

## КРИТЕРИИ РАЗРУШЕНИЯ КРЕПКИХ ВЯЗКИХ ПОРОД КОНИЧЕСКИМИ ДИСКОВЫМИ ИНСТРУМЕНТАМИ

Статья посвящена разработке критериев роста устойчивых трещин по смешанному механизму разрушения крепких горных пород дисковыми коническими инструментами. Адекватность результатов моделирования нагруженности конических дисковых инструментов при формировании магистральных устойчивых трещин подтверждена экспериментальными исследованиями.

**Ключевые слова:** нагруженность, дисковый инструмент, коэффициенты интенсивности напряжений, трещина отрыва, трещина сдвига.

Разрушение крепких горных пород магистральными трещинами нашло своё практическое применение в циклическом способе разрушения.

Циклический способ разрушения хрупких горных пород дисковыми инструментами, формирующими трещины нормального разрыва до 1,5 м, расширил применение механического способа на породы средней и выше крепости [1].

Разработка критериев роста магистральных трещин в хрупких породах под лезвием конических дисковых инструментов позволила установить влияние угла заострения, режимных параметров и коэффициента интенсивности напряжений первого рода на нагруженность дисковых инструментов [2], [3].

Производственные испытания шнековых исполнительных органов, оснащенных дисковыми инструментами, установили, что удельные энергозатраты растут с увеличением прочности и вязкости разрушаемого породного массива. Нагруженность конических дисковых инструментов в лабораторных условиях при разрушении вязких пород исследователями оценивалась на основе показателя хрупкости  $\chi = \sigma_{сж} / \sigma_p$ , где  $\sigma_{сж}$ ,  $\sigma_p$  – пределы прочности горной породы на одноосное растяжение и сжатие соответственно.

Для оценки процесса разрушения вязких крепких горных пород циклическим способом необходимы знания развития устойчивых магистральных трещин под лезвием конических дисковых инструментов, осуществляющихся по смешанному механизму разрушения – нормальному отрыву и поперечному сдвигу.

Целью настоящей работы является разработка критериев роста устойчивых трещин по смешанному механизму разрушения горных

пород дисковыми инструментами в процессе циклического нагружения.

Крепкие горные породы моделировались упругим полупространством с краевой прямоугольной трещиной. Схема, описывающая взаимодействие конического дискового инструмента с твердой породой, приведена на рисунке 1.

Напряженное состояние в окрестности трещины и раскрытие берегов трещины от приложенных усилий определялось на основе объемного метода разрывных смещений [1], [4]. Коэффициенты интенсивности напряжений первого и второго родов определялись асимптотическим методом [5] для точки С, изображенной на рисунке 1.

Коэффициенты интенсивности напряжений первого и второго родов для полупространства, нагруженного коническим дисковым инструментом, с краевой прямоугольной трещиной, в результате расчетов принимали следующий вид:

$$K_I = A \frac{\sin(\beta - \alpha)}{\sin \alpha} \cdot P \cdot \frac{\sqrt{\pi}}{S^{3/4}}, \quad (1)$$

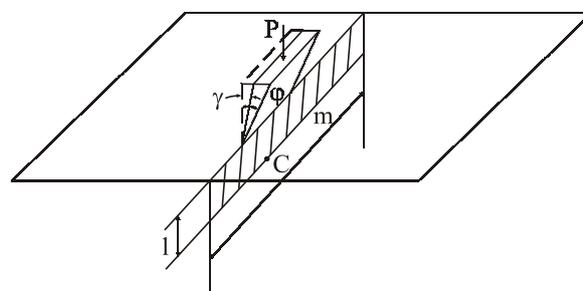


Рисунок 1. Схема взаимодействия конического дискового инструмента с горной породой

$$K_{II} = A \frac{\cos(\beta - \alpha)}{\sin \alpha} \cdot P \cdot \frac{\sqrt{\pi}}{S^{3/4}}, \quad (2)$$

где  $\alpha = \arctg \left[ \frac{\sin(\varphi - \gamma)}{\cos \varphi \cdot \cos \gamma} \right]$ , град.;

$\varphi$  – угол заострения конического дискового инструмента, ( $20^\circ \leq \varphi \leq 45^\circ$ ), град.;

$\gamma$  – задний угол ( $0^\circ \leq \gamma \leq 12^\circ$ ), град.;

$\beta = 72,43758$ , град.;

$A = 0.5019205$  – постоянная величина;

$K_I, K_{II}$  – коэффициенты интенсивности напряжений первого и второго родов соответственно, Н/м<sup>3/2</sup>;

$P$  – усилие, действующее на дисковый инструмент, Н;

$S = m \cdot \ell$  – площадь трещины, м<sup>2</sup>;

$m, \ell$  – геометрические размеры трещины, м.

