

## ЗАДАЧА О МЕХАНИЗМЕ РАЗРУШЕНИЯ ТРАНСТРОПНОГО МАССИВА ВБЛИЗИ КОНТУРА ПОДЗЕМНОГО СООРУЖЕНИЯ

**БАЙМАХАН Р.Б.,\* РЫСБАЕВА Г.П.,\*\* КОЖОГУЛОВ К.Ч.\*\*\***

*Институт сейсмологии,\* Академия министерства внутренних дел,\*\* г. Алматы,*

*Институт геомеханики НАН КР\*\*\**

[izvestiya@ktu.aknet.kg](mailto:izvestiya@ktu.aknet.kg)

*Критерии механики разрушения обобщаются применительно к анизотропной среде. На основе полученных критериев исследуются типы и механизмы разрушения горизонтально – слоистого анизотропного массива вблизи контура горной выработки. Устанавливаются закономерности образования и развития пластических зон и механизмы трещинообразования вдоль и перпендикулярно слоям плоскости изотропии вблизи контура подземной выработки на различных глубинах заложения.*

Ежегодно во всем мире на шахтах под землей погибают сотни, а иногда и до тысячи шахтеров из-за взрывов и разрушений. Причиной взрывов являются внезапные выбросы метана и вследствие горных ударов опорного давления, возникающие в призабойной частях в выработках. Вследствие промышленных взрывов в одних горизонтах, из-за волновой нагрузки наступает разрушения в выработках в других горизонтах. В момент затишья происходят также внезапные выбросы угля и других видов горных пород из-за миграций концентраций полей механических напряжений.

Обычно размеры области горных работ составляют от сотен метров до нескольких километров. Ранее читалось, что капитальные горные выработки не попадают в зону влияния очистных работ. При познаниях геомеханической ситуации на сегодня такое мнение можно считать ошибочным /1/. Технические мероприятия, направленные на снижение напряжений в окружающем массиве и крепи выработок при разработке рудных месторождений, должны учитывать вторичное поле напряжений, вызванное образованием выработанного пространства. В зависимости от деформационно-прочностных характеристик пород, непосредственно примыкающих к контуру выработки, могут иметь место различные виды деформации пород на контуре или их разрушение /1/.

В плане научных исследований решение таких проблем все еще до конца не изучены в практическом плане. Следствием этого является подтверждение того, что непрерывно продолжаются гибели людей, работающих в подземных сооружениях различного назначения.

Только в одном Казахстане и только в последние годы в Карагандинских шахтах Казахстана погибли в 2006 году -43 и в 2008 году 32 шахтера /2/.

Число жертв взрыва на шахте в Китае достигло 161 человека 30 ноября 2005 /2/.

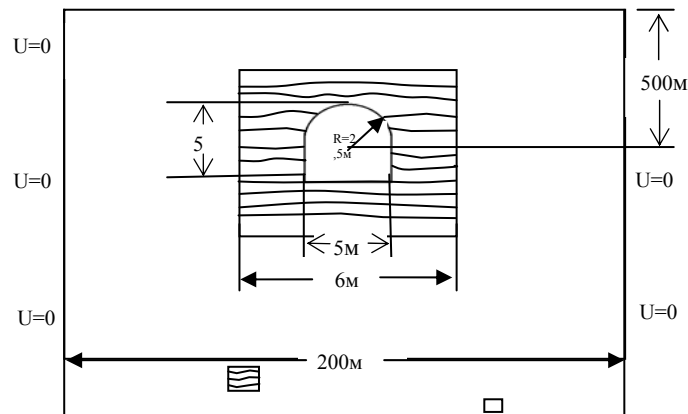
В результате взрыва в шахте Шаньси в 09.12.2007 г. погибло 105 шахтеров /2/, а 22-февраля 2009г погибли еще 74 человек.

25 июня 2006г., на шахте "Комсомольская" ОАО "Воркутауголь" произошел взрыв метана и задымление конвейерного штрека 722с пласта "Мощный" на глубине 800 метров. На момент происшествия в шахте находились две смены, в количестве - 277 шахтеров. В аварии погибли восемь человек: шесть проходчиков /2/.

