

**ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ НАЧАЛЬНОЙ МИКРОТРЕЩИНЫ
ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ ПЕСЧАНИКОВ
СПОСОБОМ РАЗРЫВА ДИСКОВЫХ ОБРАЗЦОВ**

Описано підхід до оцінки характерного розміру поверхневого дефекту (умовної мікротріщини) для визначення тріщиностійкості пісковиків способом відцентрового розриву дискових зразків без штучних надрізів або тріщин. Представлено результати моделювання розвитку тріщини у дискових породних зразках.

Одним из способов определения характеристик трещиностойкости горных пород с использованием керновых образцов является схема центробежного разрыва диска с отверстием под действием прилагаемого к внутренней поверхности давления [1, 2]. Способ разработан в Институте физики горных процессов НАН Украины и предназначен для определения эффективной поверхностной энергии (ЭПЭ) при прогнозе выбросоопасности песчаников по ЭПЭ.

При разработке методики испытания образцов по данному способу было высказано предположение, что с учетом первоначально дефектной структуры горных пород можно обойтись без формирования стартового надреза (пропила) на поверхности образца для инициации трещины. Очевидно, что если в материале образца изначально существуют произвольно расположенные микротрещины, при нагружении происходит их дальнейшее развитие, сгущение в зоне наибольшей концентрации напряжений, объединение в магистральную эффективную трещину и дальнейшее её распространение вплоть до полного разрушения. В целом описанная картина соответствует представлениям о стадиях хрупкого разрушения микродефектных материалов и, в частности, горных пород [3].

В то же время, подавляющее большинство разновидностей образцов, используемых при определении характеристик трещиностойкости материалов, имеют пропилены, либо искусственные трещины, к геометрии и тщательности подготовки которых предъявляются повышенные требования. Как показано в работах [4, 5], эти требования применительно к горным породам не лишены ряда недостатков, поскольку принятие пропила или надреза в качестве трещины является весьма грубым допущением для пород мелкозернистой структуры.

Разработанный авторами способ определения трещиностойкости горных пород, в отличие от применяющихся в настоящее время способов, обеспечивает нелокализованное нагружение образца, что позволяет определять *критические* значения характеристик трещиностойкости, в частности – вязкости разрушения и эффективной поверхностной энергии. Достигается это путём центробежного разрыва породного диска с отверстием, не имеющего искусственных надразов, который разрушается в наиболее «слабом» месте, а не по заранее предопределённой траектории.

В качестве начальной трещины, длина которой фигурирует в соотношениях для определения критического коэффициента интенсивности напряжений

(КИН) и эффективной поверхностной энергии принимается условная естественная микротрещина, выходящая на поверхность образца. Основанием для данного утверждения является тот факт, что согласно минералогопетрографическим исследованиям, трещины существуют практически во всех типах горных пород [6]. К ним относятся, прежде всего, трещины, возникающие на границах зерен породообразующих минералов. Ориентировка трещин, их расположение и размер в объёме большинства пород случайны, поэтому можно утверждать, что, учитывая отношение размеров первичных дефектов и протяженности периметра отверстия, как минимум одна микротрещина с характерным размером не меньше размера зерна будет иметь выход на внутреннюю поверхность отверстия в образце.

При установлении расчетной величины стартового дефекта можно ориентироваться на сведения о распределении в рассматриваемой породе зерен по их диаметру, принимая его (диаметра) характерную величину плюс характерный размер поры к расчету.

Известно, что песчаник состоит из зёрен песка, сцементированных глинистым, карбонатным, кремнистым или другим материалом. По преобладающему размеру зёрен песчаники разделяются на мелкозернистые (0,1—0,25 мм), среднезернистые (0,25—0,5 мм), крупнозернистые (0,5 мм).

Распределение пор в песчанике в некоторой степени зависит от зерновой структуры и типа цемента. Дифференциальные кривые распределения диаметров пор имеют положительную асимметрию и бывают уни- и бимодальными (рис. 1).

