

УДК 539.375

**ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ НАГРУЖЕНИЯ НА ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ  
ГОРНЫХ ПОРОД С ПОЗИЦИЙ КИНЕТИЧЕСКОЙ  
ТЕРМОФЛУКТУАЦИОННОЙ КОНЦЕПЦИИ РАЗРУШЕНИЯ**

**В. П. Ефимов**

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

На основе выполненных экспериментальных исследований по определению прочности и трещиностойкости образцов долерита и габбро-диорита изгибом в зависимости от скорости нагружения показано, что кинетические постоянные, характеризующие прочностные свойства среды в модели С. Н. Журкова, имеют одинаковые значения при локализованном и нелокализованном разрушениях. Аналогичные результаты получены при разрушении образцов органического стекла с краевой трещиной.

*Прочность, долговечность, трещиностойкость, скорость нагружения, изгиб, начальная энергия активации разрушения*

Оценка длительной прочности твердых сред и горных пород может быть выполнена на основе кинетической термофлуктуационной модели разрушения С. Н. Журкова. Такие оценки позволяют рассчитать ресурс целиков и других горных сооружений в зависимости от эксплуатационной нагрузки и могут быть использованы при оптимизации камерных технологий добычи полезных ископаемых подземным способом. В кинетической концепции разрушения две грани понятия прочности — предельные нагрузки и ресурс — логично увязаны уравнением долговечности. Определение кинетических констант, входящих в уравнение долговечности, проводится, как правило, при обработке данных лабораторных испытаний образцов горных пород, подверженных разрушению. Полученные кинетические параметры характеризуют прочностные свойства исследованных сред в объеме образца.

Массив из тех же горных пород, как известно, обладает другими прочностными свойствами, чем образец, в основном из-за большей трещиноватости и наличия в нем более крупных дефектов, которые являются очагами зарождения разрушения. Если в случае испытаний горных пород на прочность механические характеристики определяются усредненными по объему образца кинетическими параметрами, соответствующими нелокализованному разрушению, то в случае разрушения горной породы в массиве следует ожидать более локализованный характер разрушения. Возможность перенесения полученных в результате лабораторных испытаний кинетических параметров разрушения на массив зависит от ответа на вопрос: как соотносятся между собой кинетические параметры локализованного и нелокализованного разрушения? Цель работы — исследование локализованного этапа разрушения горных пород, получение кинетических констант данных сред и их сравнение с характеристиками нелокализованного разрушения.

Процесс разрушения сплошного образца можно разбить на два этапа: нелокализованное накопление повреждений во всем объеме до стадии формирования магистральной трещины и этап распространения трещины до границы образца. Каждая из этих стадий характеризуется своей долговечностью. Сделать такое разбиение имеет смысл, потому что современное феноменологическое описание этих двух процессов разрушения не проводится в рамках единого подхода. Если процесс разрушения сплошного образца при неизменной температуре носит нелокализованный характер и определяется действующим напряжением [1], то процесс развития трещины (разрушение надтреснутого образца) является крайне локализованным и определяется напряженным состоянием возле вершины трещины, которое принято характеризовать коэффициентом интенсивности напряжений в вершине трещины [2, 3]. Обе стадии разрушения могут быть описаны в рамках кинетической концепции прочности Журкова [4].

Для определения параметров локализованного разрушения следует обратиться к кинетике развития магистральных трещин, исследования которой с позиций кинетического термофлуктуационного подхода описаны в [1]. Эксперименты со слежением за развитием трещины проведены в специфических условиях на образцах из полимерных пленок, растягиваемых захватами разрывного устройства постоянным усилием. Образующаяся краевая трещина прорастала через образец с неравномерной скоростью. Очень грубо процесс распространения трещины можно разделить на два периода: продолжительный по времени период устойчивого докритического роста до размеров порядка нескольких процентов ширины образца и период быстрого неустойчивого роста трещины. Обработка результатов таких испытаний сводилась к построению зависимости докритической скорости развития трещины на первом этапе от приложенного напряжения и температуры. Полученные экспериментальные данные позволили определить эту зависимость в аналитическом виде:

$$\dot{L}_{\text{тр}} = \dot{L}_0 \exp\left(-\frac{U'_0 - \gamma'\sigma}{RT}\right), \quad (1)$$

где  $U'_0$  — начальная энергия активации процесса разрушения;  $\gamma'$  — структурная постоянная, характерная для данного материала и условий испытаний;  $\sigma$  — постоянное напряжение, приложенное к образцу;  $T$  — абсолютная температура;  $\dot{L}_0$  — коэффициент размерности скорости, полученный экстраполяцией экспериментальных данных при  $T \rightarrow \infty$ .

