

ИЗМЕНЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ УМЕРЕННОМ ТЕПЛОВОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

В.А. Винников¹, И.А. Павлов¹

¹ Университет науки и технологий МИСИС, Москва, Россия, e-mail: 3.14alekseevich@gmail.com

Аннотация: Приведены результаты лабораторных испытаний определения коэффициента трещиностойкости горных пород различных генотипов при умеренном (до 100 °С) тепловом воздействии. Испытания проводились на образцах гранита, известняка и мрамора с различной крупностью зерен. Для этих целей были подготовлены образцы в виде балок длиной 90 мм (L), шириной 20 мм (b) и толщиной 10 мм (t), отклонение от параллельности граней образца не превышало 0,5% соответствующего линейного размера образца с пропилом глубиной 7 мм (h) и толщиной не более 1,2 мм (e) в средней части, имитирующим краевую трещину. После всех этапов подготовки образцы проходили контроль на наличие внутренних дефектов с помощью ультразвуковой дефектоскопии. В ходе исследования была сконструирована установка, позволяющая производить нагрев образцов непосредственно во время их испытания на трехточечный изгиб. При температурах от 20 до 80 °С отслеживалось изменение критического коэффициента интенсивности напряжений K_{IC} (коэффициента трещиностойкости) – силовой характеристики трещиностойкости материала. В исследованиях не учитывались результаты, полученные при испытании образцов, плоскость магистральной трещины которых отклонялась от плоскости пропила на 2 мм и более. Также не учитывались результаты, отклоняющиеся от среднего арифметического на 30%. Исследования воздействия теплового поля на способность образцов сопротивляться росту трещин показали снижение этой способности с повышением температуры для всех исследуемых горных пород.

Ключевые слова: прочностные характеристики, разрушение, вязкость разрушения, трещина нормального отрыва, коэффициент трещиностойкости, умеренное тепловое воздействие, изгиб, трехточечный изгиб, горные породы.

Для цитирования: Винников В. А., Павлов И. А. Изменение коэффициента трещиностойкости горных пород при умеренном тепловом воздействии // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2024. – № 3. – С. 5–16. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_3_0_5.

Change in fracture toughness of rocks under moderate thermal effect

V.A. Vinnikov¹, I.A. Pavlov¹

¹ University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russia, e-mail: 3.14alekseevich@gmail.com

Abstract: The article describes the laboratory-scale test data on fracture toughness of different genotype rocks under moderate thermal effect (to 100 °C). Samples of granite, limestone and marble with different size grains were tested. The samples were manufactured as beams with a length of 90 mm (L), width of 20 mm (b) and thickness of 10 mm (t); the parallel misalign-

ment of the faces of the samples was not higher than 0.5% of the fitting linear size of a sample; the samples had a saw cut with a depth of 7 mm (h) and width not more than 1.2 mm (e) to simulate an edge crack in the middle of a sample. After all preparation stages, the samples were examined using ultrasonic defectoscopy to detect internal defects. The purpose-designed plant allowed heating of the test samples during three-point flexural tests. At the temperature from 20 to 80 °C, it was traced how the critical stress intensity factor (fracture toughness)—the characteristic of the fracture strength of materials—changed. The studies neglected the test results if the plane of the main crack in the samples deviated from the plane of the saw cut by 2 mm and more. For another thing, the results deviated from the arithmetic average by 30% were discarded as well. The investigation of the thermal field influence on the ability of samples to resist crack growth exhibited the decrease in this ability with the increasing temperature in all samples of all test types of rocks.

Key words: strength characteristics, fracture, fracture toughness, normal tension crack, fracture toughness coefficient, moderate thermal effect, bending, three-point flexure, rocks.

For citation: Vinnikov V. A., Pavlov I. A. Change in fracture toughness of rocks under moderate thermal effect. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2024;(3):5-16. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_3_0_5.

Введение

Происходящее в последнее время технологическое совершенствование процессов добычи полезных ископаемых дает возможность осуществлять деятельность во все более осложняющихся горно-геологических условиях. Ключевым процессом добычи и переработки полезных ископаемых является разрушение горных пород. Механизм разрушения вне зависимости от его технического исполнения неизменен — зарождение и развитие трещин. Характеристикой локального разрушения является количество необходимой энергии для реализации процесса разрушения, напрямую зависящее от величины удельной поверхностной энергии. Данная энергетическая константа была включена в аналитические расчеты в соответствии с формулой А.А. Гриффитса, но не нашла широкого применения в практике по причине существенного отличия от экспериментально определяемых величин. Позже Дж. Ирвин и Е. Орован установили, что одной из причин такого расхождения аналитических рас-

четов с практическими является пренебрежение вязкостью (пластичностью) материала горных пород [1].