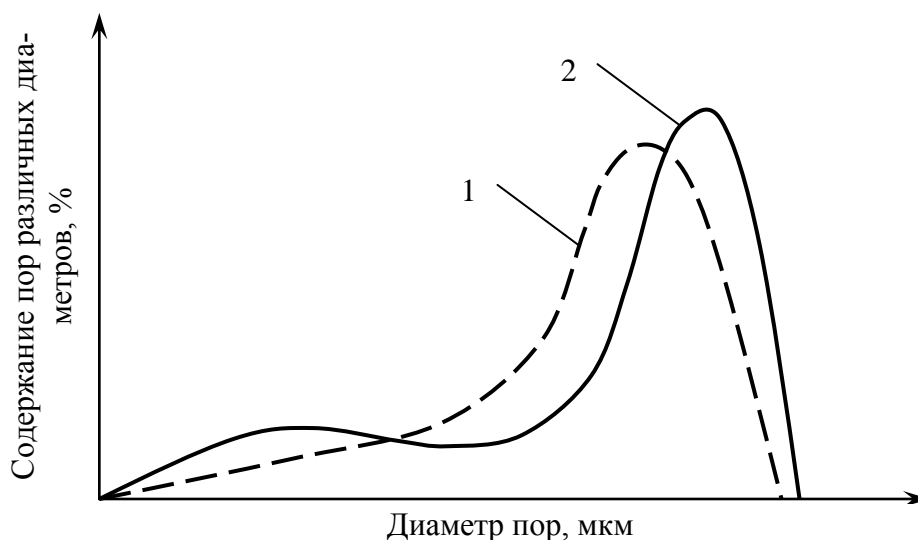


Рис. 1 – Типичные виды распределения пор в песчаниках по диаметру: 1 – унимодальное, 2 – бимодальное.

Наибольшую вероятность нахождения на произвольной поверхности образца будут иметь поры с характерным размером, соответствующим второй, максимальной, моде. Соответственно, в случае бимодального распределения достаточно учитывать именно этот характерный размер.

Для установления конкретного распределения пор в исследуемой партии образцов песчаника необходимо проведение порометрических исследований, для чего можно использовать прямое измерение поровой структуры путем микроскопических исследований шлифов породы [7]. Исследования связи фильтрационно-емкостных и структурно-вещественных параметров пород показывают также наличие корреляционной связи между открытой пористостью и медианным диаметром зерен, опосредованной через удельную поверхность породы [8]. Таким образом, можно использовать для получения медианного диаметра пор как порометрические, так и гранулометрические данные.

Для описания распределения пор в песчаниках подходит бета-распределение относительно радиусов или диаметров пор, нормированное для диапазона [0;1].

Плотность вероятности бета-распределения описывается выражением:

$$f_X(x) = \frac{1}{B(\alpha, \beta)} x^{\alpha-1} (1-x)^{\beta-1},$$

где $\alpha, \beta > 0$ – произвольные фиксированные параметры,

$B(\alpha, \beta) = \int_0^1 x^{\alpha-1} (1-x)^{\beta-1} dx$ – бета-функция.

Для примера рассмотрим распределения пор по радиусам (диаметрам), приведенные в работе [9]. Для мелкозернистого алевроитового песчаника распределение описывается параметрами $\alpha = 15$ и $\beta = 2$. Гистограмма распределения показана на рис. 2а.