Следует отметить, что длина трещины, удовлетворяющая (1), составляет доли миллиметра. В таком случае напряжение возле трещины определяет процесс ее развития. В свою очередь это напряжение пропорционально приложенному напряжению  $\sigma$ . Асимптотика, присущая магистральной трещине и пропорциональная коэффициенту интенсивности напряжений  $K_1$ , еще не сформировалась. Главное, что удалось доказать в этих экспериментах — термофлуктуационный характер начального этапа локализованного разрушения, имеющий одинаковые характеристики при нелокализованном и локализованном разрушении для исследованных материалов.

Исходя из термофлуктуационного характера развития докритической магистральной трещины, запишем (1) в следующем виде [5]:

$$\dot{L}_{\text{тр}} = \dot{L}_0 \exp\left(-\frac{U'_0 - \xi K_1}{RT}\right) = V \exp(\nu K_1), \quad (2)$$

где характеристикой локального поля напряжений в вершине трещины служит коэффициент интенсивности напряжений  $K_1$  [2], а вместо структурно чувствительного коэффициента  $\gamma$  введен коэффициент пропорциональности  $\xi$ ;  $V$ ,  $\nu$  — постоянные материала, характеризующие движение медленных трещин. Для зависимости (2) также следует определить входящие в нее постоянные

ные, характеризующие материал в кинетической модели разрушения. В [6] для органического стекла экспериментально определена скорость трещины  $V_{тр} = f(K_1)$  в широком диапазоне изменения скорости магистральной трещины. Для данного случая можно использовать участок медленно растущих трещин, представленный на рис. 1.

Крестиками показаны значения квазистационарных скоростей, полученные в результате испытаний разных образцов неодинаковой геометрии на разных нагружающих устройствах, треугольниками — в результате нагружения одного образца. Значения коэффициента интенсивности напряжений определялись методом каустики [7, 8], а также по измеренному усилию и расчетным кривым  $K_1(L)$ . Как следует из рис. 1, зависимость скорости трещины от коэффициента интенсивности напряжений при нормальных условиях имеет вид

$$V_{тр} = 10^{-10} e^{14K_1}. \tag{3}$$

При достижении коэффициентом интенсивности напряжений значения  $1.4 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$  трещины в оргстекле переходят в критический режим и их скорость меняется скачком с 5 на 100 м/с.

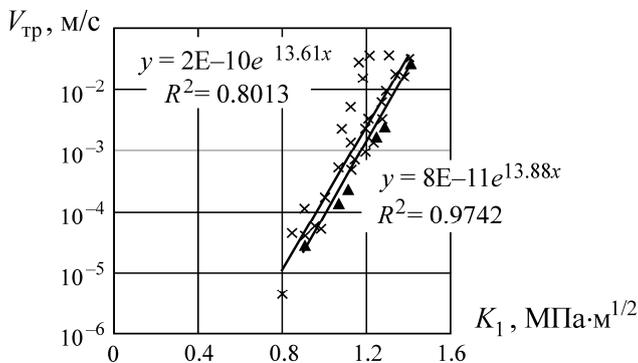


Рис. 1. Зависимость скорости магистральных трещин в оргстекле от коэффициента интенсивности напряжений:  $\blacktriangle$  — для одного образца,  $\times$  — для разных образцов

Для определения начальной энергии разрушения  $U_0$  в такой постановке необходимо знание коэффициента  $\dot{L}_0$ , значение которого оценить крайне сложно, потому что оно соответствует гипотетической ситуации при  $T \rightarrow \infty$ . Можно провести испытания при другой температуре, но для этого нужна хорошо термостатированная камера. Если такой возможности нет, то следует искать другие способы получения экспериментальной информации о разрушения при наличии трещины, которые позволяют характеризовать этот процесс не в терминах скорости его развития, а в терминах времени накопления повреждений в специфическом поле напряжений, присущем трещине.

