

**В.Ф. ГАНКЕВИЧ**, канд. техн. наук,

(Украина, Днепр, Национальный технический университет «Днепропетровская политехника»),

**Ю.Н. ВАХАЛИН**, канд. техн. наук, **О.В. ЛИВАК**

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

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ТЕРМОЦИКЛИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА ПРОЧНОСТЬ ГОРНЫХ ПОРОД

Для выяснения характера влияния термоциклической обработки на прочностные показатели горных пород проведен цикл соответствующих исследований.

Изучалось изменение прочности на сжатие и изменение прочности определяемой методом толчения при однократной термоциклической обработке с различными режимами циклов нагрев-охлаждение для стекла, угля и гранита.

Стекло использовалось, как материал, моделирующий горную породу. Оно по своим физико-механическим свойствам близко к горным породам и в нём очень наглядно прослеживается система трещин после термоциклической обработки.

Кроме этого, изучалось влияние различных режимов резкого охлаждения на изменение ударной вязкости образцов гранита.

Для измерения прочности на сжатие готовились образцы угля призматической формы размером  $30 \times 30 \times 35$  мм, стекла марки К-108 размером  $30 \times 30 \times 35$  мм и гранита размером  $10 \times 10 \times 10$  мм.

Для измерения крепости по методу толчения использовались образцы неправильной формы для угля объёмом не менее  $1000 \text{ см}^3$  и стекла, и гранита объёмом  $500 \text{ см}^3$ .

Для изучения ударной вязкости гранита изготавливались призматические образцы размером  $10 \times 10 \times 10$  мм.

При изучении прочности с различными значениями перепада температур между нагревом и резким охлаждением  $\Delta T = T_{нагр} - T_{охл}$ , все образцы медленно, в течение 60 мин нагревались в муфельной печи до заданной температуры  $T_{нагр}$ , а затем резко охлаждались окунанием в воду при температуре  $T_{охл} = 10 - 20^\circ \text{C}$ .

Прочность на сжатие определялась на разрывной машине Р-10, сжатием образцов до момента разрушения. Для получения значения одной точки брались 4-5 образцов.

Крепость по методу толчения определялась с использованием прибора ПОК.

Для этого каждый образец дробился до фракций размером 10-40 мм. После этого отбирали несколько проб, состоящих из пяти навесок до 50 г. Каждую

## **Загальні питання технологій збагачення**

навеску дробили с помощью ПОК пятикратным сбрасыванием груза. Затем отбирали пять навесок одной пробы и просеивали через сито с отверстиями 0,5 мм. Полученную пыль засыпали в объеммер и измеряли высоту столба. Крепость пробы вычисляли по эмпирической формуле [1]

$$f_{II} \approx \frac{20n}{l}, \quad (1)$$

где  $n$  – число сбрасываний груза;  $l$  – высота столба пыли в объеммере, мм.

Из каждого образца изготавливали не менее четырех-пяти проб, определяли их крепость и среднюю величину измерений

$$f = \frac{f_1 + f_2 + \dots + f_i}{i}, \quad (2)$$

где  $i$  – количество проб.

Ударную вязкость, показывающую энергоемкость разрушения ударом определяли на маятниковом копре марки МК-30А. Для получения значений одной точки с заданным  $\Delta T$  разбивали не менее 3-х образцов.

Результаты исследований прочности при различных условиях термоциклической обработки приведены в таблице 1. Влияние термоциклической обработки на крепость стекла и горных пород.

Таблица 1

Материал	Разность температур нагрев-охлаждение $\Delta T$ , °С	Крепость по методу толчения $f_{толч}$	Прочность на сжатие, МПа
Стекло	Без обработки	1,95	201,3
	100	1,81	135,6
	200	1,78	135,2
	300	1,66	120,0
	400	1,58	118,0
Уголь	Без обработки	3,8	61,9
	100	3,6	40,4
	1200	3,6	40,4
	300	3,5	30,7
	400	3,4	29,52
Гранит	Без обработки	9	204,3
	100	9	203,7
	200	9	203,0
	300	9	202,1
	400	8,2	190,2
	500	7,5	181,2
	600	5,3	153,7
	700	5,1	110,3
	800	4,9	100,7

Энергия разрушения образцов гранита в зависимости от условий цикла

нагрев-охлаждение приведена в таблице 2. Энергия разрушения образцов гранита на копре.