Так, в инженерных задачах, связанных с расчетом и моделированием напряженно-деформированного состояния массива, моделированием гидравлического разрыва пласта, необходимо учитывать макро- и микротрещины, а также способность материала сопротивляться их зарождению и развитию. Использование современного программного обеспечения для моделирования вышеописанных процессов на сегодняшний день является неотъемлемой частью основных геотехнических мероприятий, а также позволяет обосновать выбор параметров для эффективного осуществления горных работ внедрения новых технологий осуществления горных работ [2]. Неправильная оценка НДС может привести к дорогостоящим авариям [3] и гибели людей, по этой причине в настоящее время особую важность имеет развитие в данном сегменте отечественного продукта [4]. Расчет НДС в подобных пакетах программного обес-

печения основывается на механике трещин, одной из характеристик которой является значение коэффициента трещиностойкости. Помимо прочего, учет величины такой прочностной характеристики позволит более точно прогнозировать геомеханическое состояние массивов горных пород при проведении в них взрывных работ, может способствовать снижению рисков плохой взрывной проработки массивов, что приведет к более рациональному расходу взрывчатых веществ, а значит, уменьшению издержек. Коэффициент трещиностойкости широко используется для описания процесса разрушения квазихрупких материалов [5].

В настоящее время отечественные стандарты с описанием методики определения коэффициента трещиностойкости K_{IC} горных пород отсутствуют. В то же время параметр K_{IC} входит практически во все сервисные пакеты моделирования. Как правило, значение параметра принимают по умолчанию $1 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{0.5}$ [6].

На сегодняшний день вопрос влияния температурного воздействия на способность горных пород сопротивляться росту трещин при действии на них механической нагрузки в научной литературе освещен мало. В основном работы посвящены изучению процессов температурного выветривания. Так, в одной из работ авторы исследуют изменение проницаемости гранита с разными размерами зерен после процессов термического растрескивания [7]. Этот фактор имеет ключевое значение при строительстве подземных резервуаров. Факт линейной корреляции вязкости разрушения и степени предварительно оказанных термических воздействий на примере различных горных пород подтверждается научными трудами [8–10]. Более того, эмпирические данные говорят об изменчивости такой корреляции.

При испытаниях образцов песчаника методом трехточечного изгиба вязкость разрушения с повышением температуры предварительного нагрева от 20 до 400 °С повышалась, однако при дальнейшем увеличении температуры предварительного нагрева от 400 до 800 °С показатель постепенно снижался [11].

Методы определения коэффициента трещиностойкости

В условиях отсутствия нормативной документации по определению K_{IC} горных пород существует возможность либо адаптации государственных стандартов, разработанных для других материалов (например, металлов), либо использования рекомендаций международных научных сообществ, одним из которых является Международное общество по механике горных пород (ISRM). ISRM были выделены несколько методов с целью унификации результатов измерения. В 1988 г. были опубликованы следующие два метода: первый предполагает изгиб цилиндрического керна с пропилом V-образной формы перпендикулярно оси цилиндра, другой — раскрытие специальными захватами короткого цилиндра с V-образным пропилом вдоль оси керна [12]. В 1995 г. был предложен метод, сущность которого заключается в сжатии цилиндрического образца с V-образным пропилом [13]. Четвертый метод, разработанный в 2013 г., предполагает изгиб полукруглых образцов с пропилом [14]. Помимо рекомендованных ISRM методов, в разное время было предложено множество способов определения статического коэффициента трещиностойкости, также в этих целях используются и стандартные методики для металлов и керамики [15]. В отечественной нормативной документации существуют методики для определения коэффициента трещиностойкости K_{IC} бетона и металла. Государ-

ственный стандарт для бетона предполагает изготовление образцов в виде прямоугольного параллелепипеда с квадратным поперечным сечением и пропилами с двух сторон перпендикулярно оси образца с последующим нагружением образцов по трехточечной схеме согласно ГОСТ 29167-91. Для поиска значений коэффициента трещиностойкости у металлов изготавливают образцы в виде прямоугольного параллелепипеда с пропилом, имитирующим трещину, с одной стороны, поперечным сечением в виде прямоугольника, предполагается также трехточечная схема нагрузки образца согласно ГОСТ 25.506.85. Последняя экспериментальная схема основана на подходах линейной механики упругого разрушения, что используется при моделировании разрушения металлических, керамических и других

материалов, в том числе и горных пород [16]. Стоит также отметить, что в последнее время испытания на трехточечный изгиб широко используются и в целях косвенного определения прочности на растяжение или стойкость к изгибу, создаются новые приспособления для реализации таких исследований [5, 17–19].

Каждый из вышеописанных способов не только подразумевает особые требования к условиям подготовки и геометрическим параметрам образцов, но и предполагает разработку соответствующего оборудования для реализации исследований.