Эксперименты на трещиностойкость, проведенные при разных скоростях нагружения, являясь аналогом испытаний цельных образцов в зависимости от скорости нагружения, решают эту проблему. Для обоснования данного подхода разобьем долговечность образца с магистральной трещиной на два этапа [2]: инкубационный период и время развития трещины до критического размера. Вклад в долговечность времени распространения критической трещины пренебрежимо мал для неустойчивых схем нагружения. Стандартное испытание на трещиностойкость осуществляется в режиме постоянной скорости нагружения. При таком испытании время развития трещины до критического размера также становится малым по сравнению с инкубационным периодом. Поэтому для долговечности образца с трещиной воспользуемся уравнением Журкова и запишем его при постоянном значении нагрузки:

$$\tau = \tau_0 \exp\left(\frac{U'_0 - \eta K_1}{RT}\right) = B \exp(\beta K_1), \quad (4)$$

где  $\tau_0$  — период тепловых колебаний;  $U'_0$ ,  $\eta$  — константы материала. Для режима постоянной скорости нагружения, воспользовавшись алгоритмом, описанным в [1], запишем следующее уравнение, связывающее критический коэффициент интенсивности напряжений со скоростью нагружения:

$$K_{1c} = \frac{\ln \beta B}{\beta} + \frac{1}{\beta} \ln \dot{K}_1, \quad (5)$$

где  $\dot{K}_1$  — скорость изменения коэффициента интенсивности напряжений, постоянная в каждом отдельном эксперименте и изменяющаяся при проведении серии испытаний.

На рис. 2 приведены результаты испытаний образцов из органического стекла с краевой трещиной, которые используются для определения критического коэффициента интенсивности напряжений, выполненные при разных скоростях подачи траверсы. Образцы размером 120×60 мм и толщиной 4 мм имели по средней линии начальный краевой пропил длиной приблизительно 9 мм, который заканчивался зародышевой трещиной, нанесенной надколом. Общая длина пропила с трещиной составляла от 11 до 16 мм. Испытания проведены на трех скоростях подачи траверсы, различающихся на два порядка. По кривой усилия во времени рассчитывался коэффициент интенсивности напряжений и его производная по времени. За критический коэффициент интенсивности напряжений принималось значение, соответствующее максимальной нагрузке при начальной длине трещины.

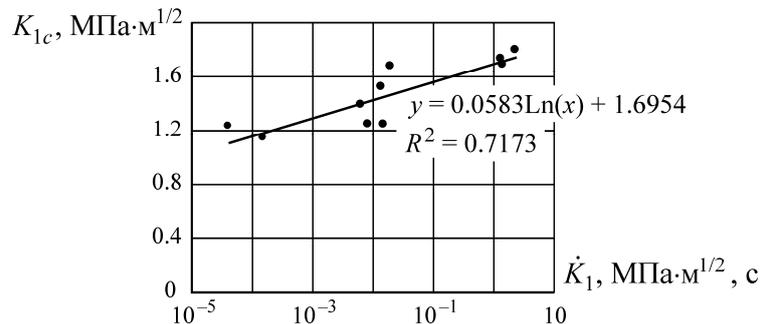


Рис. 2. Зависимость критического коэффициента интенсивности напряжений трещин отрыва для органического стекла от скорости нагружения

Как следует из рис 2, действительно с повышением скорости нагружения наблюдается рост критического коэффициента интенсивности напряжений, который может быть аппроксимирован линейной зависимостью. Из характеристик диаграммы (рис. 2) определены константы оргстекла, которые позволили вычислить начальную энергию активации разрушения, равную  $U'_0 = 139$  кДж/моль. Это значение начальной энергии активации разрушения практически равно таковому начальной энергии разрушения оргстекла, полученному из испытаний на долговечность [1]. Сравнение структурно-чувствительного параметра  $\gamma$  ( $\gamma = 2.1$  ккал·мм<sup>2</sup>/(моль·кГ)) для органического стекла при испытании на растяжение в режиме постоянной нагрузки [1] и введенного параметра пропорциональности  $\eta$  в формуле (4) следует проводить в безразмерном виде. Проще всего использовать безразмерные величины  $\gamma \sigma_b / RT$  и  $\eta K_{1c} / RT$ , в которые входят обсуждаемые параметры, а величины  $\sigma_b$  и  $K_{1c}$  есть временная прочность на растяжение и критический коэффициент интенсивности напряжений, измеренные по стандарту (при регламентированной скорости нагружения). Из испытаний на долговечность  $\gamma \sigma_b / RT \approx 24.9$ , а в экспери-

ментах на образцах, имеющих трещину,  $\eta K_{Ic} / RT \approx 24$ . Это свидетельствует о тесной связи обоих коэффициентов, подчеркивая тот факт, что процессы нелокализованного и крайне локализованного разрушения имеют одни и те же характеристики разрушения в кинетической модели прочности.