Таблиця 2

Разность температур $\Delta T$ , °C	Энергия разрушения образцов
Без обработки	0,208
100	0,200
200	0,194
300	0,191
400	0,172
500	0,153
600	0,072
700	0,067
800	0,061

Сравнительные графики зависимости изменения прочности на сжатие и методом толчения приведены на рис. 1-3.

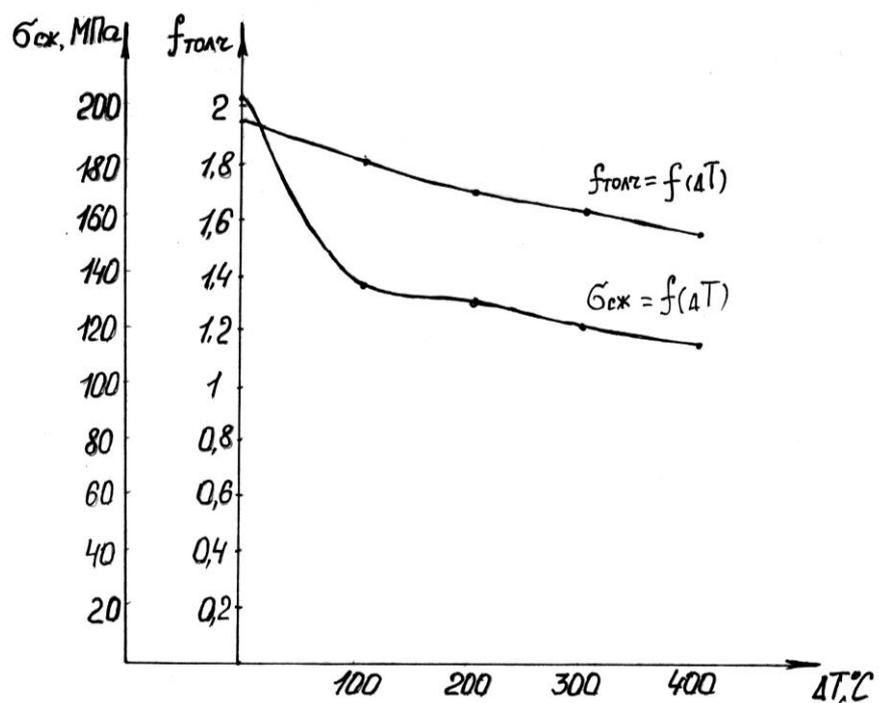


Рис. 1. Зависимость прочности стекла на сжатие  $\sigma_{сж}$  и крепости методом толчения  $f_{толч}$  от разности температур  $\Delta T$  при нагреве – охлаждении

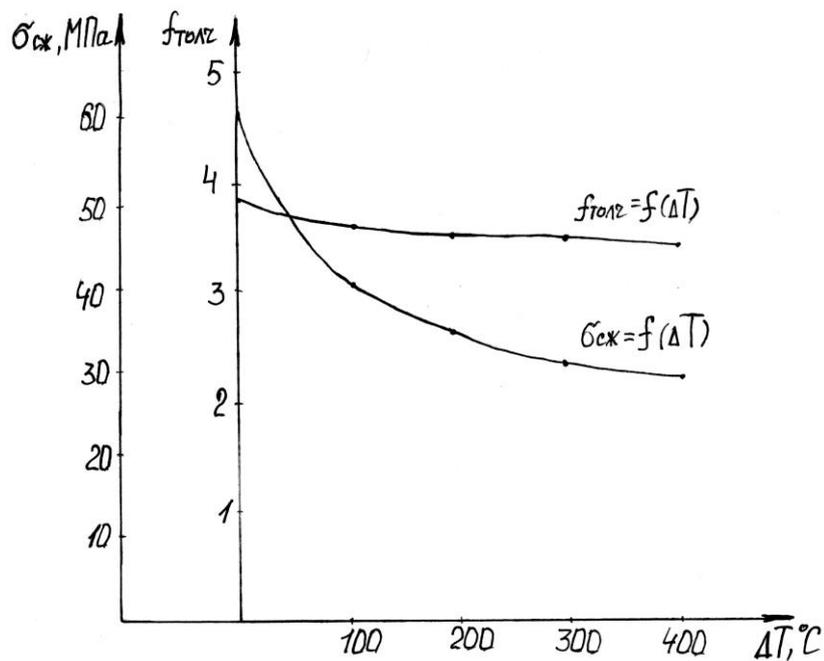


Рис. 2. Зависимость прочности угля на сжатие  $\sigma_{сж}$  и крепости методом толчения  $f_{толч}$  от разности температур  $\Delta T$  при нагреве-охлаждении

