

УДК 622.023

**ВЛИЯНИЕ ШИРИНЫ ТРЕЩИНЫ НА ПОТЕРИ ЭНЕРГИИ ВОЛНЫ НАПРЯЖЕНИЙ
В СЛОИСТЫХ МОДЕЛЯХ ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ ВЗРЫВНЫХ
НЕРАЗРУШАЮЩИХ НАГРУЗКАХ**

Мыслицкий С.М., Пеев А.М.

Кременчугский государственный политехнический университет

Назаренко С.В.

ЗАТ «Граниты Украины»

Введение. Использование энергии взрыва при добыче полезных ископаемых на карьерах, обусловливает изменение прочностных свойств среды за пределами зоны разрушения, а также вновь образованных кусков горной массы. Переработка добытого минерального сырья требует энергетических затрат которые зависят от прочностных характеристик горных пород. На распределение энергии взрыва, трансформируемой в массив горных пород, прежде всего, влияют его структурные особенности, в частности, блочность, слоистость и т.п. Как показал анализ публикаций в научно-технических изданиях в этой проблеме остается много нерешенных вопросов.

Анализ состояния проблемы. Месторождения полезных ископаемых, представленные скальными горными породами, в основном являются неоднородными, блочными средами. Такие структурные характеристики массивов, как трещиноватость, блочность, слоистость, во многом определяют рациональные параметры буровзрывных работ и гранулометрический состав отбитой горной массы. Связь между интенсивностью дробления горных пород и структурными особенностями массивов обусловлена их влиянием на распространение волны напряжений и распределение энергии взрывного воздействия.

Цель работы. В лабораторных условиях экспериментально определить на моделях потери энергии волны напряжений при прохождении через трещины различной ширины.

Материал и результаты исследований. Экспериментальные исследования проведены на составных моделях сложенных из трех лабрадоритных пластин 130x130x40 мм каждая, вырезанных с помощью камнерезной машины из одного блока.

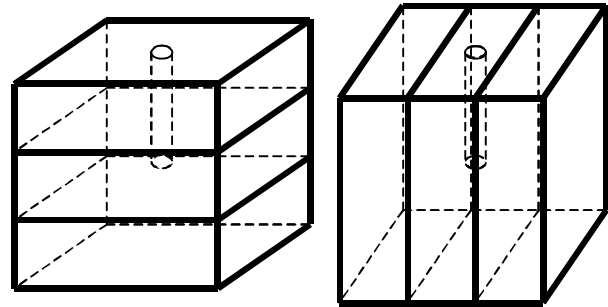
Модели подвергали неразрушающему взрывному воздействию зарядами тэна, которые размещали в шпурах без забойки. Во всех экспериментах диаметр шпуров составлял 4 мм, длина – 65 мм.

Для каждой планируемой серии экспериментов в ходе предварительных испытаний устанавливали максимальную (предельную) массу зарядов ВВ в шпуре, при взрыве которых в модели не появлялись видимые трещины. Предельная масса заряда тэна в шпуре составила 70 мг. Во всех испытываемых моделях неразрушающее воздействие создавали взрывами заряда тэна указанной массы.

Для определения потерь энергии волны напря-

жений при прохождении ее через трещины провели две серии экспериментов. В первой серии (модели №№ 1-3) шпуры сверлили в центре модели перпендикулярно слоистости (рис.1а), во второй серии (модели №№ 4-6) – параллельно (рис.1б).

Потери энергии волны напряжений при прохождении через трещины различной ширины определяли по остаточному пределу прочности образцов вырезанных после взрывного неразрушающего воздействия из различных пластин составляющих модель.



а) №№ 1-3

б) №№ 4-6

Рисунок 1 – расположение шпура в моделях

Трещины фиксированной ширины в моделях создавали размещая между пластинами слой фольги заданной толщины. При отсутствии фольги между пластинами трещину считали плотно сомкнутой. В ходе каждой серии экспериментов исследовали три варианта моделей.

- а) трещины плотно сомкнуты;
- б) ширина трещины 10 мк (1слой фольги);
- в) ширина трещины 30 мк (3 слоя фольги).

После взрыва зарядов ВВ пластины моделей разрезали на камнерезной машине на 27 образцов размерами 40x40x40 мм (ширина реза 5мм) как показано на рис.2 и 3. На испытательной машине EDZ-100 образцы подвергали действию сжимающей нагрузки в направлении перпендикулярном плоскости пластин и определяли остаточный предел прочности.