Усилие  $P$ , действующее на ось конического дискового инструмента, представляет собой равнодействующую силу

$$P = (P_x^2 + P_y^2 + P_z^2)^{1/2},$$

где  $P_x, P_y, P_z$  – проекции вектора усилия на оси декартовой системы координат  $Ox, Oy, Oz$  соответственно.

Вычисляя производные по переменной  $S$  от равенств (1) и (2), получаем  $dK_I/dS < 0$ ,  $dK_{II}/dS < 0$ . Следовательно, магистральные трещины имеют устойчивый характер развития и для их дальнейшего роста требуется приращение внешней нагрузки.

Выражения (1) и (2) позволяют также определить функциональную взаимосвязь между отношением коэффициентов интенсивности напряжений  $K_{II}/K_I$  от углов заострения конического дискового инструмента:

$$\frac{K_{II}}{K_I} = \text{ctg}(\beta - \alpha). \quad (3)$$

В таблице 1 приведены результаты вычислений по выражению (3), из которых видно, что угол заострения дискового инструмента влияет на величину контактных нормальных и касательных усилий на лезвии дискового инструмента. Уменьшение угла заострения дискового инструмента приводит к большему нормальному раскрытию берегов трещины.

Экспериментальные и теоретические исследования разрушения горных пород кони-

ческими дисковыми инструментами в условиях повторно-блокированного режима разрушения установили [1], что магистральные трещины выходят на свободную обнаженную поверхность при условии  $\varphi \leq 38^\circ, \gamma = 0^\circ$ . В таблице 1 это соответствует численному значению  $K_{II}/K_I \leq 1,4584$ .

Исследования по разрушению коническими дисковыми инструментами породных блоков кварца ( $\sigma_{сж} = 126 \text{ МПа}, \sigma_p = 12 \text{ МПа}$ ), габбро ( $\sigma_{сж} = 114 \text{ МПа}, \sigma_p = 14 \text{ МПа}$ ), карбонатных пород ( $\sigma_{сж} = 79,5 \text{ МПа}, \sigma_p = 4,3 \text{ МПа}$ ) циклическим способом показали [6], что магистральные трещины формируются в горной породе для дисковых инструментов имеющих  $\varphi = 45^\circ, \gamma = 12^\circ$ .

Из вышеизложенного следует, что угол заострения  $\varphi = 45^\circ$  является предельной величиной, при которой формируется магистральная трещина нормального разрыва.

Анализ результатов экспериментальных и теоретических исследований, приведенных в таблице 1, позволяет прогнозировать формирование устойчивых магистральных трещин в хрупких горных породах по смешанному механизму, используя отношение коэффициентов интенсивности напряжений второго и первого рода в следующих пределах:

$$0,769 \leq K_{II}/K_I < 2.$$

Экспериментальные исследования по определению коэффициентов интенсивности напряжений показали [7,8], что для горных пород справедливо соотношение  $K_{IIc} = (2...3) \cdot K_{Ic}$ , где  $K_{Ic}, K_{IIc}$  – критические коэффициенты интенсивности напряжений, являющиеся константа-

Таблица 1. Влияние угла заострения дискового инструмента на величину отношения  $K_{II}/K_I$

$\varphi$ , град.	$\gamma$ , град.	$\alpha$ , град.	$K_{II}/K_I$
20	0	20	0,7690
25	0	25	0,9183
30	0	30	1,0937
35	0	35	1,3062
38	0	38	1,4584
40	0	40	1,5735
45	0	45	1,9261
30	10	21,8519	0,8218
40	10	33,5353	1,2392
45	10	39,4774	1,5422
40	12	32,0689	1,1763
45	12	38,2180	1,4704

