

АНАЛИЗ РАЗРУШЕНИЯ ТРАНСТРОПНОГО МАССИВА ВОКРУГ ВЫРАБОТКИ ВДОЛЬ И ВКРЕСТ СЛОЕВ ПЛОСКОСТИ ИЗОТРОПИИ

Нами проведены специальные исследования по особенностям моделирования трещины с помощью МКЭ и созданы некоторые собственные программные средства, которые апробированы на тестовой задаче. Для этого выбрана задача Бови /1/, которая имеет аналитическое и конечноэлементное решение, полученное А.А. Сейнасиновой /2/:

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi l} F(l/r) \quad (1)$$

Здесь r - радиус отверстия, l - длина трещины. Данная задача является единственной, которая моделирует трещину, исходящую из контура в подземном сооружении (табл. 1)

Таблица 1

Аналитические значения функции $F(l/r)$ для одной щели

l/r	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,8	1,0
$F(l/r)$	2,73	2,30	2,04	1,86	1,73	1,47	1,37

Приведем алгоритм численного решения КИН1 K_{1C} по прямому методу вычисления по Ирвину:

$$K_I = \sigma_y \sqrt{2\pi/l^*} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 + \sin \frac{\theta}{2} + \sin \frac{3\theta}{2}\right),$$

$$K_I = U_x \mu \sigma_y \sqrt{2\pi/l^*} \cos \frac{\theta}{2} (1 - 2\nu + \sin^2 \frac{\theta}{2}), \quad (2)$$

где θ - угол между осью трещины и координатной осью Ox , $\mu = E/2(1+\nu)$ - модуль сдвига, $l^* = l+r$ (l - длина трещины, r - малое расстояние перед кончиком трещины, которое вычисляется по Ирвину).

Наш опыт применения этих методов показывает, что более надежным в МКЭ оказывается прямое вычисление КИН1 (K_I) с помощью соотношений (2).

В целях сравнительных оценок удобства применения и точности вычислений вышеупомянутого метода выбрана задача Бови с применением восьмиузлового изопараметрического элемента. Расчетная область содержит для задачи Бови 5832 элементов и 17892 расчетных узлов. Здесь же показаны

геометрия и граничные условия задачи. Модуль Юнга $E=1.0 \cdot 10^4 \text{ МПа}$, коэффициент Пуассона $\nu=0,2$.

На рис. 1 приведена расчетная схема задачи Бови о трещине, исходящей из кругового отверстия в бесконечной пластине, подверженной одноосному растяжению (рис. 1, б).