Образцы, расположенные симметрично друг относительно друга и заряда ВВ, объединяли в группы, для которых определяли средний предел остаточной прочности. Отклонение отдельных результатов испытаний от среднего значения не превышало 15%. Результаты, отличающиеся от среднего значения более, чем на 15 % считали «промахом» и исключали из дальнейшего рассмотрения.

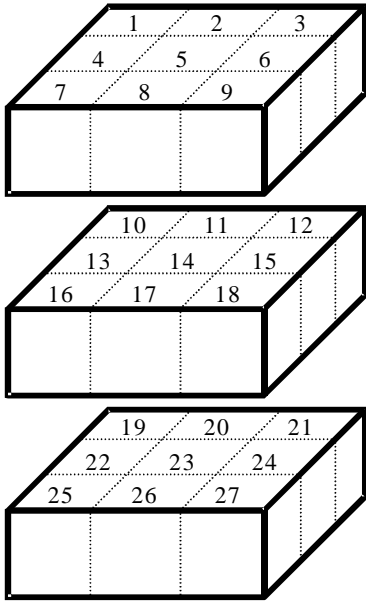


Рисунок 2 – Схема розрізання на образці моделей 1 серії

По пределу остаточной прочности вычисляли удельные энергетические затраты (Дж /см³) на разупрочнение каждого образца и средние по группе:

$$U_i = \frac{\sigma_3^2 - \sigma_i^2}{2K_d E_{СТ}}, \quad (1)$$

$$U_i^{cp} = \frac{\sum_{i=1}^n U_i}{n}, \quad (2)$$

где σ_i - пределы остаточной прочности образцов, (МПа);

σ_3 - эталонный предел прочности при сжатии, (МПа);
 $E_{СТ}$ - статический модуль продольной упругости, (МПа);
 K_d - отношение динамического модуля продольной упругости к статическому;
 n - количество образцов в группе.

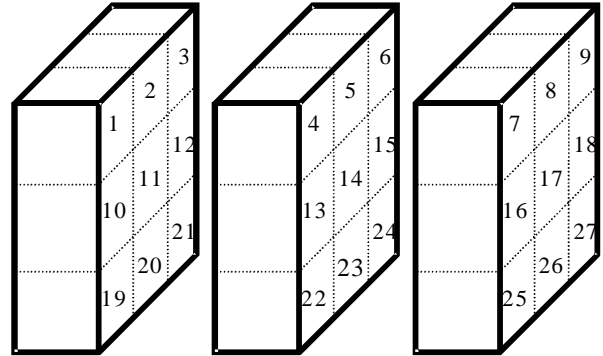


Рисунок 3 – Схема розрізання на образці моделей 2 серії

Упругие характеристики лабрадорита приняты по справочным таблицам [1] ($E_{СТ} = 0,89 \cdot 10^5$ МПа, $E_d = 0,93 \cdot 10^5$ МПа, $K_d = 1,04$). За эталонный предел прочности в каждой модели принимали наибольший из остаточных пределов прочности образцов.

Полученные результаты приведены в табл.1-6, где σ^{cp} - средние пределы остаточной прочности групп образцов (МПа) («промахи» исключены из рассмотрения).

Таблица 1 – Пределы остаточной прочности и удельные энергетические затраты на разупрочнение образцов модели №1 ($\sigma_3 = \sigma_i^{max} = 170$ МПа)

Пластина	Пределы остат.прочности образцов σ_i ; МПа / Отклонение от среднего $\left(\frac{\sigma_i}{\sigma_i^{cp}} - 1\right) \times 100\%$								
	№1	№3	№7	№9	№5	№2	№4	№6	№8
Верхняя	128,5 / -7	170,0 / 23	120,1 / -13	133,0 / -4	114,0 / -	154,2 / 9	121,3 / -14	141,9 / 1	146,0 / 4
U_i ; Дж/см ³	0,0666	-	0,0778	0,0603	0,0855	0,0275	0,0763	0,0471	0,0408
U_i^{cp} ; Дж/см ³	0,0682				-	0,0479			
σ^{cp} ; МПа	127				-	141			
Средняя	№10	№12	№16	№18	№14	№11	№13	№15	№17
	97,7 / -8	120,0 / 13	94,6 / -11	111,3 / 5	113,7 / -	83,9 / -19	106,6 / 3	-	117,0 / 14
U_i ; Дж/см ³	0,1041	0,0779	0,1073	0,0888	0,0859	-	0,0943	-	0,0818
U_i^{cp} ; Дж/см ³	0,0945				-	0,0881			
σ^{cp} ; МПа	106				-	112			
Нижняя	№19	№21	№25	№27	№23	№20	№22	№24	№26
	106,9 / 4	134,0 / 30	96,0 / -7	76,0 / -26	109,0 / -	105,0 / 11	84,0 / -10	95,7 / 3	88,0 / -5
U_i ; Дж/см ³	0,0939	-	0,1058	-	0,0915	0,0961	0,1174	0,1061	0,1137
U_i^{cp} ; Дж/см ³	0,0999				-	0,1083			
σ^{cp} ; МПа	101				-	93			