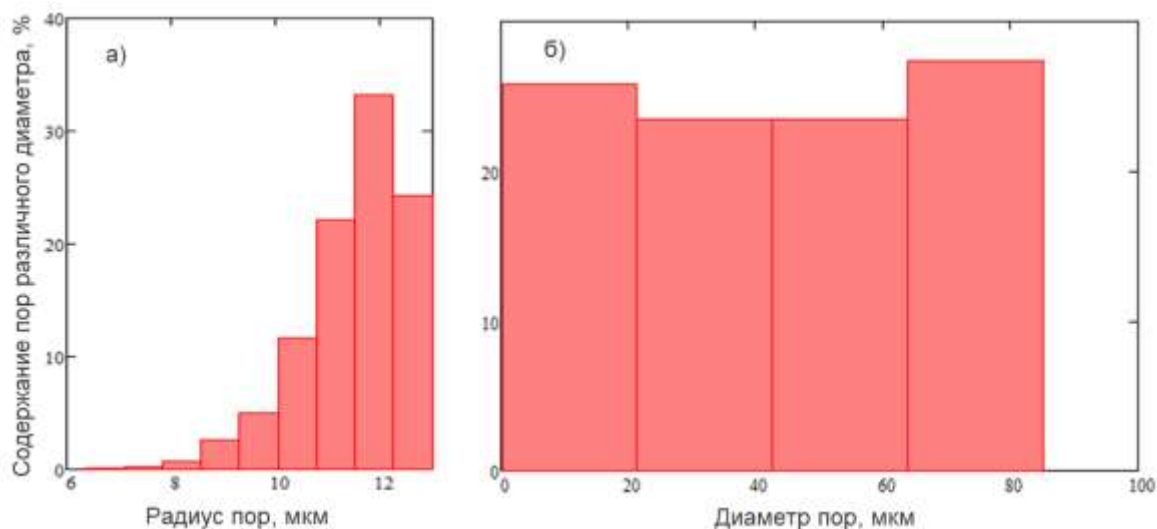


Рис. 2 – Гистограммы распределения пор мелкозернистого (а) и крупнозернистого (б) песчаников.

Мода распределения определяется из выражения $(\alpha - 1) / (\alpha + \beta - 2)$, и в данном случае равна $(15 - 2) / (15 + 2 - 2) \times 13$ мкм (13 – максимальное значе-

ние радиуса пор согласно исходного распределения. Таким образом, можно сказать, что большинство пор имеют диаметр $11,27 \times 2 = 22,5$ мкм. Известно, что исходя из модели плотной случайной упаковки шаров неодинакового диаметра, характерный диаметр пор составляет $0,15 \dots 0,2$ диаметра крупнейших зерен. Принимая эту модель из вышеизложенного можно также принять, что максимальный диаметр зерна составит $22,5 / (0,15 \dots 0,2) = 112 \dots 150$ мкм.

На основании приведенных оценок можно для рассматриваемого примера принять максимальную величину поверхностного дефекта $(112 \dots 150) + 22 = 135 \dots 172$ мкм.

Для крупнозернистого песчаника бета-распределение будет иметь параметры $\alpha = 0,9$ и $\beta = 0,91$. Гистограмма распределения показана на рис. 2б. Мода распределения – 53 мкм, соответствующий размер зерен $0,26 \dots 0,35$ мм. Максимальная величина поверхностного дефекта – $0,3 \dots 0,4$ мм.

Для проверки аналитического выражения для определения ЭПЭ по описываемому способу [1] с учетом обозначенных выше предпосылок, необходимо изучить процесс развития трещин и оценить значения КИН I и II моды деформаций.

Для решения данной задачи, было осуществлено моделирование развития поверхностной микротрещины с использованием программного комплекса Franc2D/CASCA [10], который предназначен для двумерной симуляции распространения трещин в твердых телах и позволяет выполнить как анализ напряженно-деформированного состояния образца, так и вычислить параметры разрушения.

На первом этапе в модуле CASCA была построена базовая конечно-элементная модель, в которую затем вносились коррективы в соответствии с условиями частных задач. В модели используется разбиение на 1024 квадратных изопараметрических элемента с девятью точками интегрирования, обеспечивающих приемлемую точность вычислений без существенного сгущения сетки. С учетом обычных размеров образцов (диаметр 59...76 мм, толщина 20 мм, диаметр отверстия 20 мм), принята следующая схема разбивки на конечные элементы (рис. 3).