Образцы

В проведенных исследованиях использовались образцы магматических, метаморфических и осадочных пород,

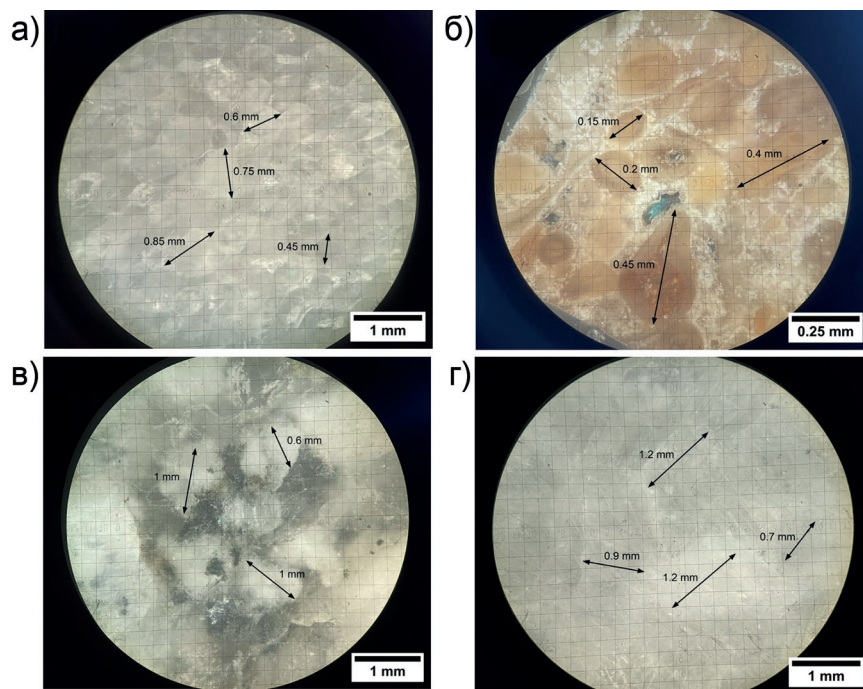


Рис. 1. Изображения шлифов с нанесенным масштабом и размером зерен: серый мрамор (среднезернистый) (а); известняк (б); гранит (в); серый мрамор (крупнозернистый) (г)

Fig. 1. Images of polished sections with scale and grain size applied: gray marble (medium-grained) (a); limestone (b); granite (v); gray marble (coarse-grained) (g)

а именно: гранит (Топское месторождение, Украина), известняк (месторождение Сарыташ, Кыргызстан), а также два вида серого мрамора с различным размером зерен (среднезернистый Уфалейского месторождения, Челябинская область, и крупнозернистый Полевского месторождения, Свердловская область).

Выбор образцов связан, в первую очередь, с морфологическими особенностями горных пород. Особую важность имеет структура горных пород, а именно размер зерен минералов, слагающих породу, а также пористость. Так, минимальный характерный размер образца, удовлетворяющий стандарту ISRM [14], должен быть соотнесен со средним размером зерен в породе в соотношении не менее 1:10.

Для обоснования выбора геометрии образцов необходимо иметь данные о крупности зерен в представленных материалах. В этих целях были подготовлены аншлифы для последующего определения размеров зерен на микроскопе Neophot-32. Изображение зерен, а также их характерные размеры представлены на рис. 1.

Исследования показали, что средний размер зерен образцов для каждого материала составил: мрамор серый среднезернистый 0,67 мм; гранит 0,86 мм; известняк 0,3 мм; мрамор серый крупнозернистый 0,95 мм. Таким образом, средний размер зерен ни для одного из

материалов не превысил 1 мм. Такого размера зерен достаточно, чтобы использовать методику подготовки образцов согласно ГОСТ 25.506.85, так как средний размер зерен каждого материала более чем в 10 раз уступает наименьшему геометрическому параметру образца, подготовленного согласно рекомендациям указанного ГОСТа. Выполнение этого соотношения дает право утверждать, что подготовленные по данной методике образцы отражают механические свойства материала в целом. Данный метод предполагает трехточечный изгиб балки прямоугольного сечения с надпиллом, имитирующим краевую трещину, S3PB1 (рис. 2).

Из подготовленных заготовок (плит) были выпилены плоские прямоугольные образцы длиной 90 мм (L), шириной 20 мм (b) и толщиной 10 мм (t), отклонение от параллельности граней образца не превышало 0,5% соответствующего линейного размера образца. В центре каждого образца делался пропил глубиной 7 мм (h) и толщиной не более 1,2 мм (e), имитирующий краевую трещину, для испытаний на трехточечный изгиб (рис. 2). Была изготовлена партия из 144 образцов по требованиям ГОСТ 25.506.85 (рис. 3). На рис. 4 представлен вид помещенного в держатели образца, расположенного надпиллом вверх.

