

УДК 539.421.5

Л.Л. Бачурин, В.Н. Ревва

ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ
ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ НА ОБРАЗЦАХ ГОРНЫХ ПОРОД
С НАДРЕЗАМИ

ИФГП НАНУ Украины

Проаналізовано особливості визначення параметрів тріщиностійкості гірських порід на зразках з штучними тріщинами (надрізами), та вплив параметрів надрізів на якість результату. Обґрунтовано – на прикладі пісковиків – можливість використання зразків без надрізів.

Ключові слова: тріщиностійкість, механіка руйнування, породний зразок, коефіцієнт інтенсивності напружень

L.L. Bachurin, V.N. Revva

FRACTURE TOUGHNESS ERROR ESTIMATION FOR NOTCHED
ROCKS SPECIMENS

Fracture toughness measurements technique is analysed for the case of rocks specimens with notched simulating the crack. Notch parameters effect on the end result is determined. Possible use of unnotched specimens in the case of sandstones is substantiated.

Keywords: fracture toughness, fracture mechanics, rock specimen, stress intensity factor

Используемые в настоящее время способы определения характеристик трещиностойкости горных пород предусматривают необходимость создания искусственной трещины (пропила, надреза) в зоне действия напряжений, что существенно усложняет подготовку образца к испытанию. Подобное требование связано в большой степени с тем, что изначально вышеупомянутые схемы испытаний, как и соответствующие теоретические решения, разрабатывались для определения характеристик трещиностойкости металлов [1] и были впоследствии приняты и для других материалов.

В целом важное для металлов требование максимального приближения параметров искусственной трещины к параметрам естественной может оказаться некатегоричным в отношении горных пород. Так, некоторые эксперименты показывают, что вязкость разрушения образцов песчаника с надрезом толщиной 0,5 мм может превышать таковую для образцов с естествен-

ной трещиной в 1,5–2 раза [2]. В то же время есть данные о том, что параметры надреза (в частности, заострение вершины) при достаточно малой его толщине в сравнении с размерами образца практически не оказывают влияния на результаты эксперимента [3]. Фактически пропилен играет роль концентратора напряжений, а разрушение происходит по трещине, стартовой из вершины пропила, в условиях поверхностного дефекта. При этом направление трещины может существенно отклоняться от направления пропила, что вносит некоторые поправки в исходные данные, хотя и не влияет особо на характер и процесс разрушения образца.

В данной работе выполнено сравнение расчетных коэффициентов интенсивности напряжений, полученных по аналитическим выражениям (для образца с искусственной трещиной) и по результатам моделирования образца с надрезом, призванным имитировать трещину.

Задача рассматривалась на примере одного из наиболее распространенных типов образцов – призматической балки, нагружаемой по трехточечной схеме (предусмотрен межгосударственными стандартами для металлов и бетонов [1,4,5]). Схема нагружения приведена на рис. 1.

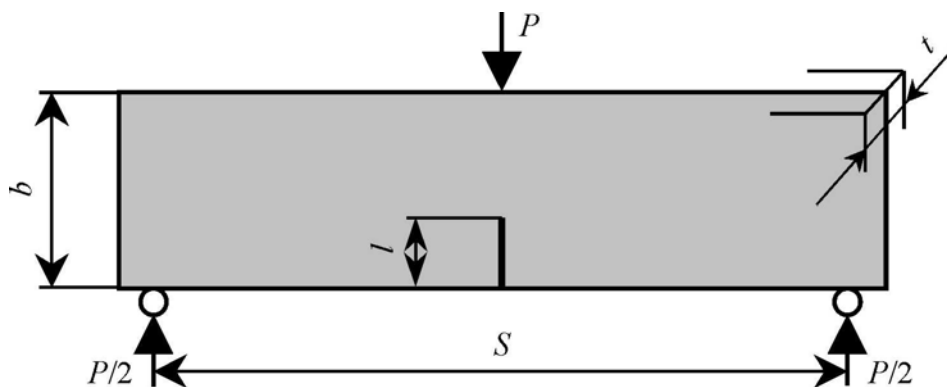


Рис. 1. Схема нагружения образца призматической формы с центральным торцевым разрезом по трёхточечной схеме

Один из ключевых геометрических параметров образца – это отношение длины разреза и высоты: $\lambda = l/b$. Для $0 \leq \lambda \leq 1$ коэффициент интенсивности напряжений K_I вычисляется по формуле [6]:

$$K_I = \frac{6P\sqrt{\pi l}}{tb} \left[\frac{1,99 - \lambda(1-\lambda)(2,15 - 3,93\lambda + 2,7\lambda^2)}{(1+2\lambda)(1-\lambda)^{1,5}} \right], \quad (1)$$

где P – разрушающее усилие, Н.

