

УДК 622.026

В.Ф. ГАНКЕВИЧ, канд. техн. наук

(Украина, Днепр, Государственное ВУЗ "Национальный горный университет"),

О.В. ЛИВАК

(Украина, Днепр, Государственное ВУЗ "Украинский государственный химико-технологический университет")

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕМПЕРАТУРНОГО ФАКТОРА

Введение

В настоящее время остро стоит проблема снижения энергоемкости процессов разрушения горных пород, повышение производительности и повышение долговечности рабочих органов машин без ухудшения технико-экономических и экологических показателей.

Одним из таких путей решения поставленной задачи и является температурный фактор воздействия на горные породы.

Цель работы – отработка оптимальны вариантов воздействия на горные породы с целью разрушения их с минимальными энергозатратами.

Приведены результаты исследований состояния поверхностного слоя стекла и горных пород после термического удара охлаждением, для оценки возможности использования данного метода воздействия в различных технологических процессах разрушения горных пород.

Известно, что резкое охлаждение горных пород приводит к необратимым процессам растрескивания охлажденной поверхности так называемыми усадочными напряжениями. Последствия усадочных напряжений (напряжений растяжения) наблюдаются, например, при интенсивном высыхании почвы, когда земля растрескивается в виде фрагментов, напоминающих неправильные соты. Аналогичная картина имеет место при резком охлаждении предварительно нагретых или находящихся в естественном состоянии горных пород.

Поведение горных пород при термоциклическом воздействии рассматривалось в работах [1-4]. В них показано, что в фазе охлаждения в горных породах развиваются мощные растягивающие напряжения, которые могут приводить к растрескиванию пород. Однако, полная картина нарушения массива усадочными трещинами в настоящее время отсутствует.

Наиболее вероятный размер ячейки растрескивания при резком охлаждении поверхности горной породы определяется по зависимости [5].

$$g = \frac{0,45K^2\sigma_c^2}{\pi^2\sigma_*^2\sigma_p^2}, \quad (1)$$

где K – модуль сцепления материала; σ_c – предел прочности материала на сжа-

тие; σ_* – максимальные растягивающие напряжения, возникающие в поверхностном слое; σ_p – предел прочности материала на растяжение.

В свою очередь

$$K = \sqrt{\pi E \gamma}, \quad (2)$$

где E – модуль Юнга породы; γ – удельная поверхностная энергия разрушения,

$$\sigma_* = \frac{\beta \cdot E (T_n - T_{ox})}{1 - \mu}, \quad (3)$$

где β – коэффициент линейного расширения материала; T_n – температура нагретого материала; T_{ox} – температура охлаждающей среды; μ – коэффициент Пуассона.

Для экспериментального подтверждения зависимости (1) проведены экспериментальные исследования на силикатном стекле, моделирующем горную породу.

В качестве модели стекло выбрано по следующим причинам:

- 1) по своим физико-механическим характеристикам стекла близки к горным породам. В обычном состоянии стекла – твердые, жесткие и хрупкие тела;
- 2) стекла являются прозрачными материалами поэтому развитие в них трещин, даже незначительной длины, легко фиксируется визуальными методами;
- 3) стекла сохраняют термоупругость при нагреве в достаточно широком диапазоне температур;
- 4) недавними исследованиями показано, что в стеклах, как и в горных породах, имеются не обнаруживаемые визуальными методами развитые системы естественных микротрещин. Существование таких микротрещин доказано двумя радикально отличными друг от друга методами исследования: ионного обмена и импульсных напряжений [6];
- 5) механические характеристики стекла, необходимые для расчета сетки растрескивания при термоциклическом нагружении по формуле (1) тщательно измерены Панасюком В.В. и приведены в работе [7];
- б) стекла, в качестве материала, моделирующего горную породу при разрушении механическими, тепловыми и комбинированными нагрузками использовались многими исследователями [1].