24-мая в 2007г., при взрыве на шахте «Юбилейная» в Кемеровской области погибли 33 человека/2/. Такие внушительные цифры о трагедиях за короткое время заставляют думать о причинах продолжающихся катастроф и развивать, совершенствовать существующих методов научного подхода и расчетов по обеспечению их устойчивости. Еще не совсем известны величины изменения полей напряжений в массиве, когда рудное тело вокруг выработки имеет слоистое строение и различные геометрические размеры на разных глубинах.

Рассмотрим закономерности появления механических концентраций напряжений, образования зон пластичности, а также возможные механизмы трещинообразования и разрушения вблизи контура подземной выработки. Допустим рудное тело, занимает ограниченное пространство. Например, высота и ширина угольного пласта имеет размеры 6х6м, 20х20м и 20х200м. Глубина заложения варьируется от 100 до 1000м. Когда угольный пласт имеет горизонтально слоистое строение, то есть анизотропную структуру, необходимо разработать критерии, определяющие характер разрушения вдоль слоев и перпендикулярно слоям изотропии.

Разработанная для этой задачи расчетная схема исследуемой области горной выработки и ее характерные размеры с граничными условиями показаны на рисунке 1. Область разбита на 5832 восьми узловых изопараметрических элемента с общим количеством узлов 17892, количество уравнений составляет 35329.



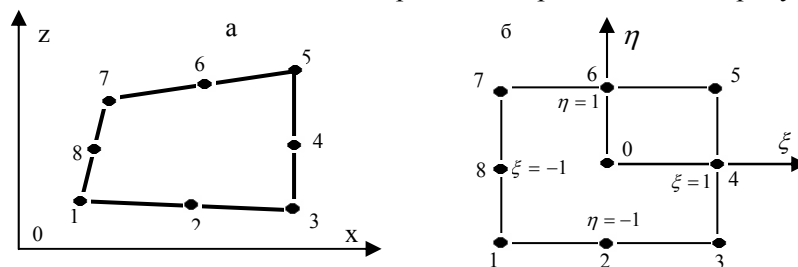
**Рис.1. Подземная горная выработка: - угольный пласт; - скальная порода**

Физико-механические свойства для рудного тела и скального массива приведены в таблице 1, 3, 4.

**Таблица 1**

Материал	$\sigma_{\text{нечод}}$		$\sigma_{\text{двчод}}$		$E_1$ МПа	$E_2$ МПа	$G_2$ МПа	$\nu_1$	$\nu_2$	$\varepsilon$ МПа	$\varphi$	$\gamma$
	$E_1$	$E_2$	$E_1$	$E_2$								
Угольный пласт	12-23	7-16	5	5	0,54	0,25-0,52	0,20	0,27-0,39	0,22-0,44	8,6	28	2,3
Материал	$E, 10^{-5}(\text{кг/см}^2)$		$\nu$	$\gamma (\text{Т/м}^3)$	$C$ ( $\text{кг/см}^3$ )	$\varphi$	$\sigma_{\text{нечод}}$	$\sigma_{\text{двчод}}$	$\tau_{\text{ндвч}}$			
Алевролит мелкозернистый	1,52		0,21	2,60	110	31	420-485	35	90			

Данная задача решена методом конечных элементов с применением восьмиузлового изопараметрического конечного элемента 2-го порядка, который показан на рисунке 2.



**Рис. 2. Четырехугольный изопараметрический восьмиузловой элемент 2-го порядка: а – в декартовой  $xOz$ , б- местной  $\xi O\eta$  системах координат**

Составляем матрицу жесткости элементов и системы с применением известных уравнения равновесия МКЭ

$$[R] \{U\} = \{F\}, \quad (1)$$

$$\{\varepsilon\} = [B] \{U\}, \quad (2)$$

$$\{\sigma\} = [D] \{\varepsilon\}, \quad (3)$$

где R- матрица жесткости системы,  $\{U\}$  - вектор неизвестных перемещений,  $\{F\}$  - вектор геостатических сил,  $\{B\}$  - матрица базовых функций,  $\{D\}$  - матрица упругих характеристик.