Таблиця 2 –
Пределы остаточной прочности и удельные энергетические затраты на разупрочнение образцов модели №2 ($\sigma_3 = \sigma_i^{\max} = 186,9$ МПа)

Пластина	Пределы остат.прочности образцов σ_i ; МПа / Отклонение от среднего $\left(\frac{\sigma_i}{\sigma_i^{\text{cp}}} - 1\right) \times 100\%$									
	№1	№3	№7	№9	№5	№2	№4	№6	№8	
Верхняя	74,9 / -40	150,9 / 20	137,9 / 10	139,7 / 11	136,3 / -	186,9 / 14	151,1 / -8	149,6 / -9	168,1 / 3	
U_i ; Дж / см ³	-	-	0,0856	0,0829	0,0879	0,0000	0,0651	0,0674	0,0359	
U_i^{cp} ; Дж / см ³	0,0843				-	0,0421				
σ^{cp} ; МПа	139				-	156				
Средняя	№10	№12	№16	№18	№14	№11	№13	№15	№17	
	119,2 / -16	135,3 / -4	180,9 / 28	131,2 / -7	125,4 / -	-	120,1 / -15	172,6 / 22	132,2 / -7	
U_i ; Дж / см ³	-	0,0893	-	0,0953	0,1033	-	0,1103	-	0,0938	
U_i^{cp} ; Дж / см ³	0,0923				-	0,1021				
σ^{cp} ; МПа	133				-	126				
Нижняя	№19	№21	№25	№27	№23	№20	№22	№24	№26	
	127,6 / -2	119,0 / -9	126,9 / -3	148,1 / 14	168,1 / -	141,1 / 7	149,8 / 13	127,0 / -4	112,2 / -15	
U_i ; Дж / см ³	0,1003	0,1117	0,1012	0,0699	0,0359	0,0808	0,0672	0,1011	0,1201	
U_i^{cp} ; Дж / см ³	0,0958				-	0,0923				
σ^{cp} ; МПа	130				-	133				

Таблиця 3 –
Пределы остаточной прочности и удельные энергетические затраты на разупрочнение образцов модели №3 ($\sigma_3 = \sigma_i^{\max} = 192,8$ МПа)

Пластина	Пределы остат.прочности образцов σ_i ; МПа / Отклонение от среднего $\left(\frac{\sigma_i}{\sigma_i^{\text{cp}}} - 1\right) \times 100\%$									
	№1	№3	№7	№9	№5	№2	№4	№6	№8	
Верхняя	159,0 / -2	170,5 / 5	141,9 / -13	180,3 / 11	186,6 / -	175,4 / 0,2	171,6 / -2	159,8 / -9	192,8 / 10	
U_i ; Дж / см ³	0,0639	0,0436	0,0916	0,0251	0,0126	0,0344	0,0415	0,0626	0,0000	
U_i^{cp} ; Дж / см ³	0,0561				-	0,0346				
σ^{cp} ; МПа	163				-	175				
Средняя	№10	№12	№16	№18	№14	№11	№13	№15	№17	
	145,8 / -9	178,6 / 12	146,2 / -9	169,5 / 6	174,1 / -	152,3 / -8	146,0 / -12	169,7 / 3	190,4 / 15	
U_i ; Дж / см ³	0,0856	0,0283	0,0849	0,0453	0,0369	0,0751	0,0852	0,0450	0,0049	
U_i^{cp} ; Дж / см ³	0,0611				-	0,0526				
σ^{cp} ; МПа	160				-	165				
Нижняя	№19	№21	№25	№27	№23	№20	№22	№24	№26	
	161,6 / -1	148,6 / -9	163,2 / 0,1	177,6 / 9	134,3 / -	160,1 / 4	131,9 / -14	173,1 / 12	150,3 / -2	
U_i ; Дж / см ³	0,0594	0,0811	0,0566	0,0303	0,1029	0,0620	0,1063	0,0387	0,0784	
U_i^{cp} ; Дж / см ³	0,0569				-	0,0714				
σ^{cp} ; МПа	163				-	154				

