

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ОТРЫВНОГО (I) И СМЕШАННОГО (I/II) РЕЖИМОВ РАЗВИТИЯ ТРЕЩИН В КЕРНОВЫХ ОБРАЗЦАХ ГОРНЫХ ПОРОД

*Представлено результати моделювання розвитку тріщини у дискових породних зразках за схемою випробування для визначення тріщиностійкості.*

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]. Способ разработан в Институте физики горных процессов НАН Украины и предназначен для определения эффективной поверхностной энергии (ЭПЭ) и вязкости разрушения песчаников при прогнозе выбороопасности 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 [2]. Кроме того, пропилены в существующих методиках определения характеристик трещиностойкости по техническим причинам по своим геометрическим параметрам не сравнимы с размерами трещины, по которой происходит разрушение образца (рис. 1) и являются в первую очередь концентраторами напряжения для обеспечения гарантированного трещинообразования в указанном месте.

Для схемы же нагружения образца согласно [1] место разрушения не имеет никакого значения, поскольку распределение напряжений по периметру отверстия в диске предполагается равномерное или близкое к нему (зависит от способа приложения давления). Исходя из сведений о микродефектной структуре пород, с высокой степенью уверенности можно утверждать, что на поверхности образца будут иметь выход микротрещины, самая опасная из которых в конечном итоге и даст старт процессу разрушения. Поскольку в расчетах параметров трещиностойкости неизбежно присутствует длина трещины, мож-

---

<sup>1</sup> КИИ ДонНТУ

но принять, что она будет равна средней длине микротрещины в массиве образца, которая, к примеру, для песчаников соответствует среднему размеру зерна и находится на границе зерен. Итак, с учетом поставленных условий и предпосылок, необходимо изучить процесс развития трещин и установить зависимости для определения коэффициентов интенсивности напряжений.

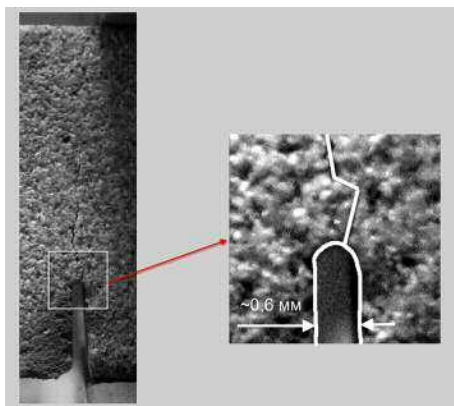


Рис. 1 – Фотография трещины у пропила в образце-балочке для инженерного способа определения ЭПЭ.

Определение коэффициентов интенсивности напряжений является весьма сложной математической задачей, в аналитическом виде ограничено частными случаями и весьма трудоёмко. На практике для задач со сложной геометрией и условиями нагружения чаще всего применяются различные численные методы, среди которых рядом преимуществ перед другими имеет метод конечных элементов (МКЭ). Поскольку в поставленной задаче возможно совершенно произвольное расположение трещин в образце, а также их количество, также воспользуемся для её решения МКЭ.

Модели выполнены с использованием программного комплекса Franc2D/CASCA [3], который предназначен для двумерной симуляции распространения трещин в твердых телах и позволяет выполнить как анализ напряженно-деформированного состояния образца, так и вычислить параметры разрушения.

Расчетная схема приведена на рисунке 2.

Здесь рассмотрено решение плоской задачи обобщенного напряженного состояния в перемещениях, допуская, что единственная сила, действующая на тело – это давление на внутренней поверхности отверстия  $p$ .

На первом этапе в модуле CASCA построена базовая конечно-элементная модель, в которую затем вносились коррективы в соответствии с условиями частных задач. В модели используется разбиение на квадратичные изопараметрические элементы с девятью точками интегрирования, обеспечивающие приемлемую точность вычислений без существенного сгущения сетки. С уче-

том обычных размеров образцов (диаметр 70 мм, толщина 20 мм, диаметр отверстия 20 мм), принята следующая схема разбивки на конечные элементы (рис. 3).