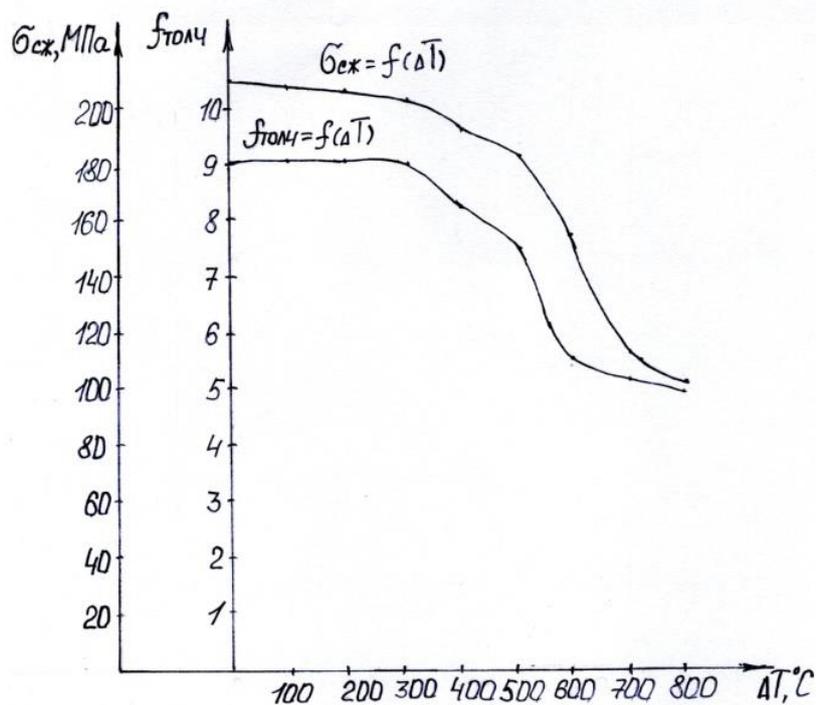


Рис. 3. Зависимость прочности гранита на сжатие  $\sigma_{сж}$  и крепости методом толчения  $f_{толч}$  от разности температур  $\Delta T$  при нагреве-охлаждении

Зависимость энергии разрушения образцов гранита от разности температур нагрева и охлаждения приведена на рис. 4.

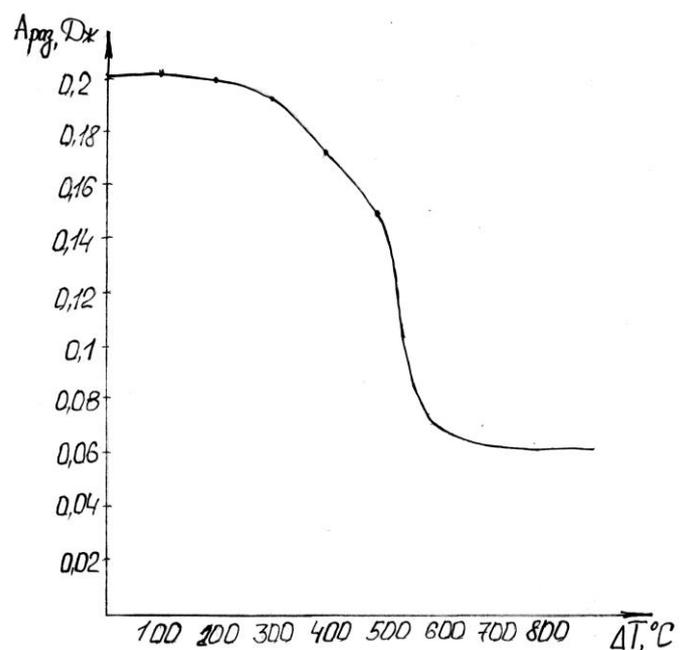


Рис. 4. Залежність енергії ударного розрушення образців граніта від різниці температур  $\Delta T$  нагріву та охолодження образців

Стекло та уголь випробувалися при нагріві до температур 400 °C так як при більшому нагріві скло починає втрачати еластичність, а уголь тліє та вигорає. Граніт нагрівався до температури 800 °C.