Развитый подход применим и для горных пород. В [9] изложен метод определения констант уравнения долговечности Журкова для горных пород, основанный на регистрации зависимости прочности от скорости нагружения. На рис. 3а представлены результаты испытаний образцов долерита на трехточечный изгиб и образцов габбро-диорита на изгиб и на растяжение методом бразильской пробы. Ромбиками показаны значения разрушающих напряжений образцов долерита, которые вычислены по зарегистрированным значениям максимальной нагрузки. Полученные результаты аппроксимированы прямой 1. Треугольниками нанесены значения разрушающих напряжений образцов габбро-диорита, испытанных на трехточечный изгиб, аппроксимирующая прямая 2. Квадратики соответствуют максимальным разрушающим напряжениям образцов габбро-диорита, испытанных на растяжение, аппроксимирующая прямая 3.

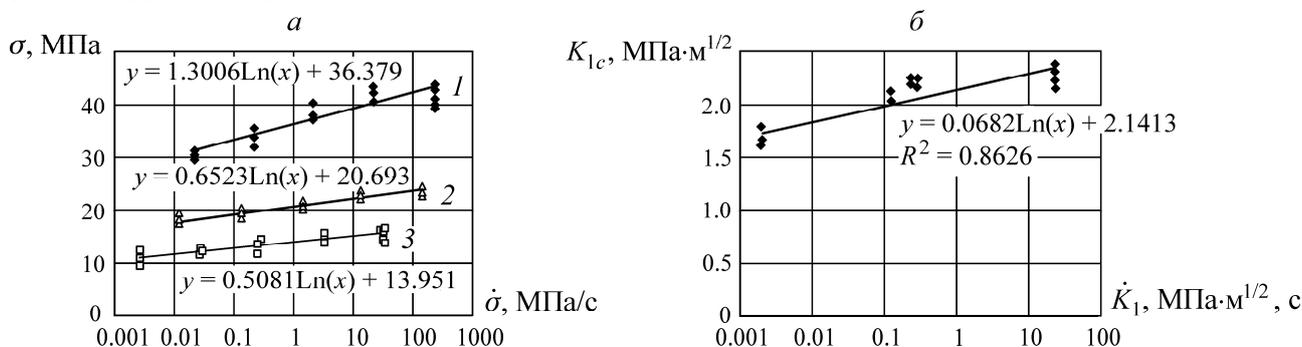


Рис. 3. Зависимости от скорости нагружения: а — разрушающих напряжений образцов горных пород: 1 — долерит, трехточечный изгиб; 2 — габбро-диорит, трехточечный изгиб; 3 — габбро-диорит, растяжение; б — критического коэффициента интенсивности напряжений долерита для трещин отрыва

Согласно методике [10], значения критического коэффициента интенсивности напряжений находятся при испытании подобных образцов, имеющих трещину известной длины при регламентированной скорости нагружения. Для определения влияния скорости нагружения на трещиностойкость горных пород образцы долерита и габбро-диорита в виде балочек размером 120×20×19 мм, имеющие посередине разрез длиной 5–7 мм, имитирующий трещину, испытаны на трехточечный изгиб при различной скорости нагружения. Пропил нанесен алмазным диском толщиной 1 мм. Как показано в [11], такой пропил в образцах горных пород эффективно имитирует трещину, и для определения трещиностойкости не требуется заканчивать его реальной трещиной, созданной каким-либо способом. Это связано с первоначально дефектной структурой горных пород. Обработка результатов проведена по формуле для испытаний на трехточечный изгиб [10]:

$$K_{Ic} = \frac{6Ma^{1/2}}{Wt^2} \left( 1.96 - 2.75 \frac{a}{t} + 13.66 \left( \frac{a}{t} \right)^2 - 23.98 \left( \frac{a}{t} \right)^3 + 25.22 \left( \frac{a}{t} \right)^4 \right),$$

где  $M$  — изгибающий момент;  $W$  и  $t$  — ширина и толщина образца соответственно;  $a$  — длина пропила. Результаты испытаний представлены на рис. 3б в виде значений коэффициента интенсивности напряжений, полученных из экспериментальных данных и аппроксимирующей прямой в полулогарифмических координатах.

По параметрам аппроксимирующей прямой, используя формулу (5), найдены кинетические постоянные долерита, входящие в уравнения долговечности (4): начальная энергия активации разрушения  $U'_0$  и коэффициент пропорциональности  $\eta$ . Результаты определения констант кинетического уравнения долговечности, полученные при испытании образцов горных пород с трещиной и без нее, приведены в таблице, из которой следует вывод об одинаковых значениях характерных параметров нелокализованного и локализованного разрушения горных пород.