После решения системы уравнений равновесия (1) итерационным методом Гаусса-Зейделя становятся известными компоненты перемещений  $u, \vartheta$ . Компоненты

деформаций  $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_{xy}, \varepsilon_{yz}, \varepsilon_{zx}$  и напряжений  $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$  для всей расчетной области вычисляются с помощью выражений (2) и (3). Для анализа распределения концентраций нормальных тангенциальных напряжений  $\sigma_\theta^n, \tau_{r\theta}^n$  на контуре выработки их декартовы значения вычисляются в полярных координатах. Значения напряжений на главных площадках  $\sigma^n, \sigma^t, \tau^n$  вычисляются с помощью максимальных и минимальных напряжений. Пластические зоны вокруг выработок определены предельным переходом по условию Кулона-Мора

$$|\tau^n| \geq \sigma^n \operatorname{tg} \varphi + c, \quad (4)$$

где  $\operatorname{tg} \varphi$  - коэффициент внутреннего трения,  $c$  - сила сцепления.

Под механизмом разрушения понимается: во-первых, вязкий или хрупкий тип разрушений; во-вторых, выявления закономерности распространения трещин по слоям плоскости изотропии и перпендикулярно к ним.

Упругая энергия  $A_E$ , запасенная в породе в результате действия внешней нагрузки и необходимая для образования трещины, равна /5/.

$$A_E = \frac{\pi}{E} l^2 \sigma^2. \quad (5)$$

Трещина будет расти, если

$$\frac{\partial A_E}{\partial l} > \frac{\partial A_S}{\partial l}. \quad (6)$$

Критическое состояние трещины характеризуется равенством  $\frac{\partial A_E}{\partial l} = \frac{\partial A_S}{\partial l}$ ,

$$\text{откуда } \sigma_{\text{расч}} = \sqrt{\frac{2Ee_s}{\pi l}}, \quad (7)$$

где  $E$  - модуль Юнга;  $l$  - длина трещины;  $2e_s$  - удельная поверхностная энергия, затрачиваемая для образования двух поверхностей трещин по Гриффитсу.

Для изотропного массива имеются следующие критерии, определяющие характер разрушения /5/:

$$\tau_{\max} = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} \quad (8)$$

$$m = \frac{\tau_{\max}}{\sigma_{\max}}. \quad (9)$$

Если  $m < \frac{\tau_{\max}}{\sigma_{\max}}$  - то хрупкое разрушение.

Если  $m > \frac{\tau_{\max}}{\sigma_{\max}}$  - то вязкое разрушение.

Хрупкий или пластический тип разрушения определяется соотношением  $m$  между касательными и нормальными напряжениями, возникающими в породе.

Эти известные критерии, полученные для изотропной среды, распространим для анизотропного массива.

Для трансотропного массива в случае распространения трещины вдоль слоев ( $V$ ) к плоскости изотропии выражение (6) запишем в следующем виде:

$$m^V = \frac{\tau_{\max}^V}{\sigma_{\max}^V} \quad (7)$$

и для случая, когда трещина распространяется перпендикулярно к слоям ( $P$ ) плоскости изотропии, получим

$$m^P = \frac{\tau_{\max}^P}{\sigma_{\max}^P}. \quad (8)$$

Растягивающее напряжение (7) для раскрытия трещины вдоль и перпендикулярно слоям имеет следующий вид

$$\sigma_{\text{раст}}^V = \sqrt{\frac{2E_1 e_s}{\pi l}} \quad (9)$$

$$\sigma_{\text{раст}}^P = \sqrt{\frac{2E_2 e_s}{\pi l}} \quad (10)$$

Если  $m^V < \frac{\tau_{\text{сдв}}^V}{\sigma_{\text{раст}}^V}$ , то происходит хрупкое разрушение вдоль слоев плоскости изотропии трансформного массива;