В процессе механического воздействия на образцы при их изготовлении в

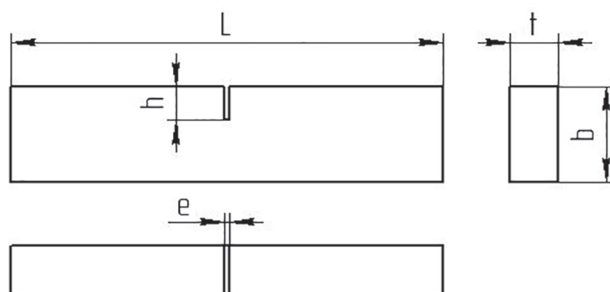


Рис. 2. Геометрия образца

Fig. 2. Sample geometry



Рис. 3. Подготовленные в соответствии с ГОСТ 25.506.85 образцы

Fig. 3. Samples prepared according to GOST 25.506.85

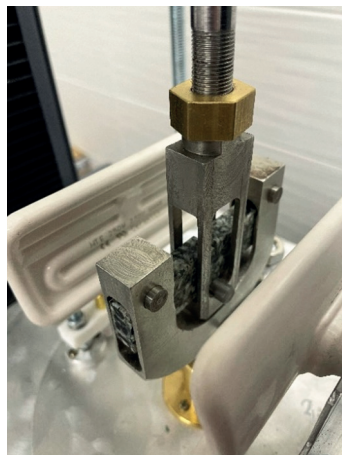


Рис. 4. Вид образца, помещенного в держатели

Fig. 4. View of the sample placed in the holders

них могли зарождаться дефекты, которые сильно влияют на прочность материала. Во избежание такого рода откло-

нений по завершении подготовки все образцы прошли контроль на наличие внутренних дефектов путем измерения скоростей распространения в них продольных волн с помощью ультразвукового дефектоскопа. Образцы с большим отклонением скорости распространения колебаний в образце от среднего значения в материале отбраковывались до начала испытаний.

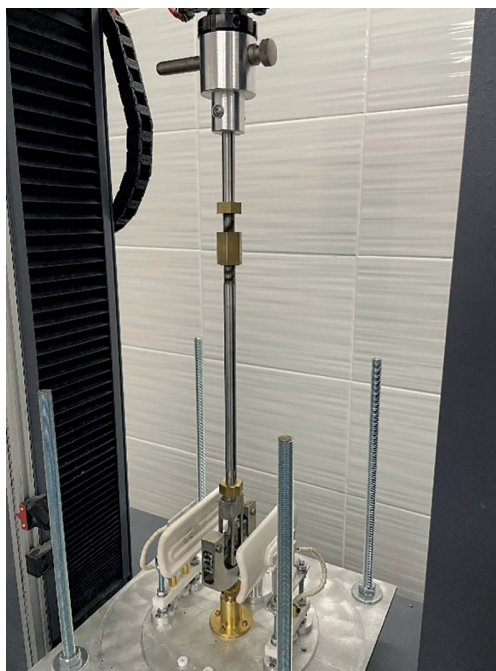


Рис. 5. Вид установки без защитного кожуха с помещенным образцом в прихваты

Fig. 5. View of the installation without a thermal protective casing with the sample placed in clamps

Лабораторная установка

Для проведения испытаний была сконструирована и изготовлена установка, позволяющая проводить прочностные испытания образцов горных пород по трехточечной схеме на изгиб при одновременном тепловом воздействии. К траверсам испытательной машины серии LFM-50 кН крепится разработанная установка (подробное описание приведено в [20]), в конструкцию которой входят специальные держатели для осуществления трехточечной нагрузки, нагревательные элементы в виде пластин из керамики, а также теплоизолирующий кожух. На рис. 5 показан вид установки без теплоизолирующего кожуха с поме-

ценным в прихват образцом гранита; на рис. 6 продемонстрирован вид установки с теплоизолирующим кожухом.

Результаты испытаний

Испытания проводились до образования магистральной трещины на образцах каждого материала на каждом шаге увеличения температуры. Замеры производились при температурах 20, 40, 60 и 80 °С.

В момент хрупкого разрушения образца с образованием магистральной трещины в зоне надпила фиксировалась максимальная разрушающая нагрузка на образец с точностью 0,01 кН. Определялся коэффициент вариации для оценки достоверности полученных данных. Для исключения из результатов испытаний некорректных, отклоняющихся данных было проведено цензурирование I типа. Порогом являлось отклонение коэффициента трещиностойкости для образца от среднего арифметического на 30%. Из результатов были также исключены данные образцов, плоскость разрушения которых отклонялась от плоскости надреза на 2 мм и более. Пример такого образца представлен на рис. 7, отклонение плоскости его разрушения составляет 2 мм. На рис. 8 изображен образец с допустимым отклонением плоскости разрушения.

По результатам испытаний производился расчет критического коэффициента интенсивности напряжений K_{IC} . Согласно требованиям ГОСТ 25.506.85 он определяется по формуле

$$K_{IC} = \frac{6 \times P_c \times l^{1/2}}{t \times b} \times Y'_4, \quad (1)$$

где P_c — разрушающая нагрузка, Н; l — глубина пропила, м; t — толщина образца, м; b — ширина образца, м.