Экспериментальные исследования по термоциклическому разрушению стекла заключались в следующем: листы стекла размером 200×200 мм и толщиной 5мм плавно нагревались в муфельной печи со скоростью не более 100 °С/час до определенной температуры T_n , а затем резко охлаждались окунанием в воду при температуре $T_{ox} = 15$ °С. Образцы грелись до температуры от $T_n = 100$ °С до $T_n = 450$ °С с интервалом в $T_{ин} = 10$ °С, таким образом, резкому охлаждению в воде подвергались образцы, нагретые до $T_n = 100, 11, 120, 130 \dots 450$ °С. Если учесть, что перепад температур по [3] определяется как

$\Delta T = T_n - T_{ox}$, то образцы подвергались термоциклу с $\Delta T = 85, 95, 105, 115, 125 \dots 435$ °С.

На поверхности всех, без исключения, образцов в результате термоциклирования появилась видимая "сотовая" структура трещин с различным поперечным размером отдельного "сота". На рис. 1 показана схематическая картина сетки трещин в стекле при резком охлаждении.

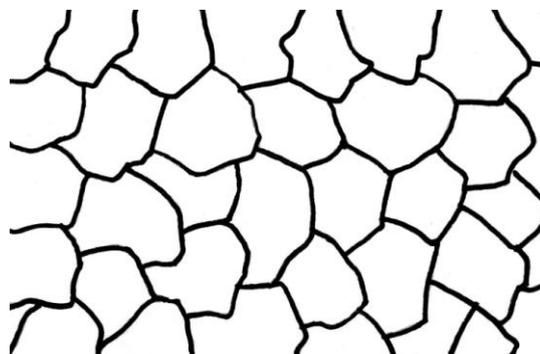
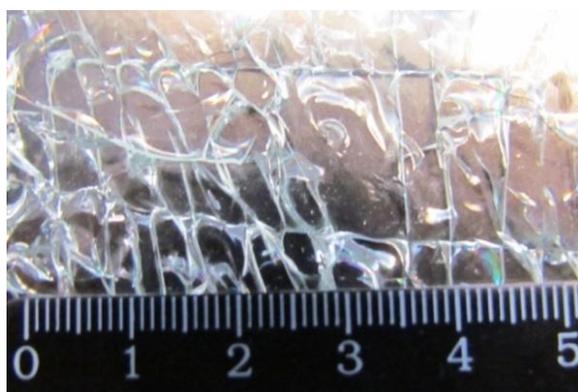
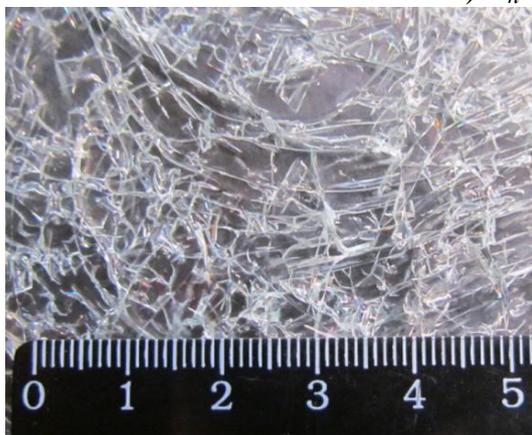


Рис. 1. Схематическая картина сетки трещин в стекле при резком охлаждении

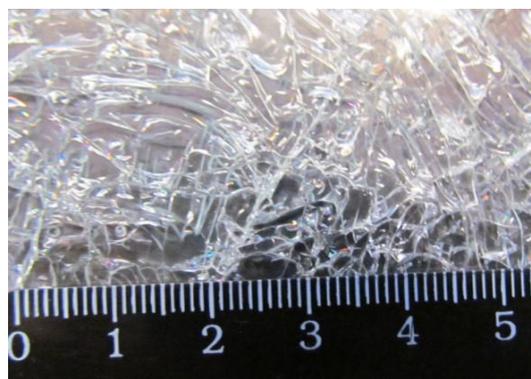
На рис. 2 показан общий вид реальной сетки трещин охлаждения в стекле при различном перепаде температур нагрева и охлаждения.