ми материала. Из этого следует, что для разрушения вязких крепких пород по смешанному механизму должно выполняться условие:

$$K_{IIc} / K_{Ic} \geq 2.$$

В результате элементарных преобразований соотношений (1) и (2), получаем математическую модель нагруженности на коническом дисковом инструменте при формировании краевой прямоугольной магистральной трещины в полупространстве, учитывающую одновременно участие механизмов нормального отрыва и поперечного сдвига:

$$P = \frac{S^{3/4}}{A \cdot \sqrt{\pi}} \cdot \sin \alpha \cdot (K_I^2 + K_{II}^2)^{1/2}. \quad (4)$$

Приведенная модель (4) позволяет выявить четыре зоны развития магистральных устойчивых трещин для смешанного механизма разрушения горных пород:

- нормальный отрыв ( $K_I = K_{Ic}$ ,  $K_{II} = 0$ );
- хрупкое разрушение ( $0 < K_{IIc} / K_{Ic} < 2$ ), учитывающее одновременное существование двух механизмов развития трещины – нормального отрыва и поперечного сдвига, в котором превалирует отрывной механизм разрушения. Поперечный сдвиг формируется за счет увеличения угла заострения дискового инструмента;
- вязкое разрушение ( $2 \leq K_{IIc} / K_{Ic} < 2,8$ ), учитывающее смешанное разрушение, в котором преобладает механизм поперечного сдвига. Поперечный сдвиг формируется за счет вязкости горных пород;
- поперечный сдвиг ( $K_{IIc} / K_{Ic} \geq 2,8$ ;  $K_I = 0$ ).

В таблицах 2,3 представлены данные экспериментальных исследований по разрушению горных пород коническими дисковыми инструментами и результаты расчетов, выполненных по разработанным соотношениям (3) и (4).

Таблица 2. Результаты экспериментальных и теоретических исследований процесса разрушения песчаника

Номер прохода	h, м	R, кН	l, м	P, кН			
				$K_{II} / K_I = 1,57$	$K_{II} / K_I = 2$	$K_{II} / K_I = 2,5$	$K_{II} / K_I = 3$
1	0,010	33,88	0,010	29,82	35,76	43,06	50,58
2	0,015	41,62	0,015	40,42	48,47	58,37	68,55
3	0,018	45,67	0,018	46,34	55,58	66,92	78,60

Таблица 3. Результаты экспериментальных и теоретических исследований процесса разрушения крепких пород

Номер прохода	h, м	R, кН	l, м	P, кН			
				$K_{II} / K_I = 1,2$	$K_{II} / K_I = 2$	$K_{II} / K_I = 2,5$	$K_{II} / K_I = 3$
Габбро							
1	0,005	30,00	0,005	19,93	28,31	34,09	40,04
2	0,015	47,80	0,015	45,44	64,54	77,72	91,28
1	0,010	41,93	0,010	33,52	47,62	57,34	67,34
2	0,020	57,27	0,020	56,38	80,08	96,43	113,25
Кварц							
1	0,005	24,84	0,005	21,75	30,89	37,19	43,68
2	0,010	41,62	0,010	36,57	51,95	62,55	73,46
3	0,015	50,77	0,015	49,57	70,41	84,78	99,57
4	0,020	57,87	0,020	61,51	87,36	105,20	123,55
1	0,010	40,73	0,010	36,57	51,95	62,55	73,46
2	0,020	55,23	0,020	61,51	87,36	105,20	123,55
1	0,006	24,82	0,006	24,93	35,41	42,64	50,08
2	0,010	38,55	0,010	36,57	51,95	62,55	73,46
3	0,014	51,31	0,014	47,07	66,86	80,51	94,55
4	0,018	57,63	0,018	56,83	80,73	97,21	114,16

В лабораторных исследованиях разрушению подвергались породные блоки размером  $1,0 \times 1,0 \times 1,0$  м<sup>3</sup>. Блок песчаника ( $\sigma_{сж} = 70,5$  МПа,  $\sigma_p = 10$  МПа) разрушался коническим дисковым инструментом диаметром  $D = 0,28$  м с углом заострения  $\varphi = 40^\circ$ . Результаты экспериментальных исследований по разрушению блоков габбро ( $\sigma_{сж} = 114,0$  МПа,  $\sigma_p = 14$  МПа) и кварца ( $\sigma_{сж} = 126$  МПа,  $\sigma_p = 12$  МПа) коническим дисковым инструментом были взяты из работ [1,6]. Габбро и кварц разрушались дисковым инструментом, имеющим следующие геометрические размеры:  $D = 0,28$  м, угол заострения  $\varphi = 45^\circ$ , задний угол  $\gamma = 12^\circ$ .