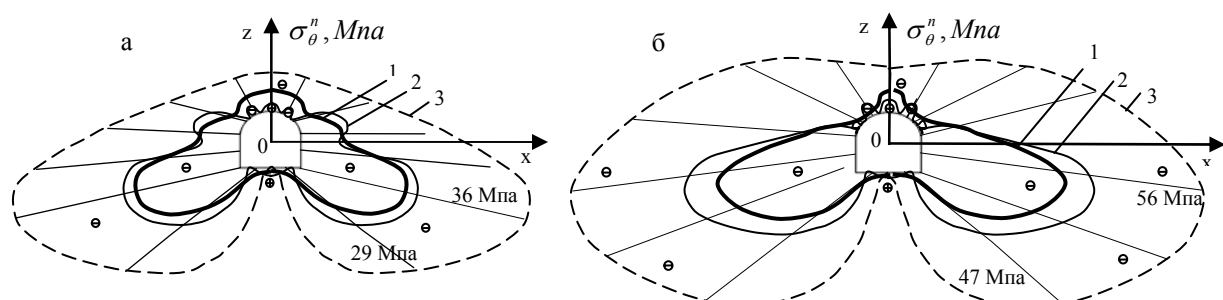
при  $m^P < \frac{\tau_{\text{сдв}}^P}{\sigma_{\text{раст}}^P}$ , разрушение происходит перпендикулярно к слоям плоскости изотропии.

Если  $m^V > \frac{\tau_{\text{сдв}}^V}{\sigma_{\text{раст}}^V}$ , то происходит вязкое разрушение вдоль слоев плоскости изотропии трансформного массива;

при  $m^P > \frac{\tau_{\text{сдв}}^P}{\sigma_{\text{раст}}^P}$ , вязкое разрушение происходит перпендикулярно к слоям плоскости изотропии.

Полученные результаты по определению области упругих концентраций напряжений, пластических зон и зон разрушения представлены в виде эпюр на рисунках 3, 4, 5, 6. Проведен анализ глубины заложения горной выработки от 100 до 1000м от свободной земной поверхности с шагом 100м. Результаты исследований показывают, что вокруг выработки до глубины 400м разрушение массива не происходит. Поэтому на рисунках для сравнительного анализа представлены результаты для глубин 500 и 1000м.

Анализ эпюр  $\sigma_{\theta}^n$  на рисунке 3 показывает, что с увеличением глубины заложения выработки увеличиваются значения концентрации нормальных тангенциальных напряжений. В нижних угловых областях выработки появляются наибольшие сжимающие напряжения, а на своде и почве контура заметны небольшие растягивающие напряжения.

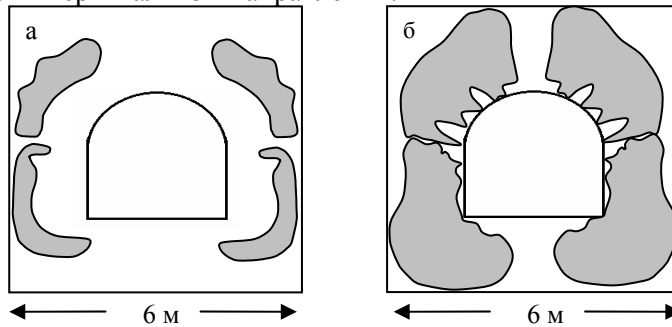


**Рис. 3. Эпюры окружных нормальных тангенциальных напряжений  $\sigma_{\theta}^n$ , Г- на внутреннем контуре, 2- на внешнем контуре угольного пласта и 3- на контуре скальной породы, для глубины заложения выработки: а - 500м; б- 1000м.**

Пластические зоны появятся вокруг выработки в угольном пласте на различных расстояниях от контура. С увеличением глубины заложения, пластические зоны приближаются к контуру выработки (рис 4).