Формула (1) получена из теоретического решения задачи о нагружении полосы конечной длины с поперечной краевой трещиной при трехточечном изгибе. В металлических образцах тем или иным способом формируется именно трещина; в бетонах тоже возможно получение трещины – на стадии изготовления образца. В то же время стандартом [5] предусматривается воз-

возможность выполнения трещины путем пропила с шириной δ не более $0,5d$ (где d – максимальный диаметр зерна заполнителя) и не более 2 мм. В отношении бетонов, на которые распространяется упомянутый стандарт, данное требование вполне правомерно, поскольку пропил указанной ширины будет заведомо меньше структурных элементов материала и в некотором приближении может рассматриваться как эквивалент трещины. Если же речь идет о горных породах мелкозернистой структуры (например, песчаник), то условие $\delta \leq 0,5d$ во многих случаях будет невыполнимо по причине чисто технических ограничений: шлифовальные и алмазные диски, используемые при выполнении надрезов в образцах горных пород, имеют минимальную толщину 0,5–0,6 мм, а размер зёрен песчаника – от 0,1 до 2 мм. Характерный пример приведен на рис. 2.

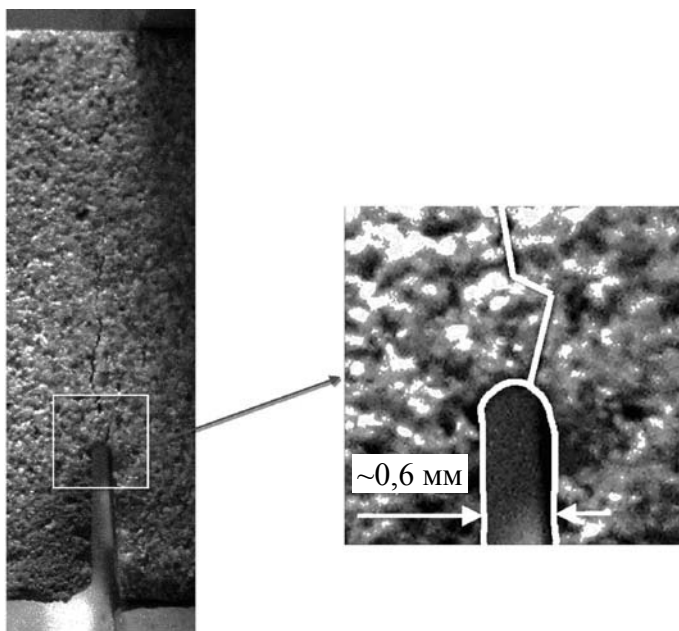


Рис. 2. Фотография образца песчаника, прошедшего нагружение по трехточечной схеме; справа – увеличенный фрагмент окрестности пропила с трещиной разрушения

Для сравнения с вышеприведенным теоретическим решением выполнено моделирование образования трещины из вершины пропила в образце методом конечных элементов. Расчеты осуществлены с использованием программного комплекса Franc2D – симулятора распространения трещин в твердых телах, который позволяет выполнить как анализ напряженно-деформированного состояния образца, так и вычисление параметров разрушения. Использована сетка изопараметрических конечных элементов.

Была рассмотрена модель образца из песчаника с модулем упругости $E = 10$ ГПа и коэффициентом Пуассона $\nu = 0,15$ следующих размеров: $t = 8$ мм, $b = 25$ мм, $S = 15$ см. Длина пропила $l_1 = 5$ мм. Учитывая тот факт, что разрушение образца начинается с развития и слияния естественных микротрещин, на втором этапе моделирования предусматривали включение условной трещины у вершины пропила длиной 1 мм (эквивалентно среднему размеру дефектов в образце) с соответствующим сгущением сетки конечных элементов.

Расчет коэффициентов интенсивности напряжений K_I и K_{II} выполнен через J -интеграл. Задавая ряд значений нагрузки P , получаем зависимость K_I от разрушающего усилия (K_{II} в данном случае незначителен). Сравнительные данные отображены на рис. 3.