1) $T_n = 150$ °С



2) $T_n = 200$ °С



3) $T_n = 250$ °С

Рис. 2. Реальная картина сетки трещин в стекле при резком охлаждении

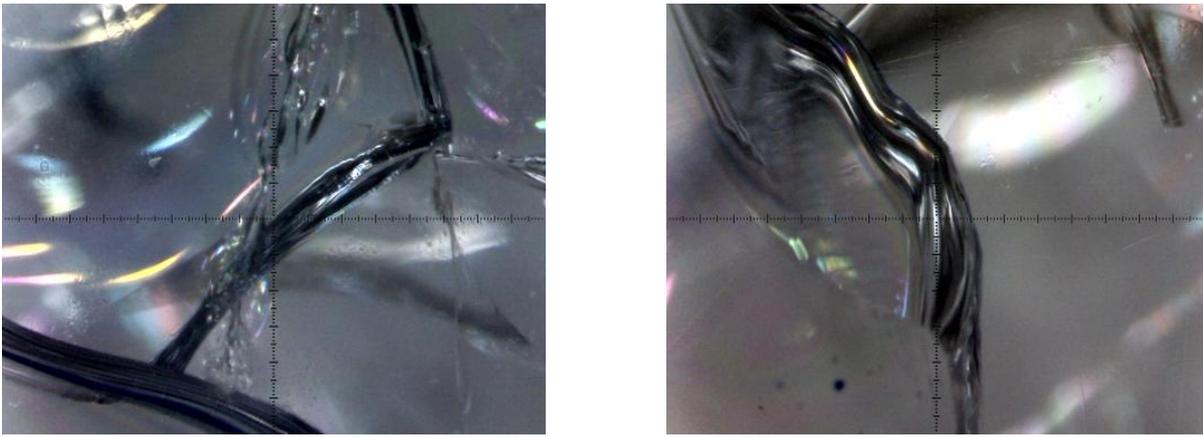


Рис. 3. Одиночные трещины охлаждения под микроскопом.
Увеличение в 200 раз, цена деления 10 мкм

Очевидно, что сетка макротрещин в образцах стекла появляется "вытягиванием" невидимых микротрещин. Аналогичная картина сотового растрескивания в горных породах получена в работах [1, 4].

Экспериментально средний размер ячейки разрушения g_0 определялся следующим образом: подсчитывалось количество ячеек n на площадке $S = 1 \text{ см}^2$, g_0 размер для каждой пластины определялся по формуле

$$g_0 = \sqrt{\frac{S}{n}}. \quad (4)$$

Здесь более уместно говорить о среднем эквивалентном размере ячейки. Площадь реальных ячеек неправильной формы приводится к квадрату, и g (или g_0) – есть размер стороны квадрата с площадью, равной площади реальной "сотовой" ячейки.

Результаты экспериментальных исследований размера ячеек растрескивания силикатного стекла при резком охлаждении и расчеты по зависимости (1) приведены в таблице 1 и на рисунке 4.

При расчете параметров сетки трещин по зависимости (1) физико – механические характеристики силикатного стекла взяты из [1, 6, 7]: коэффициент Пуассона $\mu = 0,2$; модуль Юнга $E = 1 \cdot 10^{10} \text{ Н/м}^2$; коэффициент теплового расширения $\beta = 8 \cdot 10^{-6} \text{ 1/К}$; удельная поверхностная энергия разрушения $\gamma = 2,6 \text{ Дж/м}^2$; отношение пределов прочности на сжатие к растяжению (коэффициент хрупкости) $z = \frac{\delta_c}{\delta_p} \approx 12$.