Безразмерный коэффициент Y'_4 определяется геометрическими параметрами образца следующим образом:



Рис. 6. Вид установки с установленным теплоизолирующим кожухом во время испытаний с термическим воздействием

Fig. 6. View of the installation with the thermal insulating casing installed during thermal testing



Рис. 7. Образец известняка после испытания на трехточечный изгиб с недопустимым отклонением плоскости разрушения

Fig. 7. Limestone sample after three-point bending test with unacceptable deviation of the fracture plane

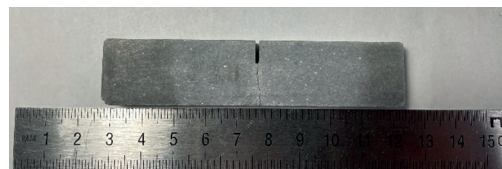


Рис. 8. Образец крупнозернистого серого мрамора после испытания на трехточечный изгиб с допустимым отклонением плоскости разрушения

Fig. 8. A sample of coarse-grained gray marble after a three-point bending test with permissible deviation of the fracture plane

Результаты замеров и вычислений
Results of measurements and calculations

Образец	Температура, °С	Рс*, Н	K_{IC}^* , МПа*м ^{0,5}	Коэффициент вариации, %
Мрамор серый (среднезернистый)	20	192,11	0,96	8,16
Гранит		358,84	1,76	9,04
Известняк		195,97	0,92	12,61
Мрамор серый (крупнозернистый)		138,01	0,69	6,13
Мрамор серый (среднезернистый)	40	133,95	0,66	5,74
Гранит		382,03	1,84	12,46
Известняк		190,89	0,89	25,32
Мрамор серый (крупнозернистый)		124,86	0,63	11,76
Мрамор серый (среднезернистый)	60	109,61	0,54	8,47
Гранит		278,49	1,37	16,39
Известняк		180,00	0,85	12,23
Мрамор серый (крупнозернистый)		99,21	0,47	8,47
Мрамор серый (среднезернистый)	80	81,96	0,41	14,96
Гранит		309,81	1,49	5,68
Известняк		181,02	0,86	11,79
Мрамор серый (крупнозернистый)		89,90	0,43	10,32

* Приведены усредненные значения по анализируемой серии испытаний.

$$Y'_4 = 1,93 - 3,07 \times \left(\frac{l}{b}\right) + 14,53 \times \left(\frac{l}{b}\right)^2 - 25,11 \times \left(\frac{l}{b}\right)^3 + 25,8 \times \left(\frac{l}{b}\right)^4 \quad (2)$$

Результаты исследований представлены в таблице.

Полученные данные были проанализированы на предмет однородности, так для каждого температурного интервала каждого материала представлены средние значения коэффициентов вариации в таблице. Значения этих коэффициентов говорят о малом и среднем значении разброса данных, что позволяет сделать вывод об однородности выборки, а значит, достоверности полученных результатов. Примечательно, что коэффициент вариации для значений коэффициента трещиностойкости образцов, выполнен-

ных из материалов с более крупными зёрнами, выше, чем у образцов с более мелкими зёрнами.

На рис. 9 результаты представлены в графической форме как зависимость коэффициента трещиностойкости от температуры образца при испытании.

Обсуждение результатов

Из приведенных рисунков видны следующие закономерности. Прежде всего, одинаков тренд изменения коэффициента трещиностойкости — для образцов всех генотипов трещиностойкость снижается с ростом температуры. Лучше всего линии трендов согласуются с экспериментальными данными серого мрамора среднезернистого, известняка и серого мрамора крупнозернистого с величинами достоверности аппроксимации 0,99; 0,92 и 0,94 соответственно. Несмотря

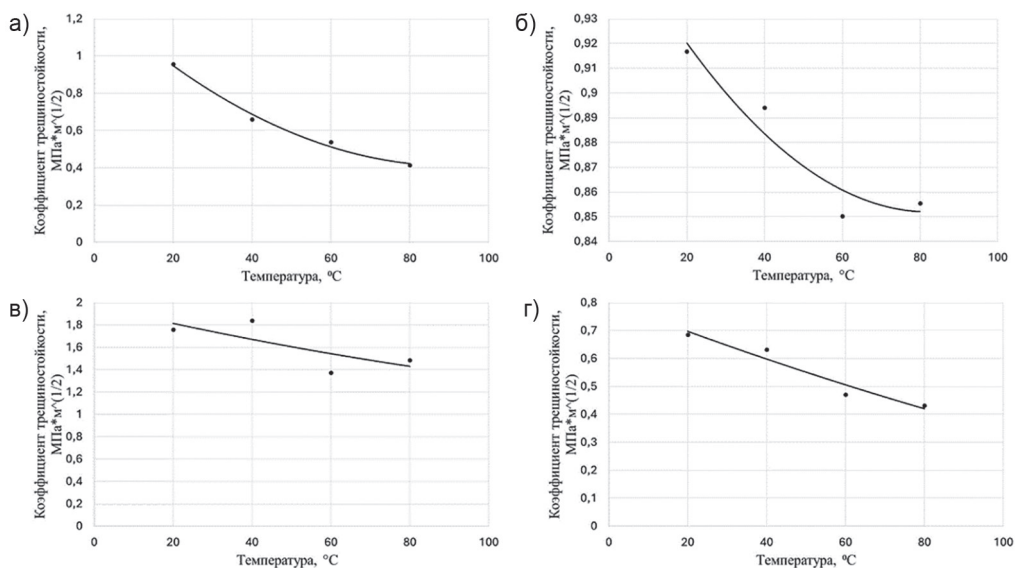


Рис. 9. Линии трендов изменения коэффициентов трещиностойкости в зависимости от температуры образцов: серого мрамора среднезернистого (а); известняка (б); гранита (в); серого мрамора крупнозернистого (г)