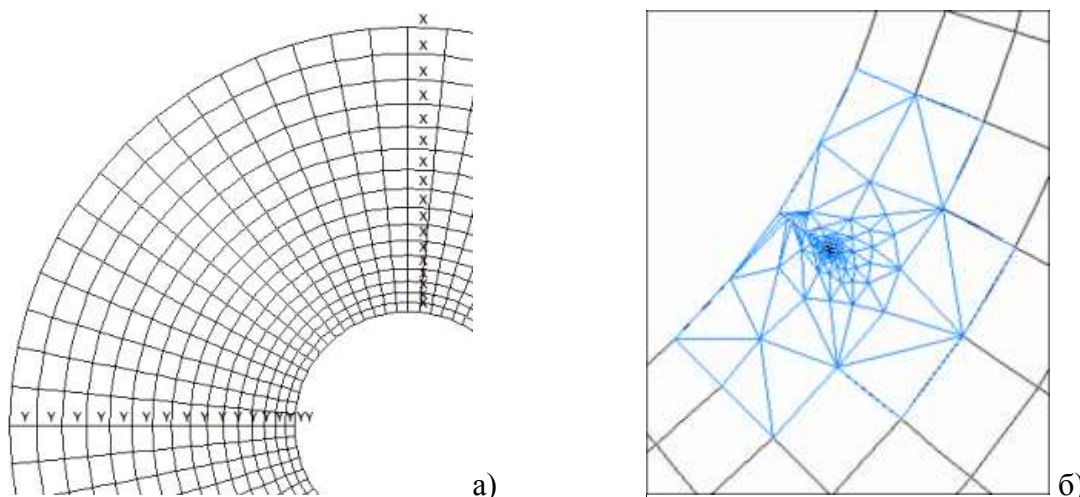


Рис. 3 – Фрагмент конечно-элементной модели диска (а) и стартовая трещина (б).

Единственные силы, действующие на образец – равномерно распределенное давление на внутренней поверхности отверстия.

Трещина, с размером, определяемым по вышеизложенной методике, располагалась как под углом к нормали к внутренней поверхности образца, так и перпендикулярно к ней. В области возле трещины выполнено сгущение конечных элементов, вырожденных в треугольные из квадратичных. У вершины трещины используются специальные сингулярные элементы.

Диаграммы напряжений для модели (рис. 4) показали, что в образце формируются условия для распространения трещины в режиме нормального отрыва (I мода деформаций), и, соответственно, величины КИН и ЭПЭ, рассчитанные по модели и с помощью аналитического выражения практически совпали. При этом влияние величины КИН II моды деформаций пренебрежимо мало.

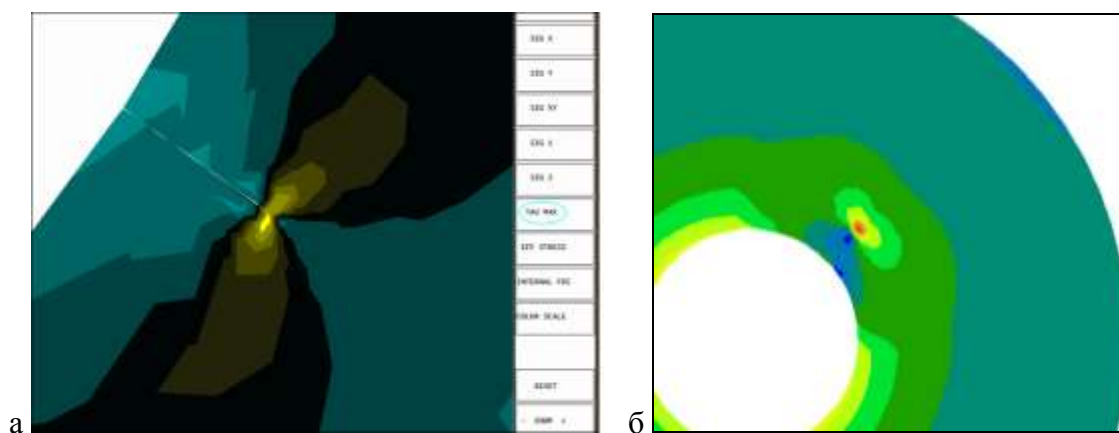


Рис. 4 – Распределение в образце максимальных касательных напряжений τ_{\max} при начальном нормальном (а) и наклонном расположении трещины (б).

Как видно из рис. 4б, наклонное расположение трещины обеспечивает отклонение от режима нормального отрыва, и трещина *при сохранении данной траектории* распространяется в смешанном режиме I+II моды деформаций. При этом, как показало сравнение величин КИН, рассчитанных по модели и с помощью аналитического выражения, при рассмотрении длинной трещины, расположенной под углом к нормали к поверхности отверстия, нельзя ограничиваться учётом КИН только I моды деформаций, иначе происходит занижение величины ЭПЭ. Однако реализуется смешанный режим лишь при условии использования ориентированной искусственной трещины.