Зависимость размера ячейки растрескивания от разности температур нагрева и охлаждения стеклянных пластин

№	Тем-ра нагрева, $T_n, ^\circ\text{C}$	$\Delta T, ^\circ\text{C}$	Размер ячейки, мм		Абсолютное расхождение, мм	Расхождение, %
			(теоретический)	(эксперимент) g_3		
1	10	85	7,40	8,40	1,00	11,9
2	150	135	2,90	3,30	0,40	12,1
3	200	185	1,50	1,70	0,20	11,7
4	250	235	0,97	1,40	0,43	30,7
5	300	285	0,66	1,30	0,64	49,2
6	350	335	0,47	1,20	0,73	60,8
7	400	385	0,36	1,10	0,74	67,2
8	450	435	0,28	0,95	0,67	70,5

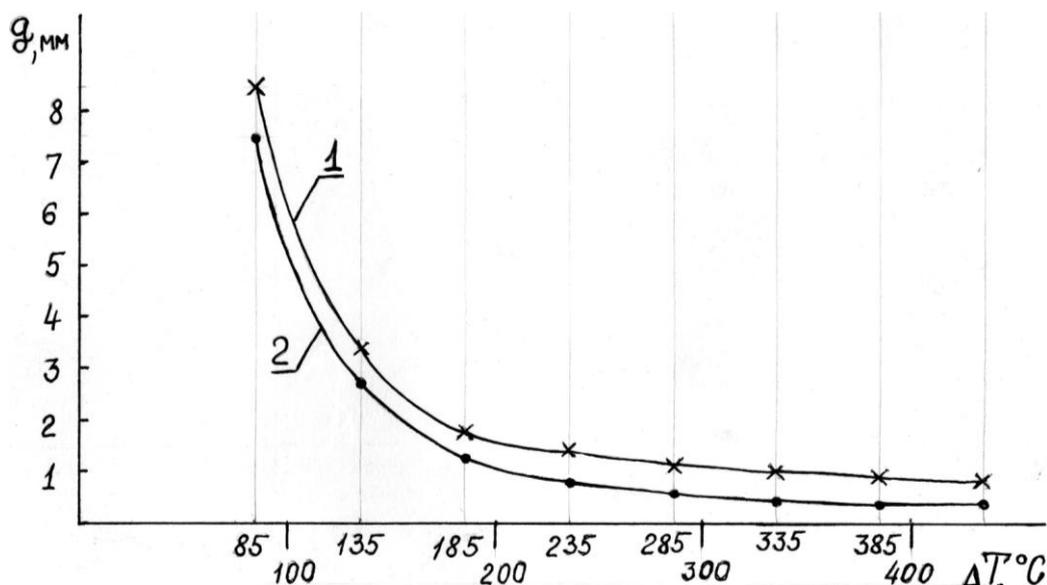


Рис. 4. Параметры сетки трещин в силикатном стекле при резком охлаждении:
1 – экспериментальная кривая; 2 – теоретическая кривая

Сравнение экспериментальных данных с теоретическими показывает, что наилучшее совпадение результатов наблюдается при нагреве образцов до температур $T_n = 250 ^\circ\text{C}$. При более высоких температурах расхождение между экспериментальными и теоретическими данными возрастает. Объясняется это тем, что при увеличении температуры нагрева стекла реальные значения модуля Юнга E уменьшаются [6]. Расчеты же по зависимости (1) выполнялись для постоянного значения E , соответствующего комнатной температуре, так как точных данных зависимости модуля Юнга от температуры для силикатного стекла в литературных источниках нам обнаружить не удалось.

У горных пород, как и у силикатного стекла наблюдается такая же картина снижения величины E при увеличении температуры нагрева [2].

В таблице 2 приведены расчетные значения ячейки растрескивания g при резком охлаждении по зависимости (1) для некоторых горных пород. Физико-механические свойства пород для расчета взяты из [1, 2, 8].