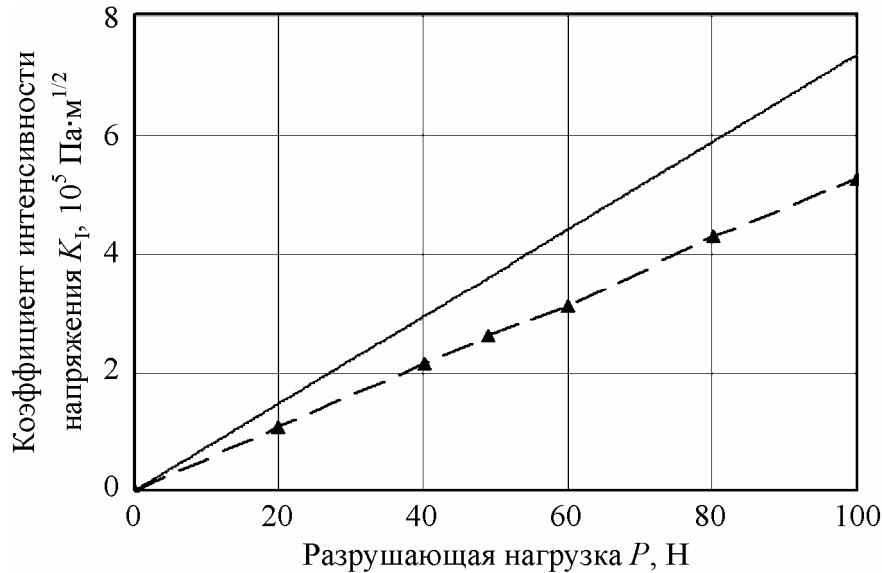


Рис. 3. Зависимость коэффициента интенсивности напряжений от величины нагрузки P : сплошная линия – теоретическая, для образца с трещиной; штриховая линия – по данным конечноэлементной модели для образца с пропилом и зародышевой трещиной

Выводы. Результаты моделирования показали, что размерные особенности «искусственной трещины», формируемой в образцах мелкозернистых горных пород, оказывают существенное влияние на точность рассчитываемых характеристик трещиностойкости. В частности, использование аналитических зависимостей, рассматривающих в качестве параметра идеальную трещину, приведет к завышению коэффициента интенсивности напряжений и прочих взаимосвязанных параметров.

В целом, учитывая изначально дефектную структуру горных пород и зная параметры распределения естественных дефектов в массиве и (или) на поверхности образца, можно получить данные для определения характеристик трещиностойкости без формирования пропилов. Однако это возможно только для образцов с неориентированным разрушением (например, диск под внутренним давлением [7]). Для линейных же образцов, подобным рассмотренному в данной работе, координаты точки разрушения являются определяющими, поэтому в имеющиеся соотношения необходимо внесение поправок, учитывающих влияние надреза.

1. *ASTM Standards*, Vol. 31, May 1969.
2. Старосельский А.В., Чирков С.Е., Шоболова Л.П., Эдельштейн О.А. О влиянии ПАВ на трещиностойкость крепких горных пород // ФТПРПИ. – 1990. – № 5. – С. 32–34.
3. *Summers D.A., Corwine J. and Chen Li-king* A comparison of methods available for the determination of surface energy: Preprint / <http://www.umr.edu/~rockmech/faculty/papers/paper6.pdf>.
4. *ГОСТ 25.506-85*. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении. – Введ. 01.01.86. – М.: Изд-во стандартов, 2005. – 38 с.
5. *ГОСТ 29.167-91*. Методы определения характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении. – Введ. 01.07.92. – М.: Изд-во стандартов, 1992. – 17 с.
6. *Справочник по коэффициентам интенсивности напряжений*: В 2-х томах. Т. 1: Пер. с англ. / Под ред. Ю. Мураками. – М.: Мир, 1990. – 448 с.
7. *Пат. 39916*, Україна, МПК⁷ G01N 3/00. Спосіб визначення тріщиностійкості гірських порід / Бачурін Л.Л., Ревва В.М., Кольчик Є.І.; заявник і патентовласник Інститут фізики гірничих процесів НАН України. – Опубл. 25.03.2009, бюл. № 6.

Статья поступила в редакцию 28 июля 2009 года