В таблицах приняты следующие обозначения:

$h$  – суммарная глубина прохода конического дискового инструмента по одному и тому же следу;

$R$  – равнодействующая сила на оси дискового инструмента, определяемая экспериментально;

$\ell$  – длина устойчивой трещины;

$P$  – равнодействующая сила на оси дискового инструмента, вычисленная на основе выражения (4) для различных отношений коэффициентов интенсивности напряжений  $K_{II} / K_I$ .

Коэффициент интенсивности напряжений для песчаника  $K_I = 70 \cdot 10^4$  Н/м<sup>3/2</sup>, а для габбро и кварца принимал значения  $110 \cdot 10^4$  Н/м<sup>3/2</sup> и  $120 \cdot 10^4$  Н/м<sup>3/2</sup> соответственно. Величина  $m=1$  м в теоретических расчетах соответствовала длине породного блока. Результаты нагруженнос-

ти конических дисковых инструментов в теоретических исследованиях для  $K_{II} / K_I = 1,57$ ; 1,2 приведены при разрушении хрупких горных пород, а при  $K_{II} / K_I = 2$ ; 2,5; 3 рассчитаны для крепких вязких горных пород.

Анализ экспериментальных и теоретических исследований позволяет сделать следующее заключение:

– глубина прохода конического дискового инструмента по одному и тому же следу соответствует численному значению величины устойчивой трещины;

– при глубине внедрения конического дискового инструмента  $h < 0,010$  м развитие устойчивых трещин осуществляется по механизму отрыва и сдвига;

– для устойчивых трещин  $h > 0,010$  м преобладает механизм отрыва;

– использование критерия устойчивого роста магистральных трещин в горных породах по смешанному механизму разрушения позволяет выделить четыре зоны разрушения крепких пород коническими дисковыми инструментами.

Таким образом, разработанный критерий развития устойчивых магистральных трещин по смешанному механизму даёт возможность прогнозировать разрушение мощных породных прослоек коническими дисковыми инструментами в зависимости от геометрических, режимных параметров инструмента и коэффициентов интенсивности напряжений породных прослоек.

12.11.2013

#### Список литературы:

1. Нестеров В.И. Механика разрушения горных пород дисковым инструментом / В.И. Нестеров, Ю.Г. Полкунов, Б.Л. Герике и др. – Кемерово: Кузбас. гос. техн. ун-т., 2001. – 159 с.
2. Нестеров В.И., Полкунов Ю.Г. Разрушение горных пород трещинами нормального разрыва // Вестник КузГТУ. – 1997. – №1. – С.9 – 13.
3. Нестеров В.И., Полкунов Ю.Г. Прогнозирование разрушения крепких горных пород при циклическом воздействии коническими дисковыми инструментами // Известия вузов. Горный журнал. – 1999. – №3–4. – с. 26–28.
4. Крауч С. Методы граничных элементов в механике твердого тела / С. Крауч, А. Старфилд. – М.: Мир, 1987. – 328с.
5. Черепанов Г.П. Механика хрупкого разрушения / Г.П. Черепанов. – М.: Наука, 1974. – 640с.
6. Логов А.Б. Механическое разрушение крепких горных пород / А.Б. Логов, Б.Л. Герике, А.Б. Раскин. – Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1989. – 141 с.
7. Алексеев А.Д. Предельное состояние горных пород / А.Д. Алексеев, Н.В. Недодаев. – Киев: Наук. думка, 1982. – 200 с.
8. Зайцев Ю.В. Механика разрушения для строителей / Ю.В. Зайцев. – М.: Высш. шк., 1991. – 288 с.

Сведения об авторах:

**Полкунов Юрий Григорьевич**, заведующий кафедрой математического анализа Оренбургского государственного университета, доктор технических наук, доцент  
460018, г. Оренбург, пр-т Победы, 13, ауд. 2240, тел. (3532)372533,  
e-mail: polkunov\_ug@mail.ru

**Лобода Марианна Юрьевна**, преподаватель кафедры математического анализа Оренбургского государственного университета, e-mail: polemaria\_03@mail.ru