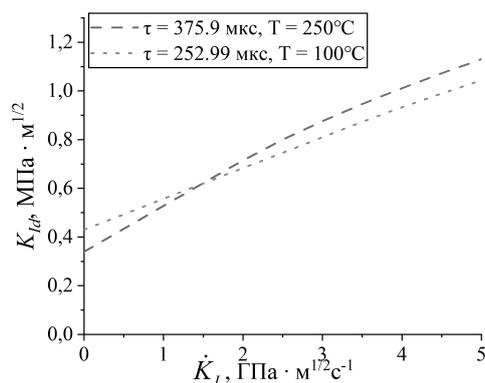


Рис. 3. Инверсия кривых динамической вязкости разрушения гранита

Fig. 3. Inversion of dynamic fracture toughness curves of granite

снижение динамической вязкости разрушения, причем чем больше скорость нагружения, тем заметнее становится влияние температуры.

Благодаря хорошему соответствию теоретического расчета экспериментальным данным, можно сделать вывод о возможности применения критерия инкубационного времени для описания процессов динамического разрушения. Таким образом, для описания скоростных зависимостей вязкости разрушения при различных температурах достаточно двух параметров: статическая вязкость разрушения и инкубационное время. Результаты расчета показывают, что с увеличением температуры предварительной обработки значение инкубационного времени в среднем возрастает.

3. Инверсия трещиностойкости

Согласно теоретическим расчетам (2.2), сделанным на основе экспериментальных данных [3], получается, что кривые скоростных зависимостей вязкости разрушения гранита, предварительно обработанного при температурах 100° и 250°, пересекаются при скорости нагружения равной 1,46449 ГПа · м^{1/2} · с⁻¹ (рис. 3). Из этого можно сделать вывод, что при медленных нагрузках наибольшей вязкостью разрушения обладает гранит, обработанный при температуре 100°, а при высокоскоростных нагрузках — гранит, обработанный при температуре 250°, т. е. наблюдается инверсия трещиностойкости.

Данный пример показывает, что при расчетах трещиностойкости материалов нельзя ориентироваться только на значения статической вязкости разрушения, необходимо учитывать реакцию материала на динамические нагрузки. Критерий инкубационного времени (1.1) может быть использован для этих целей, поскольку он позволяет описать высокоскоростное разрушение материала.

Заключение

Произведено исследование изменения динамической трещиностойкости гранита в результате действия предварительной термической обработки. Для определения начала разрушения использован критерий инкубационного времени разрушения. Построены скоростные зависимости динамической вязкости разрушения гранита с учетом влияния предварительного воздействия температуры. Показано снижение прочностных свойств гранита, а именно трещиностойкости с ростом температуры. Инкубационное время в среднем увеличивается при возрастании температуры. Обсуждается эффект инверсии трещиностойкости материала при переходе от медленных нагружений к высокоскоростным.

Показано, что для описания процессов разрушения достаточно двух параметров материала, предлагаемых в структурно-временном подходе, а именно инкубационного времени и статической вязкости разрушения. Полученные результаты показывают эффективность

структурно-временного подхода для прогнозирования скоростных и температурных эффектов динамического разрушения гранита.

Литература [References]