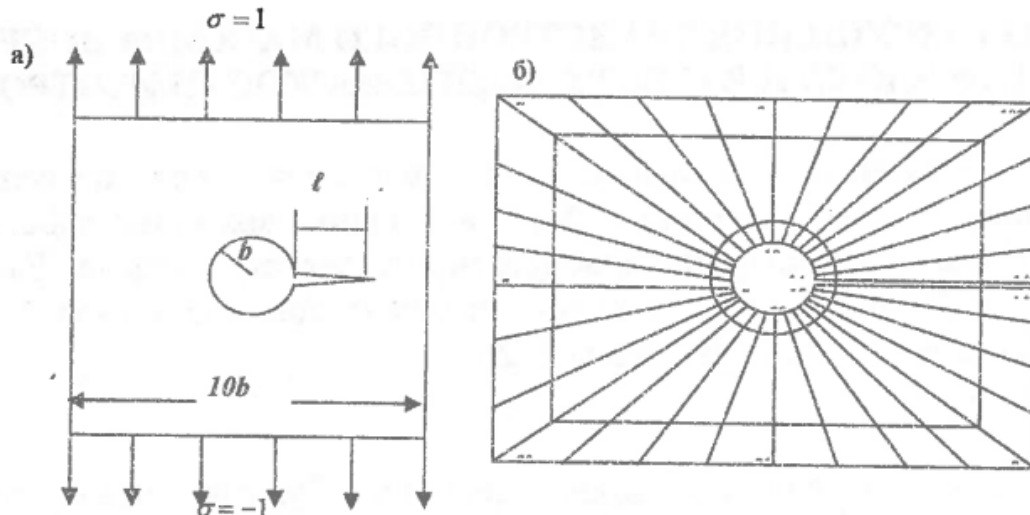


Рис. 1. Расчетная схема для тестирования задачи механики трещин

В табл. 2 приведены значения КИН1, полученные аналитическим методом Ирвина, с применением треугольного элемента [2] и с применением восьмиузлового изопараметрического элемента автором настоящей работы.

Таким образом, зная преимущества и недостатки того или другого подхода в МКЭ, можно умело их использовать при расчетах задач механики разрушения.

Таблица 2

Вычисленные значения КИН1 аналитическим методом по формуле (2) и по МКЭ с применением элементов в форме треугольника и восьмиузлового изопараметрического четырехугольника для трещины на контуре кругового отверстия

№	l/r	Аналитическое решение (Дж. Ирвин)	Треугольник (А.А. Сейнасинова)	Четырехугольник (Настоящая работа)
			по σ_y	по σ_y
1	0,10	1,52	1,51	1,52
2	0,20	1,82	1,82	1,81

3	0,30	1,98	1,97	1,96
4	0,40	2,05	2,06	2,04
5	0,50	2,16	2,16	2,15
6	0,80	2,32	2,33	2,31
7	1,00	2,42	2,44	2,43

Многочисленные данные наблюдений и натурных измерений параметров трещин вокруг контура горных выработок показывают, что их тип, характер и линейные размеры меняются в широком диапазоне. Пожалуй, такие наиболее полные систематизированные, классифицированные по трем порядкам с указанием ориентировок протяженности и степени раскрытия трещин в горных породах имеются в работе /3/ (табл. 3).

Таблица 3

Характеристика пород по трещиноватости

Порядок	Характеристика и генезис трещин	Протяженность трещины, м	Раскрытие, м	Расстояние между трещинами, м	Преимущественное ориентирование
Первый	Внутрикристаллические вакансии, дислокации, полости	$10^{-9}-10^{-2}$ ($10^{-6}-10$ мм)	$10^{-9}-10^{-5}$ ($10^{-6}-10^{-2}$ мм)	$10^{-8}-10^{-9}$ ($10^{-5}-10^{-6}$ мм)	Беспорядочное
Второй	Межкристаллические трещины между кристаллами, трещины в цементе Эндогенные	$10^{-4}-10^{-2}$ ($10^{-1}-10$ мм)	$10^{-6}-10^{-3}$ ($10^{-3}-10^0$ мм)	$10^{-5}-10^{-2}$ ($10^{-2}-10$ мм)	Беспорядочное, за исключением сланцеватых пород
	(разрыв)				тых пород

	Трещины остывания и усыхания	$10^{-1}-10^0$ (10^2-10^3 мм)	$10^{-5}-10^{-3}$ ($10^{-2}-10^0$ мм)	$10^{-1}-10^0$ (10^2-10^3 мм)	Перпенди- кулярно к напласто- ванию
	Трещины накопления осадков	$10^{-1}-10^3$ (10^2-10^6 мм)	$10^{-6}-10^{-4}$ ($10^{-3}-10^{-1}$ мм)	$10^{-1}-10^0$ (10^2-10^3 мм)	Параллельно напласто- ванию
Третий	Трещины выветривания	10^0-10^2 (10^3-10^5)	$10^{-3}-10^{-1}$ (10^0-10^2)	$10^{-1}-10^0$ (10^2-10^3)	Параллель- но обнаже- нию По первичным трещинам
		$10^{-1}-10^{-2}$ (10^2-10^1)	$10^{-5}-10^{-1}$ ($10^{-2}-10^2$)	$10^{-2}-10^0$ (10^1-10^3)	

Анализируя данные табл. 3 /3/, заметим, что, во-первых, длины и ширины раскрытия трещины меняются от микрона до километров и, во-вторых, в зависимости от характеристик и генезиса они распространяются в некоторых породах беспорядочно, или перпендикулярно, или параллельно напластованию, то есть плоскости изотропии, когда массив является слоистым.