Кинетические параметры разрушения горных пород, полученные при испытаниях на прочность и трещиностойкость

Горная порода	Испытания на прочность			Испытания на трещиностойкость		
	$U_0^{изг}$ , Дж/моль	$\gamma^{изг} / RT$ , 1/МПа	$\gamma^{изг} \sigma_{изг} / RT$	$U_0^{тр}$ , Дж/моль	$\eta / RT$ , 1/(МПа·м <sup>1/2</sup> )	$\eta K_{Ic} / RT$
Долерит	141.6	0.77	26.26	142.7	14.66	29.3
Габбро-диорит	148.9	1.533	31.89	148	23.5	31.49

Для демонстрации такого вывода на рис. 4 представлена зависимость трещиностойкости габбро-диорита, полученная для двух видов испытаний на прочность, от скорости нагружения. Прямая 1 построена на основе кинетических постоянных данной породы, полученных из испытаний на растяжение методом бразильской пробы, прямая 2 — из характеристик, найденных в результате обработки испытаний балок на трехточечный изгиб.

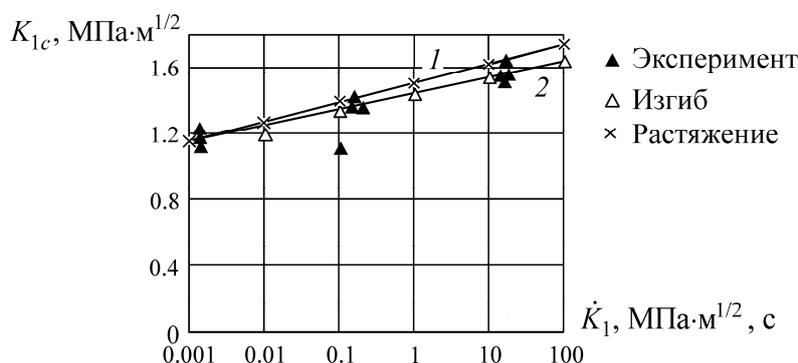


Рис. 4. Экспериментальные (▲) и расчетные (1, 2) значения трещиностойкости габбро-диорита в зависимости от скорости нагружения

Как следует из рис. 4, экспериментальные данные зависимости трещиностойкости от скорости нагружения находятся в согласии с зависимостями, полученными расчетным путем с использованием кинетических постоянных нелокализованного разрушения.

**ВЫВОДЫ**

Испытания на трещиностойкость при различных скоростях нагружения, выполненные на образцах с узким пропилом, имитирующим магистральную трещину, позволили определить кинетические постоянные изученных пород при локализованном разрушении.

Начальная энергия активации разрушения одинакова при локализованном и нелокализованном разрушении.

Сравнение структурно-чувствительного параметра  $\gamma$  и параметра пропорциональности  $\eta$ , проведенное в безразмерном виде, показало, что они имеют близкие значения.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Регель В. Р., Слущер А. И., Томашевский Э. Е. Кинетическая природа прочности твердых тел. — М.: Наука, 1974. — 560 с.
2. Черепанов Г. П. Механика хрупкого разрушения. — М.: Наука, 1974. — 640 с.
3. Партон В. З., Морозов Е. М. Механика упругопластического разрушения. — М.: Наука, 1985. — 502 с.
4. Журков С. Н. Кинетическая концепция прочности твердых тел // Вестн. АН СССР. — 1968. — № 3. — С. 46–52.
5. Черепанов Г. П. On crack propagation in solid, Int. Journal Solids & Structures, 1969, Vol. 5. — P. 863–871.
6. Ефимов В. П., Шер Е. Н. Определение динамической трещиностойкости органического стекла // Прикл. механика и техн. физика. — 2001. — Т. 42. — № 5. — С. 217–225.
7. Теокарис П. С. Локальное течение вблизи вершины трещины в плексигласе // Прикл. механика. — 1970. — № 2. — С. 159–165.
8. Ефимов В. П. Динамическая калибровка измерения трещиностойкости хрупких материалов методом расклинивания // ФТПРПИ. — 1990. — № 4. — С. 32–36.
9. Ефимов В. П. Исследование длительной прочности горных пород в режиме постоянной скорости нагружения // ФТПРПИ. — 2007. — № 6. — С. 37–44.
10. Сроули Д. Е. Вязкость разрушения при плоской деформации. Разрушение. Т. 4. — М.: Машиностроение, 1977. — С. 47–67.
11. Ouchterlony F. Fracture toughness of rock, Svedefo Report DS, Stocholm, Sweden, 1982. — 75 p.

*Поступила в редакцию 20/X 2015*