Fig. 9. Trend lines of changes in crack resistance coefficients depending on the temperature of samples: gray medium-grained marble (a); limestone (b); granite (v); gray coarse-grained marble (g)

ря на непостоянную скорость снижения среднего значения коэффициента трещиностойкости для каждой температуры, линии трендов демонстрируют то, что темп уменьшения коэффициента на первых этапах повышения температуры является более существенным, что видно по перепаду средних значений от 20 до 60 °С. Характер данного отклонения говорит о степени влияния температуры на разрушение связей между структурными элементами. Затем темп уменьшения значения коэффициента снижается при повышении температуры в интервале до 80 °С. Это также видно и по результатам расчета коэффициента трещиностойкости (см. таблицу).

Сравнивая полученные коэффициенты трещиностойкости мраморов с различной крупностью зерен, можно сделать вывод о том, что материал с меньшим размером зерен обладает большей прочностью на температурах, близких к комнатным, однако теряет эти свойства

при нагреве. Так, снижение коэффициента трещиностойкости при нагреве от комнатной температуры до 80 °С для среднезернистого мрамора составляет порядка 57%, для крупнозернистого — порядка 37%, что говорит о большей восприимчивости к изменению температуры материала с меньшими размерами структурных элементов. Среди исследованных образцов известняк показал наименьшую восприимчивость к изменению температуры, изменение коэффициента трещиностойкости для данного материала составило лишь 7,5%. У гранита снижение коэффициента трещиностойкости составило 22%. Наиболее восприимчивыми к изменению температуры оказались образцы мрамора.

Закключение

Были проведены испытания с целью нахождения коэффициента трещиностойкости горных пород различных генотипов при умеренном тепловом воз-

действии. Образцы изготавливались из гранита, известняка и серого мрамора с различной зернистостью. Геометрия образцов представляла собой балку прямоугольного сечения с пропилом в средней части, имитирующим краевую трещину. Для реализации такого рода испытаний была сконструирована установка, позволяющая производить нагрев образцов непосредственно во время их испытания на трехточечный изгиб. При температурах от 20 до 80 °С измерялась максимальная нагрузка, выдерживаемая образцом, затем для каждого образца рассчитывался коэффициент трещиностойкости K_{IC} .

Основываясь на результатах исследования, можно сделать следующие выводы.

- Выявлена закономерность снижения величины коэффициента трещиностойкости, независимо от генезиса пород, от 7,5% до 57% в температурном диапазоне 20–80 °С.

- Установлено, что темп снижения величины коэффициента трещиностойкости при умеренном тепловом воздействии в большей степени определяется генезисом породы в температурном диапазоне 20–80 °С, снижение составило: 37–57% для метаморфических, 22% для магматических и 7,5% для осадочных горных пород.

Причем наибольший темп снижения достигается в температурном диапазоне до 60 °С.

- Установлено, что крупность зерен горных пород одного генезиса оказывает существенное влияние на темп снижения величины коэффициента трещиностойкости при умеренном тепловом воздействии.

В дальнейшем планируется продолжение работы с другими материалами с целью установления зависимостей коэффициента трещиностойкости от оказываемых термических нагрузок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Першин Г. Д., Пшеничная Е. Г., Мажитов А. М. Энергетические критерии квазихрупкого разрушения горных пород в технологических процессах их добычи и первичной переработки // Горная промышленность. — 2022. — № 2. — С. 84–89. DOI: 10.30686/1609-9192-2022-2-84-89.
2. Трофимов В. А., Кубрин С. С., Филиппов Ю. А., Харитонов И. Л. Численное моделирование напряженно-деформированного состояния вмещающего массива и пологого мощного угольного пласта при завершении отработки выемочного столба // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2019. — № 8. — С. 42–56. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-08-0-42-56.
3. Хлопцов Д. В., Винников В. А. Определение давления горных пород на крепь скважины // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2019. — № 8. — С. 74–82. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-08-0-74-82.
4. Sas I. E., Cherepetskaya E. B., Pavlov I. A. Solving problems in geomechanics: Comparison of the fidesys strength analysis system and the plaxis software package // Key Engineering Materials. 2017, vol. 755, pp. 238–332. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.755.328.
5. You W., Tubing Y., Dengdeng Z., Qiang L., Yongjun C. Research on the effect of thermal treatment on the crack resistance curve of marble using notched semi-circular bend specimen // Theoretical and Applied Fracture Mechanics. 2022, vol. 119, article 103344. DOI: 10.1016/j.tafmec.2022.103344.
6. Кашников Ю. А., Ашихмин С. Г., Кухтинский А. Э., Шустов Д. В. О связи коэффициентов трещиностойкости и геофизических характеристик горных пород месторождений углеводородов // Записки Горного института. — 2020. — Т. 241. — С. 83–90. DOI: 10.31897/PMI.2020.1.83.
7. Feng Z., Zhao Y., Liu D. Permeability evolution of thermally cracked granite with different grain sizes // Rock Mechanics and Rock Engineering. 2021, vol. 54, pp. 1953–1967. DOI: 10.1007/s00603-020-02361-3.
8. Guo Q., Su H., Liu J., Yin Q., Jing H., Yu L. An experimental study on the fracture behaviors of marble specimens subjected to high temperature treatment // Engineering Fracture Mechanics. 2020, vol. 225, article 106862. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2019.106862.