**Таблица 4 –
Пределы остаточной прочности и удельные энергетические затраты на разупрочнение образцов модели №4 ($\sigma_3 = \sigma_1^{\max} = 157,8$ МПа)**

Слой	Пределы остат.прочности образцов σ_i ; МПа / Отклонение от среднего $\left(\frac{\sigma_i}{\sigma_i^{\text{cp}}} - 1\right) \times 100\%$							
	№1	№3	№7	№9	№2	№8	№4	№6
Верхний	109,8 /	123,4 /	120,0 /	157,8 /	107,3 /	149,8 /	128,5 /	113,0 /
	-14	-3	-6	23	-16	16	6	-6
U_i ; Дж/см ³	0,0691	0,0520	0,0565	-	0,0720	0,0132	0,0451	0,0652
U_i^{cp} ; Дж/см ³	0,0592			0,0426			0,0552	
σ^{cp} ; МПа	117,7			-			120,8	
Средний	№10	№12	№16	№18	№11	№17	№13	№15
	99,8 /	107,0 /	127,2 /	129,5 /	144,0 /	136,0 /	117,4 /	144,0 /
	-14	-8	10	12	3	-3	-10	10
U_i ; Дж/см ³	0,0803	0,0723	0,0469	0,0437	0,0224	0,0344	0,0598	0,0224
U_i^{cp} ; Дж/см ³	0,0608			0,0284			0,0411	
σ^{cp} ; МПа	115,9			140,0			130,7	
Нижний	№19	№21	№25	№27	№20	№26	№22	№24
	112,8 /	109,6 /	111,5 /	110,1 /	111,0 /	126,8 /	100,1 /	88,2 /
	2	-1	0,5	-1	-7	7	6	-6
U_i ; Дж/см ³	0,0655	0,0693	0,0670	0,0687	0,0676	0,0474	0,0800	0,0921
U_i^{cp} ; Дж/см ³	0,0676			0,0575			0,0861	
σ^{cp} ; МПа	111,0			118,4			94,2	

**Таблица 5 –
Пределы остаточной прочности и удельные энергетические затраты на разупрочнение образцов модели №5 ($\sigma_3 = \sigma_1^{\max} = 199,2$ МПа)**

Слой	Пределы остат.прочности образцов σ_i ; МПа / Отклонение от среднего $\left(\frac{\sigma_i}{\sigma_i^{\text{cp}}} - 1\right) \times 100\%$							
	№1	№3	№7	№9	№2	№8	№4	№6
Верхний	199,2 /	166,1 /	145,2 /	127,9 /	167,5 /	132,3 /	140,6 /	149,5 /
	25	4	-9	-20	12	-12	-3	3
U_i ; Дж/см ³	-	0,0650	0,1000	-	0,0625	0,1192	0,1071	0,0932
U_i^{cp} ; Дж/см ³	0,0825			0,0909			0,1002	
σ^{cp} ; МПа	155,7			149,7			145,1	
Средний	№10	№12	№16	№18	№11	№17	№13	№15
	158,8 /	142,3 /	155,6 /	163,9 /	169,7 /	153,1 /	160,4 /	175,5 /
	2	-8	0,3	6	5	-5	-5	5
U_i ; Дж/см ³	0,0778	0,1045	0,0832	0,0689	0,0585	0,0873	0,0750	0,0477
U_i^{cp} ; Дж/см ³	0,0836			0,0729			0,0614	
σ^{cp} ; МПа	155,2			161,4			167,9	
Нижний	№19	№21	№25	№27	№20	№26	№22	№24
	171,9 /	188,2 /	191,8 /	133,2 /	147,1 /	161,1 /	159,8 /	136,8 /
	0,4	10	12	-22	-5	5	8	-8
U_i ; Дж/см ³	0,0545	0,0229	0,0156	-	0,0970	0,0738	0,0760	0,1133
U_i^{cp} ; Дж/см ³	0,0310			0,0854			0,0947	
σ^{cp} ; МПа	183,9			154,1			148,3	