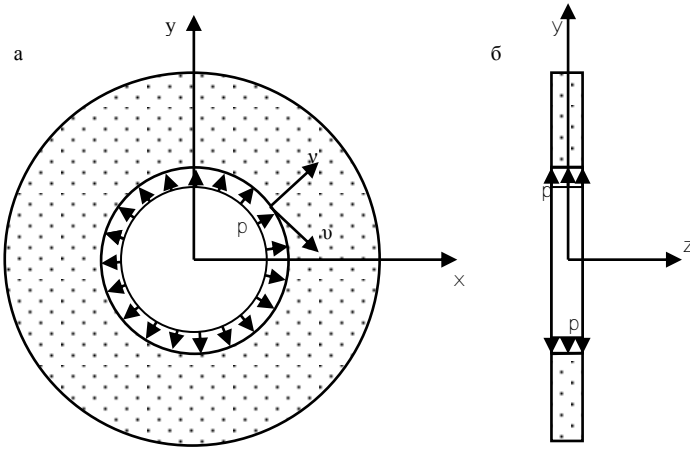


Рис. 2 – Расчетная схема

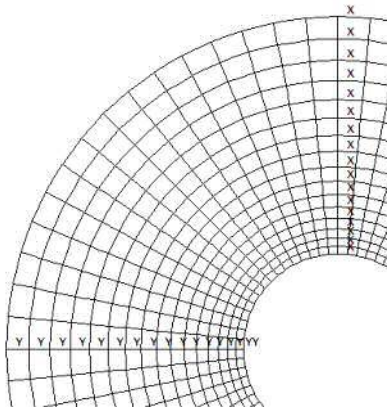


Рис. 3 – Фрагмент конечно-элементной модели диска. Базовая модель.

Матрица жесткости решается методом Гаусса.

Задача намеренно считалась не в осесимметричной постановке и для полного диска (можно было бы рассматривать только четверть), поскольку моделировались также различные схемы передачи давления на поверхность отверстия, различные варианты размещения трещин относительно периметра отверстия.

ствия и различное их количество (здесь представлены только частные результаты). Буквами обозначены фиксации узлов элементов по соответствующим осям координат. Единственные силы, действующие на образец – равномерно распределенное давление на внутренней поверхности отверстия.

В данном случае трещина принята произвольного размера, расположенная под углом к нормали к внутренней поверхности образца. В области возле трещины выполнено сгущение конечных элементов, вырожденных в треугольные из квадратных. У вершины трещины используются специальные сингулярные элементы.

Распределение в теле образца напряжений показано на рис. 4 та 5.

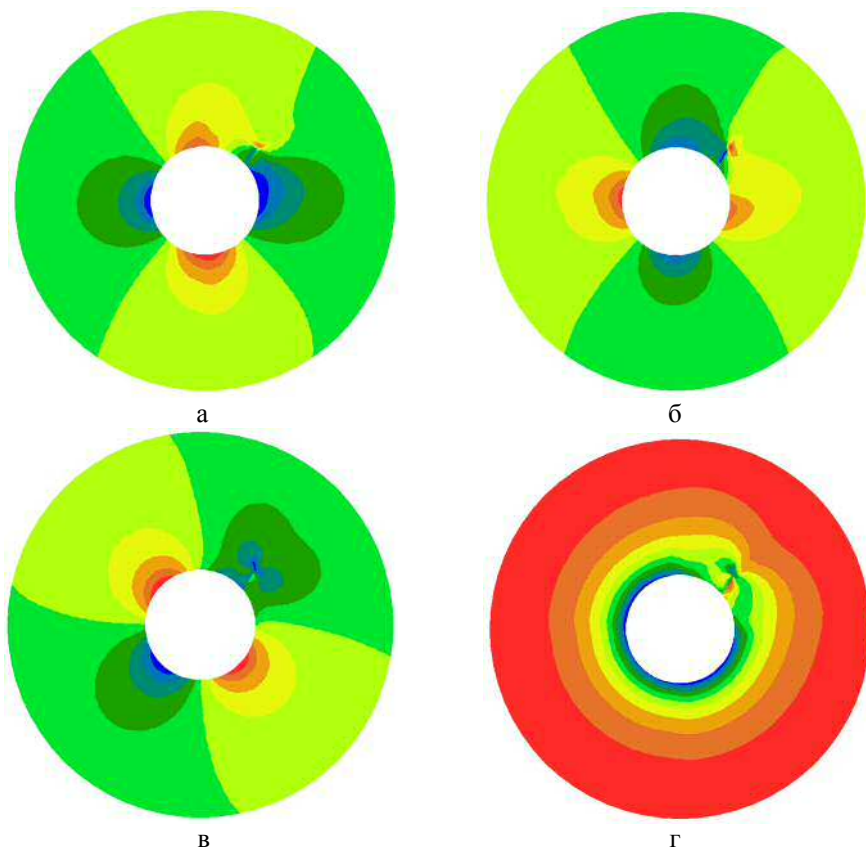
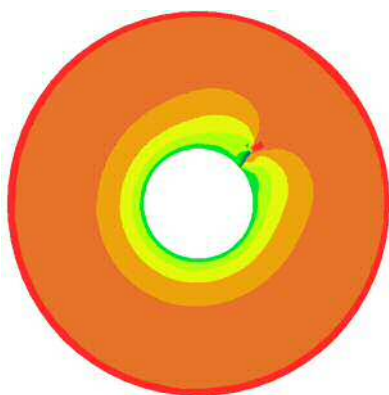
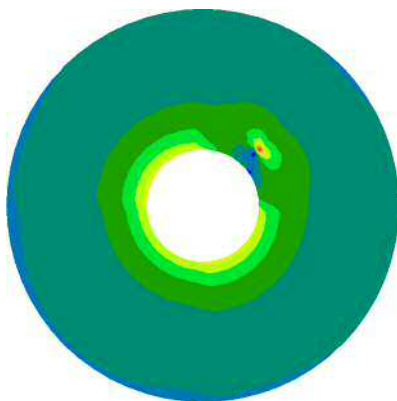