Зависимость размера ячейки растрескивания горных пород
от разности температур нагрева и охлаждения

№	$T_n, ^\circ\text{C}$	$\Delta T, ^\circ\text{C}$	$Z = \sigma_c/\sigma_p$	$K, \text{H/м}^{3/2}$	$E, \text{H/м}^2$	$\beta, 1/\text{K}$	μ	$g, \text{мм}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Гранит								
1	100	85						39,3
2	150	135						15,5
3	200	185						8,2
4	250	235						5,1
5	300	285						3,4
6	350	335						2,5
7	400	385						1,9
8	450	435						1,5
9	500	485						1,2
10	550	535						0,99
11	600	585	13,4	$1,7 \cdot 10^6$	$2,6 \cdot 10^{10}$	10^{-5}	0,1	0,83
12	650	635						0,7
13	700	685						0,6
14	750	735						0,53
15	800	785						0,46
16	850	835						0,41
17	900	885						0,36
18	950	935						0,32
19	1000	985						0,29
20	1050	1035						0,26
21	1100	1085						0,24
Оленегорский железистый кварцит								
1	100	85						63,1
2	150	135						25,0
3	200	185						13,3
4	250	235						8,2
5	300	285						5,6
6	350	335						4,0
7	400	385						3,0
8	450	435						2,4
9	500	485						1,9
10	550	535						1,5
11	600	585	12,6	$3,2 \cdot 10^6$	$6,7 \cdot 10^{10}$	$0,5 \cdot 10^{-5}$	0,17	1,33
12	650	635						1,13
13	700	685						0,97
14	750	735						0,84
15	800	785						0,74
16	850	835						0,65
17	900	885						0,58
18	950	935						0,52
19	1000	985						0,47
20	1050	1035						0,43
21	1100	1085						0,39

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Песчаник								
1	100	85						643,4
2	150	135						255,2
3	200	185						135,9
4	250	235						84,2
5	300	285						57,2
6	350	335						41,4
7	400	385						31,3
8	450	435						24,5
9	500	485						19,7
10	550	535						16,2
11	600	585	11,2	$2,37 \cdot 10^6$	$2,4 \cdot 10^{10}$	$0,25 \cdot 10^{-5}$	0,28	13,58
12	650	635						11,52
13	700	685						9,90
14	750	735						8,6
15	800	785						7,54
16	850	835						6,67
17	900	885						5,94
18	950	935						5,32
19	1000	985						4,79
20	1050	1035						4,34
21	1100	1085						3,95
Кварц (по данным [4])								
1	> 573							0,15·(0,4)

Изучение усадочных трещин под микроскопом с увеличением в 200 раз, показало, что берега трещин необратимо расходятся на расстояние до 20 мкм (т.е. усадочные трещины являются раскрытыми) (рис. 3). Нанесение любой подкрашенной жидкости на растресканную поверхность приводит к впитыванию жидкости трещинами на определенную глубину.

Визуальные наблюдения и наблюдения под микроскопом показали, что берега трещин в результате термического удара охлаждением необратимо деформируются, выдавливаясь наружу. Микрошероховатость поверхности стекла существенно меняется. Состояние поверхности, подверженной резкому охлаждению изучалось с помощью профиллографа – 252. Измерялась высота волны микронеровностей поверхности от линии впадин до линии выступов до термоудара и после. Измерения после термоудара проводились в районе трещин, путем пересечения измерительной иглой берегов трещин.

Результаты измерений приведены в таблице 3.

Таблиця 3

Высота микронеровностей поверхности стекла до термоудара R_e и после R_m

№	Исходный образец R_e , мкм	Среднее значение $R_{e\text{ ср}}$, мкм	Образец нагретый до 250 °С, R_m , мкм	Среднее значение $R_{m\text{ ср}}$, мкм	Образец нагретый до 350 °С R_m , мкм	Среднее значение $R_{m\text{ ср}}$, мкм
1	0,080	0,077	3,2	2,69	1,7	1,48
2	0,080		1,6		0,5	
3	0,063		3,5		2,0	
4	0,075		1,7		2,0	
5	0,079		3,2		2,0	
6	0,081		1,6		0,7	
7	0,080		3,7		0,7	
8	0,078		3,0		2,2	

Поверхность стекла после термоудара выглядит следующим образом – плоская поверхность внутри соты, с малой начальной шероховатостью (в ненарушенной области) и загнутая вверх в области трещины. Схематически поперечный разрез трещины охлаждения, выходящей на поверхность показан на рисунке 5.