**Таблица 6 –
Пределы остаточной прочности и удельные энергетические затраты на разупрочнение образцов модели №6 ($\sigma_3 = \sigma_i^{\max} = 189,2$ МПа)**

Слой	Пределы остат.прочности образцов σ_i ; МПа / Отклонение от среднего $\left(\frac{\sigma_i}{\sigma_i^{\text{cp}}} - 1\right) \times 100\%$							
	№1	№3	№7	№9	№2	№8	№4	№6
Верхний	143,9 / 6	132,6 / -2	128,8 / -5	135,8 / 0,4	116,3 / -7	134,9 / 7	146,7 / 8	125,7 / -8
U_i ; Дж / см ³	0,0811	0,0979	0,1033	0,0933	0,1201	0,0946	0,0768	0,1075
U_i^{cp} ; Дж / см ³	0,0939			0,1074			0,0922	
σ^{cp} ; МПа	135,3			125,6			136,2	
Средний	№10	№12	№16	№18	№11	№17	№13	№15
	167,7 / 6	160,5 / 1	160,4 / 1	145,5 / -8	134,9 / -0,4	136,0 / 0,4	128,5 / -7	147,3 / 7
U_i ; Дж / см ³	0,0413	0,0540	0,0541	0,0786	0,0946	0,0930	0,1037	0,0758
U_i^{cp} ; Дж / см ³	0,0570			0,0938			0,0898	
σ^{cp} ; МПа	158,5			135,5			137,9	
Нижний	№19	№21	№25	№27	№20	№26	№22	№24
	137,1 / -20	189,2 / 11	171,2 / 0	187,3 / 9	165,8 / 11	133,2 / -11	168,5 / 4	154,2 / -4
U_i ; Дж / см ³	-	0,0000	0,0349	0,0038	0,0447	0,0971	0,0398	0,0646
U_i^{cp} ; Дж / см ³	0,0129			0,0709			0,0522	
σ^{cp} ; МПа	182,6			149,5			161,4	

Разность между энергиями разупрочнения образцов, находившихся в средней пластине, содержащей заряд ВВ, и энергиями разупрочнения соответствующих образцов в соседних пластинах,

может быть использована в качестве оценки потерь энергии волны напряжений при переходе ее через трещины. Результаты вычислений приведены в таблицах 7-8.

**Таблица 7 –
Потери удельной энергии волны напряжений при переходе через трещину в моделях 1 серии**

Ширина щели	Потери энергии волны напряжений при переходе через трещину; Дж / см ³			
	Угловые образцы		По ЛНС	
	Верхняя пластина	Нижняя пластина	Верхняя пластина	Нижняя пластина
Плотно сомкнута	0,026 (28%)	-0,005	0,040 (51%)	-0,020
10 мк	0,008 (9%)	-0,004	0,060 (59%)	0,010 (10%)
30 мк	0,005 (8%)	0,004 (7%)	0,018 (34%)	-0,019

**Таблица 8 –
Потери удельной энергии волны напряжений при переходе через трещину в моделях 2 серии**

Ширина щели	Потери энергии волны напряжений при переходе через трещину; Дж / см ³		
	Верхний слой	Средний слой	Нижний слой
Плотно сомкнута	-0,004	-0,020	0,018 (21%)
10 мк	0,018 (18%)	-0,022	0,064 (67%)
30 мк	-0,002	0,033 (37%)	0,039 (75%)

Выводы. При анализе полученных данных отрицательные значения потерь считали «промахами». Потери энергии волны напряжений при переходе ее через плотно сомкнутые трещины составили от 21 до 51%, при переходе через трещину 10 мк от 9 до 67%, через трещину 30 мк – от 7 до 75%. Большой статистический разброс полученных данных можно объяснить флуктуациями прочностных свойств горных пород. Для получения меньшего разброса результатов необходимо увеличить объем экспериментальных исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. Свойства горных пород и методы определения / Ильницкая Е.И., Тедер Р.И., Ватолин Е.С., Кунтыш М.Ф. М, Недра, 1969, 393 с.
2. Комир В.М., Блинков В.В., Мыслицкий С.М., Пеева И.Э., Сокурено В.А. Методика оценки механического эффекта при импульсных нагрузках. // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету: Наукові праці КДПУ.-Кременчук: КДПУ, 2006. – Вип.1/2006(36).– С. 81-83.

Статья поступила 15.03.06 г.
Рекомендовано к печати д.т.н., проф.
Комиром В.М.