1. Арутюнян, Р.В., Большов, Л.А., Припачкин, Д.А., Семенов, В.Н., Сороковикова, О.С., Фокин, А.Л., Смирнова, М.М., Оценка выброса радионуклидов при аварии на АЭС «Фукусима-1» (Япония) 15 марта 2011 г. *Атомная энергия*, 2012, т. 112, № 3, с. 159–163. [Arutyunyan, R.V., Bolshov, L.A., Pripachkin, D.A., Semenov, V.N., Sorokovikova, O.S., Fokin, A.L., Smirnova, M.M., Assessment release of radionuclides during the accident at the Fukushima-1 nuclear power plant (Japan) March 15, 2011. *Atomnaya energiya = Atomic Energy*, 2012, vol. 112, no. 3, pp. 159–163. (in Russian)]
2. Свалова, В.Б., Землетрясения в Турции и Сирии 2023 года и геодинамика Кавказско-Анатолийского региона. *Известия высших учебных заведений. Геология и разведка*, 2023, № 3, с. 28–41. [Svalova, V.B., Earthquakes in Turkey and Syria in 2023 and the geodynamics of the Caucasus-Anatolian region. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenij. Geologiya i razvedka = Proc. of higher educational establishments. Geology and Exploration*, 2023, no. 3, pp. 28–41. (in Russian)]
3. Yin, T., Li, X., Xia, K., Huang, S., Effect of thermal treatment on the dynamic fracture toughness of Laurentian granite. *Rock mechanics and rock engineering*, 2012, vol. 45, pp. 1087–1094. DOI: [10.1007/s00603-012-0240-3](https://doi.org/10.1007/s00603-012-0240-3)
4. Zhang, Q.B., Zhao, J., Quasi-static and dynamic fracture behaviour of rock materials: phenomena and mechanisms. *International Journal of Fracture*, 2014, vol. 189, pp. 1–32. DOI: [10.1007/s10704-014-9959-z](https://doi.org/10.1007/s10704-014-9959-z)
5. Kazarinov, N.A., Petrov, Y.V., Cherkasov, A.V., Instability effects of the dynamic crack propagation process. *Engineering Fracture Mechanics*, 2021, vol. 242, p. 107438. DOI: [10.1016/j.engfracmech.2020.107438](https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2020.107438)
6. Yao, W., Xia, K., Zhang, T., Dynamic fracture test of Laurentian granite subjected to hydrostatic pressure. *Experimental Mechanics*, 2019, vol. 59, pp. 245–250. DOI: [10.1007/s11340-018-00437-4](https://doi.org/10.1007/s11340-018-00437-4)
7. Petrov, Y.V., On “quantum” nature of dynamic fracture of brittle solids. *Doklady Akademii nauk SSSR*, 1991, vol. 321, iss. 1, pp. 66–68.
8. Petrov, Y.V., Quantum analogy in the mechanics of fracture of solids. *Physics of the Solid State*, 1996, vol. 38, iss. 11, pp. 1846–1850.
9. Petrov, Y.V., Utkin, A.A., Dependence of the dynamic strength on loading rate. *Soviet Materials Science*, 1989, vol. 25, iss. 2, pp. 153–156.
10. Petrov, Y.V., Morozov, N.F., On the modeling of fracture of brittle solids. *ASME Journal of Applied Mechanics*, 1994, vol. 61, pp. 710–712.
11. Petrov, Y.V., Karihaloo, B.L., Bratov, V.V., Bragov, A.M., Multi-scale dynamic fracture model for quasi-brittle materials. *Int. J. of Engineering Science*, 2012, vol. 61, pp. 3–9. DOI: [10.1016/j.ijengsci.2012.06.004](https://doi.org/10.1016/j.ijengsci.2012.06.004)
12. Goldsmith, W., Sackman, J.L., Ewerts, C., Static and dynamic fracture strength of Barre granite. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1976, vol. 13, iss. 11, pp. 303–309. DOI: [10.1016/0148-9062\(76\)91829-5](https://doi.org/10.1016/0148-9062(76)91829-5)
13. Zhang, Z.X., Kou, S.Q., Yu, J.H., Yu, Y., Jiang, L.G., Lindqvist, P.A., Effects of loading rate on rock fracture. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1999, vol. 36, iss. 5, pp. 597–611. DOI: [10.1016/S0148-9062\(99\)00031-5](https://doi.org/10.1016/S0148-9062(99)00031-5)
14. Morozov, N.F., Petrov, Y.V., Incubation time based testing of materials. *European J. of Mechanics – A/Solids*, 2006, vol. 25, pp. 670–676. DOI: [10.1016/j.euromechsol.2006.05.005](https://doi.org/10.1016/j.euromechsol.2006.05.005)
15. Smirnov, V., Petrov, Y.V., Bratov V., Incubation time approach in rock fracture dynamics. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 2012, vol. 55, pp. 78–85. DOI: [10.1007/s11433-011-4579-3](https://doi.org/10.1007/s11433-011-4579-3)
16. Златин, Н.А., Мочалов, С.М., Пугачев, Г.С., Брагов, А.М., Временные закономерности процесса разрушения металлов при интенсивных нагрузках. *Физика твердого тела*, 1974, т. 16, № 6, с. 1752–1755. [Zlatin, N.A., Mochalov, S.M., Pugachev, G.S., Bragov, A.M., Temporal patterns of the process of metals fracture under intense loads. *Fizika tverdogo tela = Physics of Solid State*, 1974, vol. 16, no. 6, pp. 1752–1755. (in Russian)]
17. Homma, H., Shockey, D.A., Murayama, Y., Response of cracks in structural materials to short pulse loads. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 1983, vol. 31, iss. 3, pp. 261–279. DOI: [10.1016/0022-5096\(83\)90026-1](https://doi.org/10.1016/0022-5096(83)90026-1)

18. Guo, H, Aziz, N.I., Schmidt, L.C., Rock fracture-toughness determination by the Brazilian test. *Engineering Geology*, 1993, vol. 33, pp. 177–188. DOI: [10.1016/0013-7952\(93\)90056-I](https://doi.org/10.1016/0013-7952(93)90056-I)
19. Lim, I.L., Johnston, I.W., Choi, S.K., Stress intensity factors for semi-circular specimens under three-point bending. *Engineering Fracture Mechanics*, 1993, vol. 44, iss. 3, pp. 363–382. DOI: [10.1016/0013-7944\(93\)90030-V](https://doi.org/10.1016/0013-7944(93)90030-V)
20. Kang, P., Hong, L., Fazhi, Y., Quanle, Z., Xiao, S., Zhaopeng, L., Effects of temperature on mechanical properties of granite under different fracture modes. *Engineering Fracture Mechanics*, 2020, vol. 226, p. 106838. DOI: [10.1016/j.engfracmech.2019.106838](https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2019.106838)