9. Ouchterlony F. Suggested methods for determining the fracture toughness of rock // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts. 1988, vol. 25, no. 2, pp. 71–96.

10. Черепецкая Е. Б., Безруков В. И. Оценка коэффициента трещиностойкости при циклическом воздействии температурными полями // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 1. – С. 49–58. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_1_0_49.

11. Su H., Jing H., Yu L., Yin Q., Han G. Mode I fracture behaviour of sandstone after heat treatment // Géotechnique Letters. 2017, vol. 7, no. 1, pp. 47–52. DOI: 10.1680/jgele.16.00136.

12. Shihao Y., Qiang S., Pengfei L., Jishi G., He Z. Fracture properties and dynamic failure of three-point bending of yellow sandstone after subjected to high-temperature conditions // Engineering Fracture Mechanics. 2022, vol. 256, article 108366. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2022.108366.

13. Fowell R. J. Suggested method for determining mod. I fracture toughness using cracked chevron notched Brazilian disc (CCNBD) specimens // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts. 1995, vol. 32, no. 1, pp. 57–64. DOI: 10.1016/0148-9062(94)00015-U.

14. Kuruppu M. D., Obara Y., Ayatollahi M. R., Chong K. P., Funatsu T. ISRM-suggested method for determining the mode I static fracture toughness using semi-circular bend specimen // Rock Mechanics and Rock Engineering. 2013, vol. 47, no. 1, pp. 267–274. DOI: 10.1007/s00603-013-0422-7.


15. Ulusay R. The ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 2007–2014 // Bulletin of Engineering Geology and the Environment. 2015, vol. 74, pp. 1499–1500. DOI: 10.1007/s10064-015-0780-3.

16. Schmidt R. A. Fracture-toughness testing of limestone // Experimental Mechanics. 1976, vol. 16, pp. 161–167.

17. Дерюгин Е. Е., Богданов А. А. Определение трещиностойкости образцов с шевронным надрезом с использованием трехточечного изгиба // Письма в Журнал технической физики. – 2021. – Т. 47. – № 20. – С. 35–37. DOI: 10.21883/PJTF.2021.20.51612.18936.

18. Jianping Z., Yulin L., Xiaoyan Z., Zhihong Z., Tingzheng W. The effects of thermal treatments on the subcritical crack growth of Pingdingshan sandstone at elevated high temperatures // Rock Mechanics and Rock Engineering. 2018, vol. 51, pp. 3439–3454. DOI: 10.1007/s00603-018-1527-9.

19. Fan X., Lin H., Cao R. Bending properties of granite beams with various section-sizes in three-point bending tests // Geotechnical and Geological Engineering. 2019, vol. 37, pp. 1–11. DOI: 10.1007/s10706-018-0504-0.

20. Павлов И. А., Винников В. А., Павлов К. А. Лабораторная установка для исследования трещиностойкости пород-коллекторов // Ашировские чтения. – 2023. – Т. 2. – № 15. – С. 13–23. 

REFERENCES

1. Pershin G. D., Pshenichnaya E. G., Mazhitov A. M. Energy criteria for quasi-brittle fracture of rocks in technological processes of mining and primary processing. *Russian Mining Industry Journal*. 2022, no. 2, pp. 84–89. [In Russ]. DOI: 10.30686/1609-9192-2022-2-84-89.

2. Trofimov V.A., Kubrin S.S., Filippov Yu.A., Kharitonov I.L. Numerical modeling of stress-strain state for host rock mass and thick gently dipping coal seam after mining completion in extraction panel. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2019, no. 8, pp. 42–56. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-08-0-42-56.

3. Khloptsov D. V., Vinnikov V.A. Determination of rock pressure on lining of wells. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2019, no. 8, pp. 74–82. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-08-0-74-82.

4. Sas I. E., Cherepetskaya E. B., Pavlov I. A. Solving problems in geomechanics: Comparison of the fidesys strength analysis system and the plaxis software package. *Key Engineering Materials*. 2017, vol. 755, pp. 238–332. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.755.328.

5. You W., Tubing Y., Dengdeng Z., Qiang L., Yongjun C. Research on the effect of thermal treatment on the crack resistance curve of marble using notched semi-circular bend specimen. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*. 2022, vol. 119, article 103344. DOI: 10.1016/j.tafmec.2022.103344.