Эти данные необходимы для сравнения полученных нами новых результатов определения закономерностей распространения трещин раздробленных в горизонтально-слоистом транстропном массиве.

Изложим адаптированный алгоритм применения критерия разрушения Казагранде-Каррило применительно к направлению распространения трещины между направлениями вдоль и вкрест слоев плоскости изотропии (ϕ'), который показан на рис. 2.

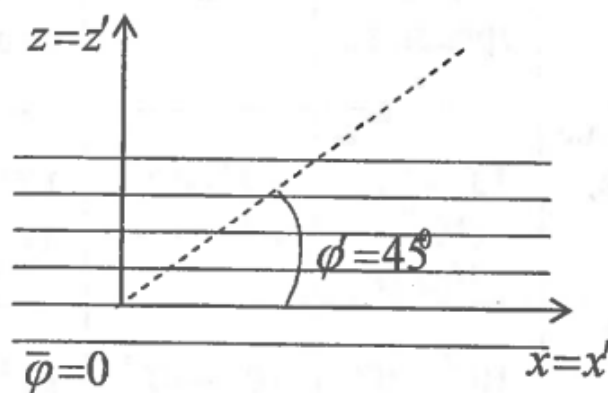


Рис. 2. ϕ' - угол между направлениями вдоль и вкрест слоев плоскости изотропии

Для угла φ' , определяющего площадку скольжения, прочность горных пород для транстропного массива по критерию Казагранде-Каррило запишем применительно к условиям данной задачи в виде /4/

$$\tau_{\varphi'} = \tau_{\max, \perp} + (\tau_{\max, \parallel} - \tau_{\max, \perp}) \cos^2 \varphi', \quad (3)$$

где $\tau_{\max, \parallel}$, $\tau_{\max, \perp}$ - экспериментально определяемые критические значения горных пород слоистого строения, где $0 \leq \varphi' \leq 90^\circ$.

Проведены расчеты для глубин заложения выработки от 100 метров земной поверхности до 1000 м вниз в вертикальном направлении с шагом 100 м. Анализ результатов показывает, что до глубины 400 метров, хотя вокруг контура выработки появляются концентрации напряжений, пластические зоны, но зоны обрушения не возникают (табл. 4).

На глубине 400 метров далеко от контура в области свода только в двух элементах появлялись мелкие трещины в направлении вкрест к плоскости изотропии горизонтального слоистого угольного пласта. Начиная с глубин 500 метров уже появляется заметное количество раздробленных пород.

Сравнение с данными табл. 3 еще раз подтверждает достоверность полученных нами результатов.

Из-за того, что механизм образования раздробления пород вокруг выработки в угольном пласте горизонтально слоистого строения слишком сложен, покажем их в отдельности в направлениях вдоль, вкрест слоев и между ними.

В соответствии с обобщенными для анизотропной среды алгоритмами вычислены длины и ширины раскрытия трещин. Но из-за сложности представления в виде картин их значения отдельно вынесены в табл. 4.

Поэтому на нижних рисунках показаны механизмы трещинообразования в направлениях вдоль, в плоскостях изотропии слоев и под углом.

На глубине 500 метров разрушения угольного пласта (размеры пласта 20x20 м) в перпендикулярном направлении начинаются в висячей области кровли далеко от контура выработки в направления вкрест к плоскостям изотропии (рис. 3, а). В то же время в этих зонах трещины распространяются и вдоль слоев (рис. 3, б).