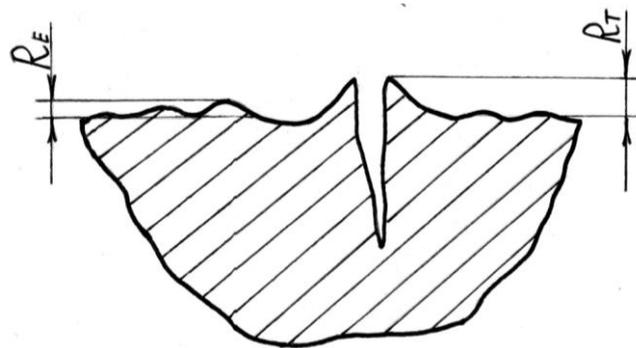


Рис. 5. Поперечный разрез трещины охлаждения:
 R_e – естественная высота микронеровностей поверхности;
 R_m – высота микронеровностей после термоудара охлаждением

Следует отметить, что высота микронеровностей после термоудара охлаждением возрастает от 19 до 35 раз по сравнению с естественной микрошероховатостью. При этом, чем больше плотность трещин на поверхности, тем меньше высота вспучивания поверхности в зоне трещины.

Результаты исследований показывают:

1) Резкое охлаждение поверхности силикатного стекла и горных пород приводит к развитию в них мощных усадочных напряжений и, как следствие, растрескиванию поверхности этих материалов "сотовой" трещиноватостью;

2) Зависимость (1) позволяет достаточно точно оценить параметры сетки растрескивания материалов при резком охлаждении.

3) Трещины охлаждения являются раскрытыми и легко впитывают жидкости, что является благоприятным фактором для смачивания разрушаемого забоя поверхностно-активными веществами и промывочными жидкостями.

4) поверхность забоя вблизи трещин деформируется и “вспучивается” в сторону свободной поверхности.

Термический удар охлаждением при значительной разности температур ΔT может приводить к достаточно высокой плотности трещин на поверхности горных пород, с размером ячейки растрескивания доли миллиметров.

Термический удар охлаждением как разупрочняющий фактор может использоваться в различных технологических процессах разрушения пород:

1) при подготовке скважин к гидровзрыву (можно создавать равномерную сетку начальных трещин как на отдельных участках скважины, так и по всей ее длине);

2) при пропитке пластов жидкостью, через созданную охлаждением систему трещин;

3) при расширении скважин, как это было экспериментально проверено в реальных процессах расширения скважин [9];

4) при алмазном бурении, когда часть рабочего сектора коронки используется в качестве нагревателя горной породы, через промывочное окно осуществляется термоудар охлаждением [11];

5) при подготовке скважин к взрыву с целью создания зародышевых трещин;

6) в процессах дробления и измельчения горных пород, (при этом режимы термообработки должны быть такими, чтобы ячейка трещин была существенно меньше размера кусков измельчаемой породы).

В результате исследований влияния термоциклического воздействия на кварцевое стекло, гранит, железистый кварцит, песчаники и кварц, пришли к выводу о снижении энергоемкости процесса их разрушения, к появлению сетки трещин на поверхности горных пород.

Данный метод воздействия на породы может быть рекомендован при бурении скважин, их расширении, в процессах дробления и измельчения горных пород, на стадии последующего обогащения полезных ископаемых.

Список литературы

1. Разрушение горных пород при термоциклическом воздействии / А.Н. Москалев, Е.Ю. Пигида, Л.Г. Керекилица, Ю.Н. Вахалин. – К.: Наук. думка, 1987. – 248с.

2. Дмитриев А.П., Гончаров С.А. Термическое и комбинированное разрушение горных пород. – М.: Недра, 1978. – 304 с.