Випробування на стиснення показує, що всі зразки зберігають достатню високу несучу здатність навіть при порушенні їх щільної сіткою тріщин (особливо це видно на зразках скла). Прочність на стиснення скла – при одному циклі нагрів-охолодження з перепадом температур  $\Delta T = 400^{\circ}\text{C}$  падає в 1,7 рази, вугля – в 2 рази. Прочність граніта при перепаді температур  $\Delta T = 400^{\circ}\text{C}$  падає в 1,1 рази та в 2 рази при  $\Delta T = 800^{\circ}\text{C}$ .

Крепкість за методом дроблення є менш чутливою до термоциклічної обробки зразків. Крепкість скла падає в 1,23 рази при  $\Delta T = 400^{\circ}\text{C}$ , вугля – в 1,11 рази при  $\Delta T = 400^{\circ}\text{C}$ , граніта – в 1,1 рази при  $\Delta T = 400^{\circ}\text{C}$  та в 1,83 рази при  $\Delta T = 800^{\circ}\text{C}$ .

Найбільше вплив термоциклічної обробки має на показники ударного розрушення. Так, енергія розрушення зразків граніта при термоциклічній обробці з  $\Delta T = 400^{\circ}\text{C}$  падає в 1,22 рази, а при  $\Delta T = 800^{\circ}\text{C}$  уже в 3,4 рази.

Найбільше падіння міцності граніта при термоциклічній обробці починається з нагріву більш ніж 500 °C. Можливо, це пояснюється фазовими переходами в мінералі кварца, що входить до складу граніта.

При нагріві  $\beta$ -кварца (основної низкотемпературної модифікації) до температури 573 °C він перетворюється в  $\alpha$ -кварц. Перетворення низкотемпературного кварца в високотемпературний – процес, що протікає без розриву

координационных связей и поэтому относящийся к типу мгновенных трансформаций. При охлаждении этого минерала ниже  $573\text{ }^{\circ}\text{C}$   $\alpha$ -кварц обычно возвращается обратно в  $\beta$ -кварц. Установлено [3], что при резком охлаждении кварца, нагретого выше  $573\text{ }^{\circ}\text{C}$  в нем наблюдается специфическая форма инверсионных трещин сотовой структуры, которую можно наблюдать под микроскопом. Сотовые трещины, полученные резким охлаждением кварца из надинверсионной области в доинверсионную являются диагностическим признаком  $\alpha \leftrightarrow \beta$  превращений кварца [3]. Причем, эти трещины перехода образуются только при интенсивном охлаждении (например, водой) и их нет при медленном охлаждении (например на воздухе). Степень растрескивания кварца при этом очень высокая. Так, в экспериментах [3] получалась сетка трещин размером  $0,15 \times (0,2 \div 0,4)\text{ мм}^2$ . Если учитывать, что при образовании законченной сотовой структуры трещиноватости развитие трещин происходит как по поверхности породы, так и вглубь, то очевидно, что глубина развития этих трещин доходит, соответственно, до  $0,15 \div 0,4\text{ мм}$ . Такая структура трещин может оказать существенное влияние, например, на процесс алмазного бурения.

Следует отметить, что полиморфизм кремнезема имеет сложный характер. Во время охлаждения кварца происходит сокращение его объема следующим образом [5]:  $600 \rightarrow 500\text{ }^{\circ}\text{C}$  примерно на 2%;  $500 \rightarrow 400\text{ }^{\circ}\text{C}$  – на 1,5%;  $400 \rightarrow 300\text{ }^{\circ}\text{C}$  – на 1%. Общее уменьшение объема кварца при охлаждении от  $600$  до  $300\text{ }^{\circ}\text{C}$  составляет около 4,5-5%, при этом плотность изменяется с 2,5 для  $\alpha$ -кварца до 2,65 для  $\beta$ -кварца. Гистерезис температур превращения при нагреве и охлаждении составляет 0,5%. Влиять на процесс алмазного бурения может переход  $\alpha$ -кварца в  $\alpha$ -тридимит при температуре  $870\text{ }^{\circ}\text{C}$ . При достаточно интенсивном охлаждении  $\alpha$ -тридимита ниже  $163\text{ }^{\circ}\text{C}$  он превращается в  $\beta$ -тридимит, а при переходе через температурную границу  $117\text{ }^{\circ}\text{C}$  в  $\gamma$ -тридимит. Все эти переходы происходят в доли секунды и сопровождаются скачкообразными изменениями объема, приводящими к растрескиванию пород.