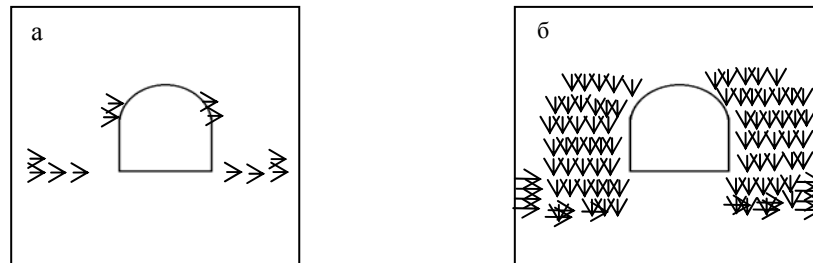
На рисунке 5 показаны типы характера разрушения угольного массива горизонтально-слоистого строения. Стрелками показаны зоны трещинообразования вокруг выработки в угольном пласте. Направления указывают распространения трещины вдоль и перпендикулярно слоям. На глубине 500м образуются незначительное количество трещин на висящем и лежащем боках выработки, которые распространяются вдоль слоев угольного пласта. С увеличением глубины до

1000м, увеличиваются зоны разрушения в основном в боковых сторонах выработки, которые распространяются в вертикальном направлении.



**Рис. 4. Пластические зоны, которые образуются в массиве вокруг контура горной выработки на глубине: а- 500м, б- 1000м**

При действии сжимающей нагрузки трещины смыкаются и на их поверхности появляются силы трения. Так как на глубине 1000м в боковых областях величины сжимающих напряжений намного превосходят растягивающих ( $\sigma_{сж} > \sigma_p$ ), поэтому на своде в висячих областях преобладает сильные трещинообразования в перпендикулярных направлениях к слоям. В то же время на лежащих боках наблюдается распространение трещин одновременно как перпендикулярно, так и вдоль слоев.



**Рис. 5. Тип механизма разрушения при глубине заложения: а-500м; б-1000м. Стрелки показывают направлению распространения трещины:  
→ вдоль слоев, ↓ - перпендикулярно слоям**

Величина удельной энергии, которая затрачивается, для образования трещин определяется выражением /6-10/

$$e_s = \frac{1-\nu^2}{2E} K_{IC}^2. \quad (11)$$

Длина распространения трещины вычисляется следующим выражением /10/

$$l = \frac{2Ee_s}{\pi(1-\nu^2)\sigma^2}. \quad (12)$$

Подставляя выражение (11) в (12) получаем

$$l_c = \frac{K_{IC}^2}{\pi\sigma_n^2}. \quad (13)$$

Это выражение определяют длину трещины в изотропной среде. Для вычисления длины трещин распространяющихся вдоль и перпендикулярно слоям в трансотропной среде, выражение (13) представим в виде

$$l_c^P = \frac{K_{IC}^P}{\pi\sigma_n^2}, \quad (14)$$

$$l_c^V = \frac{K_{IC}^V}{\pi\sigma_t^2}. \quad (15)$$

В механике разрушения раскрытие трещины в изотропной среде определяется выражением

$$\delta = \frac{J}{m\sigma^T}, \quad (16)$$

где  $m = \sqrt{3}$  - параметр, зависящий от пластического стеснения деформационного упрочнения.

$$J = \frac{1-\nu^2}{E^2} K_{IC}^2. \quad (17)$$

Подставляя выражение (17) в (16) окончательно получим формулу раскрытия трещины в виде

$$\delta = \frac{(1-\nu^2)K_{IC}^2}{m\sigma^T}. \quad (18)$$

Для трещин распространяющихся вдоль и перпендикулярно к слоям в анизотропной среде выражение (18) представим в виде

$$\delta_C^P = \frac{(1-\nu^2)(K_{IC}^P)^2}{m\sigma_n} \quad (19)$$

$$\delta_C^V = \frac{(1-\nu^2)(K_{IC}^V)^2}{m\sigma_t} \quad (20)$$

В таблице 2 приведены результаты вычислений по определению длины и ширины трещины образованные от сжимающих, растягивающих и сдвигающих напряжений вдоль и перпендикулярно слоям изотропии для глубин 500 и 1000м.