3. Забойные факторы алмазного бурения геолого – разведочных скважин / А.О. Кожевников, С.В. Гошовский, И.И. Мартыненко и др. – Д.: ЧП "Лири ЛТД", 2006. – 264 с.

4. Бергман Э.Д., Покровский Г.Н. Термическое разрушение горных пород плазмобурами. – Новосибирск: Наука, 1971. – 193 с.

5. Определение геометрических параметров сетки трещин на поверхности горных пород при термоциклическом воздействии / В.Ф. Ганкевич, Ю.Н. Вахалин Ю.Н., О.В. Ливак и др. // Науковий вісник НГУ. – 2008. – №8. – С. 22-26.

6. Разрушение / Под ред. Г. Либовица. – М.: Мир, 1976. – Т.7. – 634 с.

7. Панасюк В.В. Предельное равновесие хрупких тел с трещинами. – К.: Наук. думка, 1968. – 245 с.

8. Дмитриев А.П., Гончаров С.А., германович Л.Н. Термическое разрушение горных пород. – М.: Недра, 1990. – 255 с.

9. Разрушение горных пород при резком охлаждении: Монография / А.О. Кожевников, В.В. Крисан, Ю.Н. Вахалин и др. – Дн-ск.: ТОВ "Лизунов Пресс", 2011 – 52 с.

10. Пат. 110443 Україна, МПК E21B 10/46, E21B 7/14. Термомеханічний породоруйнуючий інструмент / Дреус А.Ю., Кожевников А.О., Судаков А.К., Вахалін Ю.М. / № u 2016 03522; заявл. 04.04.16; опубл.10.10.16, Бюл. №19.

В.Ф. Ганкевич В.Ф., Ливак О.В., 2017

*Надійшла до редколегії 06.11.2017
Рекомендовано до публікації д.т.н. Васильйовим Л.М.*

УДК 622.27:621.926.9(339.138)

М.І. СОКУР, д-р техн. наук

(Україна, Кременчук, Кременчуцький національний університет ім. Михайла Остроградського),

В.С. БІЛЕЦЬКИЙ, д-р техн. наук

(Україна, Харків, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут"),

Д.П. БОЖИК

(Україна, Кременчук, Кременчуцький національний університет ім. Михайла Остроградського)

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНОГО СТАНУ БАРАБАНУ МЛИНА САМОПОДРІБНЕННЯ В ПРОМИСЛОВИХ УМОВАХ

Постановка проблеми і стан її дослідження. Проблема дослідження напруженого стану барабана млина самоподрібнення має два аспекти, які утруднюють задачу. По-перше, моделювання багатотоннажних млинів самоподрібнення (AG) та напівсамоподрібнення (SAG) показує значні проблеми, пов'язані з труднощами в отриманні високоякісних даних для промислових об'єктів, що суттєво ускладнює експеримент [1]. У роботі [2] на платформі графічного програмування MATLAB / SIMULINK успішно розроблено динамічну модель процесу напівсамоподрібнення руди. Модель протестовано та перевірено на продуктивності самоподрібнення 1800 т/год в промислових умовах при подрібненні мідної руди.

По-друге, проблемою є моделювання умов роботи конструктивних елементів млинів самоподрібнення. Для дослідження напруженого стану конструкцій прийнято використовувати імітації навантаження в полі відцентрових сил [3, 4].

Барабани більшості типорозмірів вітчизняних і зарубіжних млинів самоподрібнення оснащені ребрами жорсткості. Думка вчених про вплив ребер жорсткості на величину і характер розподілу напружень у барабані млина неоднозначні [5], що обумовлює необхідність додаткових досліджень. Актуальність дослідження напруженого стану конструкцій млина, зокрема, в промислових умовах, показана також в роботах [6-9].

Мета статті – експериментальні дослідження напруженого стану моделі барабана млина самоподрібнення в промислових умовах.

Виклад основного матеріалу. Дослідження проводились на дослідно-промисловому зразку млина МБ-90-30 з метою установлення причин відмов