6. Kashnikov Yu. A., Ashikhmin S. G., Kukhtinsky A. E., Shustov D. V. On the relationship of crack resistance coefficients and geophysical characteristics of rocks of hydrocarbon deposits. *Journal of Mining Institute*. 2020, vol. 241, pp. 83–90. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2020.1.83.

7. Feng Z., Zhao Y., Liu D. Permeability evolution of thermally cracked granite with different grain sizes. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2021, vol. 54, pp. 1953–1967. DOI: 10.1007/s00603-020-02361-3.

8. Guo Q., Su H., Liu J., Yin Q., Jing H., Yu L. An experimental study on the fracture behaviors of marble specimens subjected to high temperature treatment. *Engineering Fracture Mechanics*. 2020, vol. 225, article 106862. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2019.106862.
9. Ouchterlony F. Suggested methods for determining the fracture toughness of rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*. 1988, vol. 25, no. 2, pp. 71 – 96.
10. Cherepetskaya E. B., Bezrukov V. I. Fracture toughness under different temperature effects. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023, no. 1, pp. 49 – 58. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_1_0_49.
11. Su H., Jing H., Yu L., Yin Q., Han G. Mode I fracture behaviour of sandstone after heat treatment. *Géotechnique Letters*. 2017, vol. 7, no. 1, pp. 47 – 52. DOI: 10.1680/jgele.16.00136.
12. Shihao Y., Qiang S., Pengfei L., Jishi G., He Z. Fracture properties and dynamic failure of three-point bending of yellow sandstone after subjected to high-temperature conditions. *Engineering Fracture Mechanics*. 2022, vol. 256, article 108366. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2022.108366.
13. Fowell R. J. Suggested method for determining mod. I fracture toughness using cracked chevron notched Brazilian disc (CCNBD) specimens. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*. 1995, vol. 32, no. 1, pp. 57 – 64. DOI: 10.1016/0148-9062(94)00015-U.
14. Kuruppu M. D., Obara Y., Ayatollahi M. R., Chong K. P., Funatsu T. ISRM-suggested method for determining the mode I static fracture toughness using semi-circular bend specimen. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2013, vol. 47, no. 1, pp. 267 – 274. DOI: 10.1007/s00603-013-0422-7.
15. Ulusay R. The ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 2007 – 2014. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 2015, vol. 74, pp. 1499 – 1500. DOI: 10.1007/s10064-015-0780-3.
16. Schmidt R. A. Fracture-toughness testing of limestone. *Experimental Mechanics*. 1976, vol. 16, pp. 161 – 167.
17. Deryugin E. E., Bogdanov A. A. Determination of fracture toughness of samples with a chevron notch using a 3-point bending. *Technical Physics Letters*. 2021, vol. 47, no. 20, pp. 35 – 37. [In Russ]. DOI: 10.21883/PJTF.2021.20.51612.18936.
18. Jianping Z., Yulin L., Xiaoyan Z., Zhihong Z., Tingzheng W. The effects of thermal treatments on the subcritical crack growth of Pingdingshan sandstone at elevated high temperatures. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2018, vol. 51, pp. 3439 – 3454. DOI: 10.1007/s00603-018-1527-9.
19. Fan X., Lin H., Cao R. Bending properties of granite beams with various section-sizes in three-point bending tests. *Geotechnical and Geological Engineering*. 2019, vol. 37, pp. 1 – 11. DOI: 10.1007/s10706-018-0504-0.
20. Pavlov I. A., Vinnikov V. A., Pavlov K. A. Laboratory installation for studying the fracture toughness of reservoir rocks. *Ashirovskiyе chteniya*. 2023, vol. 2, no. 15, pp. 13 – 23. [In Russ].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Винников Владимир Александрович¹ – д-р физ.-мат. наук, доцент, зав. кафедрой, e-mail: evgeny.vinnikov@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-3011-053X,

Павлов Илья Алексеевич¹ – аспирант, e-mail: 3.14alekseevich@gmail.com, ORCID ID: 0009-0005-1011-9819,

¹ Университет науки и технологий МИСИС.

Для контактов: Павлов И.А., e-mail: 3.14alekseevich@gmail.com.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

V.A. Vinnikov¹, Dr. Sci. (Phys. Mathem.), Assistant Professor, Head of Chair, e-mail: evgeny.vinnikov@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-3011-053X,

I.A. Pavlov¹, Graduate Student, e-mail: 3.14alekseevich@gmail.com, ORCID ID: 0009-0005-1011-9819,

¹ University of Science and Technology MISIS, 119049, Moscow, Russia.

Corresponding author: I.A. Pavlov, e-mail: 3.14alekseevich@gmail.com.

Получена редакцией 18.12.2023; получена после рецензии 27.01.2024; принята к печати 10.02.2024.
Received by the editors 18.12.2023; received after the review 27.01.2024; accepted for printing 10.02.2024.