### **Список літератури**

1. Свойства горных пород и методы их определения. / Е.И. Ильницкая, Р.И. Тедер, Ватолин и др. – М.: Недра, 1969. – 392 с.
2. Разрушение горных пород при резком охлаждении: монография / А.А. Кожевников, В.В. Крисан, Ю.Н. Вахалин, А.О. Третьяков, О.В. Ливак. – Д.: ТОВ «Лизгунов Пресс», 2011. – 152 с.
3. Бергман Э.Д., Покровский Г.Н. Термическое разрушение горных пород плазмобурами. – Новосибирск: Наука, 1971. – 193 с.
4. Экспериментальные исследования разупрочнения горных пород при нагреве трением фрикционных элементов термомеханической коронки / С.А. Ермаков, Л.Н. Федоров, Д.С. Ващенко, Р.М. Скрыбин // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2010. – Вып. №7.
5. Дмитриев А.П., Гончаров С.А. Термическое и комбинированное разрушение горных пород. – М.: Недра, 1978. – 304 с.
6. Полуянский С.А., Алымов Б.Д., Трусков И.В. Плазмозарошечное разрушение крепких горных пород. – К. Наук. думка, 1979. – 192 с.

7. Миронов Е.И. Новые методы разрушения пород при скоростной проходке горных выработок в США // Горн. журн. – 1978. – № 3. – С. 69-72.

© Ганкевич В.Ф., Вахалин Ю.Н., Ливак О.В., 2019

*Надійшла до редколегій 16.01.2019  
Рекомендовано до публікації д.т.н. В.П. Франчуком*

УДК 622.775

<http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.18867.68642>

**В.В. САМОЙЛОВ В.В., О.А. БЕСАРАБОВ О.А.**

(Україна, ТОВ НВФ «Ракурс»)

**К.В. НІКОЛАЄНКО**, канд. техн. наук, **П.К. НІКОЛАЄНКО**,

(Україна, Кривий Ріг, Криворізький національний університет)

### **РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ ДОВИЛУЧЕННЯ ЗАЛІЗА З ПЕРЕРОБЛЕНИХ ШЛАКІВ МЕТАЛУРГІЙНОГО ВИРОБНИЦТВА**

*Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями.* З огляду на те, що при виплавці 1 т сталі, зі шлаком втрачається до 40 кг заліза у вигляді оксидів, скрапін і корольків, а також його мінеральна складова, переробка його є актуальною проблемою, вирішення якої дозволить знизити витрату природних сировинних ресурсів і поліпшити екологічну обстановку в прилеглий до відвалів місцевості.

*Аналіз досліджень і публікацій.* В даний час проблему утилізації шлаків вирішують двома шляхами: шлак в рідкому або твердому стані повертають в технологічний процес отримання залізобуглецевих сплавів; шлак виводять з металургійного циклу і використовують у господарській діяльності.

Найбільш поширеним, є другий шлях, при якому твердий шлак поетапно дробиться, та з нього «сухою» магнітною сепарацією видаляється металевий скрап. Цей метод переробки шлаку дозволяє ефективно видалити металеву фазу з крупних класів, У той же час у дрібних класах шлаку присутня достатня кількість заліза, як у формі металевого скрапу так і у формі оксидів заліза, які не вилучаються

*Постановка завдання.* Метою даних досліджень є, розробка технології та вибір обладнання для збагачення доменного шлаку крупністю 50-0 мм, який вже пройшов попередню переробку, для отримання з нього залізистого концентрату з вмістом заліза загального не менше 62% і підготовка вихідних даних для проектування збагачувальної фабрики продуктивністю 0,4 млн. т на рік по вихідному шлаку.

*Викладення матеріалу та результати.* Вихідний шлак був представлений матеріалом крупністю 50-0 мм.