Наблюдаемые же в экспериментах трещины разрушения дисковых образцов, подвергаемых разрыву, характеризуются тем, что они распространяются преимущественно перпендикулярно направлению действия растягивающих напряжений, независимо от начальной ориентировки стартового дефекта. Особенности строения пород и их дефектность обуславливают неизбежное случайное отклонение траектории движения трещины, но в целом стремление выдерживать нормальное направление соблюдается. О наличии условий для этого свидетельствует также распределение напряжений в окрестностях вершины наклонной трещины (рис. 4б).

Таким образом, предложенная схема нагружения обеспечивает условия для возникновения растягивающих напряжений у вершины произвольной трещины и формирования необходимой для её старта концентрации напряжений.

Выводы: Установлено, что при рассмотрении распространения произвольных трещинных дефектов от поверхности отверстия в дисковом образце независимо от начальной их ориентации, возможно установление показателей трещиностойкости для I моды деформаций и без искусственного начального надреза, поскольку дальнейшее развитие микротрещины приводит к формированию эффективной трещины *нормального отрыва*. Для определения же характеристик трещиностойкости *при сдвиге* необходимо обеспечение смешанного режима (I/II) развития трещины, что возможно (при данной схеме нагружения и форме образцов) лишь путем предварительного формирования ориентированного наклонного надреза, с учетом искажений, которые он вызывает.

При использовании схемы нелокализованного нагружения породных образцов, не предполагающей наличия концентраторов напряжений и искусственных надрезов, возможно получение значений характеристик трещиностойкости горных пород, таких как вязкость разрушения и эффективная поверхностная энергия, для критических условий, принимая в качестве размера условной микротрещины сумму моды статистического распределения пор по характерным диаметрам и среднего размера зёрен.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бачурин Л. Л. Способ определения характеристик трещиностойкости горных пород / Л. Л. Бачурин, В. Н. Ревва, Н. И. Василенко, А. В. Молодецкий // Вісті донецького гірничого інституту. – 2007. – № 2. – С. 15—20.
2. Пат. 39916 Україна, МПК (2009) G 01 N 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. – № а 2007 01888 ; заявл. 23.02.07 ; опубл. 25.03.2009, Бюл. № 6.
3. Рац М. В. Трещиноватость и свойства трещиноватых горных пород / М. В. Рац, С. Н. Чернышев. – М. : Недра, 1970. – 164 с.
4. Бачурин Л. Л. Применимость существующих способов определения трещиностойкости горных пород в качестве экспресс-методов / Л. Л. Бачурин, В. Н. Ревва // Вісті донецького гірничого інституту. — 2006. — № 1. — С. 24—30. — Библиогр.: с. 29.
5. Бачурин Л. Л. Оценка погрешности определения параметров трещиностойкости на образцах горных пород с надрезами / Л. Л. Бачурин, В. Н. Ревва // Физико-технические проблемы горного производства. — 2009. — № 12. — С. 80—84. — Библиогр.: с. 84.
6. Исследование прочности и деформируемости горных пород / [А. И. Берон, Е. С. Ватолин, М. И. Койфман, М. Ф. Кунтыш, М. П. Мохначев, С. Е. Чирков.] – М. : Наука, 1973. – 207 с.
7. Прошляков Б. К. Коллекторские свойства осадочных пород на больших глубинах / Б. К. Прошляков, Т. И. Гальянова, Ю. Г. Пименов. – М. : Недра, 1987. – 200 с.
8. Харченко С. И. Связи фильтрационно-ёмкостных и структурно-вещественных параметров пород пласта Ю1 Восточно-Придорожного месторождения // Вестник недропользователя. – 2003. - № 10. / Режим доступа: <http://www.oilnews.ru/magazine/2003-10-15.html>.
9. Ханин А. А. Породы-коллекторы нефти и газа и их изучение / А. А. Ханин. – М. : Недра, 1969. – 368 с.
10. FRANC2D. A Two Dimensional Crack Propagation Simulator. User's Guide. Version 3.1 / P. Wawrzynek, A. Ingraffea. – Cornell University, 1993.