Полученные данные показывают, что наибольшая длина трещины появляется от растягивающих напряжений в вертикальном направлении. Во всех рассмотренных вариантах ширина раскрытия трещины наибольшего значения достигает в горизонтальном направлении, то есть перпендикулярно к слоям.

**ВЫВОДЫ:** Поставлена задача механики разрушения анизотропного массива вокруг горной выработки.

1. Известные критические критерии механики разрушения обобщены для решения задач трещинообразования в анизотропном массиве вокруг горной выработки.
2. Установлены закономерности образования пластических зон в трансформном массиве вблизи контура выработки.
3. Разработана методика и решена задача об определений механизма распространения трещин вдоль и перпендикулярно слоям в горизонтально-слоистом массиве вблизи контура выработки.

**Таблица 2**

500м							
Трещина от сжимающих напряжений		Трещина от растягивающих напряжений				Трещина от сдвигающих напряжений	
Длина трещины, м	Ширина трещины, м	Длина трещины, м		Ширина трещины, м		Длина трещины, м	Ширина трещины, м
		Вертикальная длина трещины	Горизонтальная длина трещины	Вертикальная ширина трещины	Горизонтальная ширина трещины		
0.09127	0.008280	0.18443	0.04611	0.0089239	0.02516	-	-
0.08099	0.006520	0.18821	0.04705	0.0091068	0.02567	-	-
0.08119	0.006551	0.20689	0.05172	0.0100106	0.02822	-	-
0.08988	0.008029	0.21120	0.05280	0.0102193	0.02881	-	-
0.09088	0.008209	0.16796	0.04199	0.0081267	0.02291	-	-
1000м							
Трещина от сжимающих напряжений		Трещина от растягивающих напряжений				Трещина от сдвигающих напряжений	
Длина трещины, м	Ширина трещины, м	Длина трещины, м		Ширина трещины, м		Длина трещины, м	Ширина трещины, м
		Вертикальная длина трещины	Горизонтальная длина трещины	Вертикальная ширина трещины	Горизонтальная ширина трещины		

0.07339	0.005354	0.020325	0.098342	0.005081	0.002772	0.036740	0.003154
0.09137	0.008298	0.018248	0.088296	0.004562	0.002489	0.054476	0.004676
0.07840	0.006109	0.020234	0.097905	0.005059	0.002760	0.065869	0.005654
0.06914	0.004750	0.021445	0.103764	0.005361	0.002925	0.058551	0.005026
0.05696	0.003225	0.017035	0.082426	0.004259	0.002324	0.082869	0.007113

### Литература

1. Боликов В.Е., Константинова С.А. Прогноз и обеспечение устойчивости капитальных горных выработок.- Екатеринбург, 2003 - 373с.
2. Интернет ресурс: [www.weeksurvey.com/ content/view/2824/347/](http://www.weeksurvey.com/content/view/2824/347/)
3. Справочник физико-механических свойств горных пород.- КАДАСТР: М.: Недра, 1975 - 279с.
4. Булычев Н.С. Механика подземного сооружения.- М.: Недра, 1989. - 270с.
5. Ржевский В.В., Новик Г.Я. Основы физики горных пород.-М.: Недра, 1978. - 390с.
6. Сиратори М., Миеси Т., Мацусита Х. Вычислительная механика разрушения.- М.: Мир, 1986, 334с.
7. Никифоровский В.С., Шемякин Е.И. Динамическое разрушение твердых тел. –Новосибирск, 1979. - 271с.
8. Овчаренко В.П. Механизм трещинообразования в кровле угольных пластов. – Л., 1983. - 171 с.
9. Механика разрушения и прочность материалов. Справочное пособие. (Под редакцией. В.В.Панасюка в 4–х томах). – Киев.:Наукова Думка, 1988.–Т.2, 619с., Т.3, 435с.
10. Справочник по коэффициентам интенсивности напряжений. (Под редакцией. Ю Мураками). – М.: Мир, 1990. Т.2, с. 450–1014.
11. Слепян Л.И. Механика трещин. – Л., 1981,295с.
12. Партон В.З. Механика разрушения: от теории к практике.-М.: Наука, 1990,240с.