Таблица 4

Значения длины и ширины трещин, распространяющихся вдоль и вкрест слоев плоскости изотропии угольного пласта, размером 6x6 м вокруг контура незакрепленной выработки при геостатической нагрузке

Номера элемен- тов	Трещина II слоям		Номера элемен- тов	Трещина ⊥ слоям		Номера элемен- тов	Трещина под углом $\varphi' = 45^{\circ}$	
Параметры трещины								
	Гориз длина, см	Гориз. ширина, см		Ширина см	Длина, См		длина, см	ширина, см
				Верт	Верт			

500м								
236	9,26	8,52	1484	1,14	5,53	146	0,91	3,71
290	8,29	6,82	312	1,68	8,12	155	1,45	5,81
311	7,38	5,41	344	1,91	9,26	171	2,31	7,77
1496	6,30	3,95	362	2,00	9,66	188	4,51	8,68
1537	5,02	2,51	1513	2,08	10,04	213	7,92	9,41
1372	30	1,36	1322	2,15	10,42	254	8,11	10,38
1000м								
1533	3,33	1,10	99	1,70	13,72	994	0.40	4,66
1424	5,24	2,73	297	1,84	18,64	1370	1.26	14,73
967	6,35	3,01	230	1,90	20,30	1008	1.74	15,71
216	7,08	3,98	145	1,98	21,12	1022	5.25	18,03
178	8,93	4,93	132	2,05	21,85	1036	11.40	20,05
166	9,17	5,35	108	2,15	22,01	1050	20.99	21,15

На рис. 3, в показано направление распространения трещины под углом $\phi' = 45^\circ$. Характерное трещинообразование под углом наблюдается в висячих областях свода.

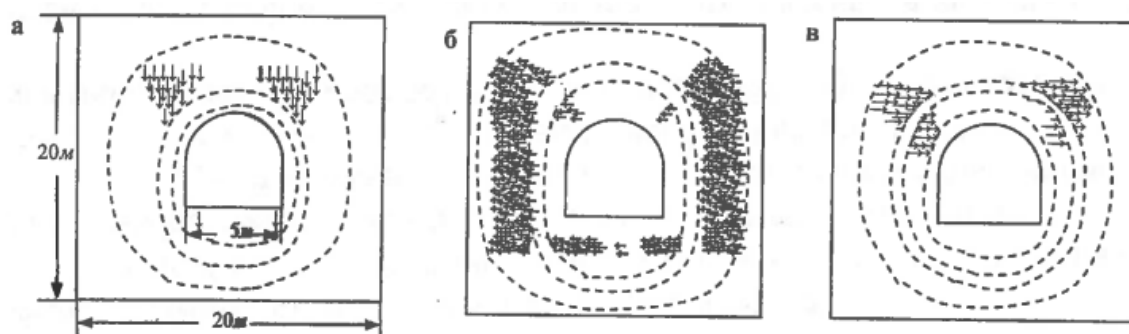


Рис. 3. Механизм трещинообразования вокруг контура незакрепленной выработки на глубине 500 м в угольном пласте размером 20х20 м от сдвигающих напряжений:

а - перпендикулярно слоям (вкрест); б - параллельно слоям (вдоль); в - под углом $\phi' = 45^\circ$

С помощью разработанных критериев и алгоритма выяснены некоторые механизмы трещинообразования вокруг контура незакрепленной горной выработки, находящегося в транстропном массиве неоднородного строения.

Список литературы

1. Справочник по коэффициентам интенсивности напряжений / Под ред. Ю. Мураками. – Т.2. – М.: Мир, 1990. – С. 450-1014.
2. Сейнасинова А.А. Анализ некоторых решений тестовых задач механики разрушения методом конечных элементов // Труды межд. конф «Современные проблемы механики». – Алматы, 2001. – С. 213-216.
3. 3. Ржевский В.В., Новик Г.Я. Основы физики горных пород. – М.: Недра, 1978. – 390 с.
4. 4. Casagrande A., Corrillo N. Shear failure of anisotropic materials. J. Boston Soc. Civ. Eng., 1944, №31, p. 74-87.