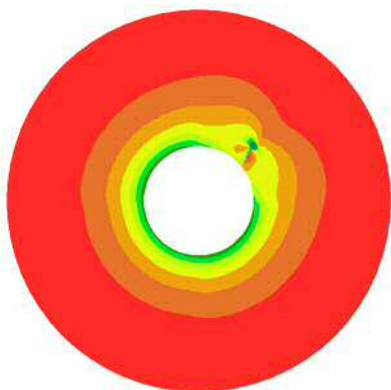
Рис. 4 – Контурные диаграммы распределения в образце напряжений  $\sigma_{xx}$  (а),  $\sigma_{yy}$  (б),  $\tau_{xy}$  (в),  $\tau_{max}$  (г).



а



б



в

Рис. 5 – Контурная диаграмма распределения в образце главных напряжений  $\sigma_1$  (а),  $\sigma_2$  (б) и эффективных напряжений  $\sigma_{эфф}$  (в).

Для модели А расчет коэффициентов интенсивности напряжений  $K_I$  та  $K_{II}$  выполнен на основе определения J-интеграла:

### Выводы.

Изучены модели трещин нормального отрыва (режим I) и смешанного режима I/II (отрыв со сдвигом) при различных условиях формирования

J-INTEGRAL COMPONENTS (Crack tip axes, p.unit thickness):

CASE:	JI	JII
Total	0.3858E-03	0.9855E-04
1	0.3858E-03	0.9855E-04
2	0.000	0.000
3	0.000	0.000
4	0.000	0.000
5	0.000	0.000
6	0.000	0.000

STRESS INTENSITY FACTORS:

CASE:	KI	KII
Total	-1.003	-0.5072
1	-1.003	-0.5072
2	0.000	0.000
3	0.000	0.000
4	0.000	0.000
5	0.000	0.000
6	0.000	0.000

нагрузки на поверхности отверстия в образце (гидростатическое и равномерно-периодическое) и при разных длинах трещины и углах расположения относительно поверхности.

Установлено, что при рассмотрении распространения произвольных трещинных дефектов от поверхности отверстия независимо от начальной их ориентации, возможно установление показателей трещиностойкости для I-го режима и без искусственного начального надреза, поскольку дальнейшее развитие дефекта 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.

Для различных типов трещин предложены зависимости для определения коэффициентов интенсивности напряжений  $K_{IC}$  и  $K_{IIC}$  и эффективной поверхностной энергии  $\gamma$ .

### **Література.**

1. Декларацийний патент на корисну модель №39916 (опубл. 25.03.2009, бюл. № 6). МПК (2006) G01N 3/00 / Бачурін Л. Л., Рєвва В. М., Кольчик Є. І. / Інститут фізики гірничих процесів НАН України.
2. Рац М. В., Чернышев С. Н. Трещиноватость и свойства трещиноватых горных пород. – М.: Недра, 1970. – 164 с.
3. FRANC2D. A Two Dimensional Crack Propagation Simulator. User's Guide. Version 3.1 / P. Wawrzynek, A. Ingraffea. – Cornell University, 1993.

УДК 622.83

НОСАЧ А.К., РЯЗАНЦЕВ Н.А., КОДУНОВ Б.А, ВАЩЕНКО В.И.,  
РЯЗАНЦЕВА Н.А, ЛЯЩЕНКО М.А<sup>1</sup>

### **ВЛИЯНИЕ СОВРЕМЕННЫХ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ О ГОРНОМ МАССИВЕ НА РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ ГОРНОЙ ГЕОМЕХАНИКИ**

*Розглянуто сучасні уявлення про напружено-деформований стан масиву гірничих порід та їх вплив на ефективність рішення задач гірничої механіки.*

Успешное решение технологических проблем горного производства во многом определяется адекватностью наших представлений о напряженно-деформированном состоянии массива горных пород и физических процессах, происходящих в нем. Между тем, практика последних десятилетий показыва-

---

<sup>1</sup> КИИ ДонНТУ