

УДК 622.026

**В.Ф. Ганкевич**, канд. техн. Наук

(Украина, Днепр, Государственное ВУЗ “Национальный горный университет”),

**Ю.Н. Вахалин**, канд. техн. наук,

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

**О.В. Ливак**,

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

## **ВЛИЯНИЕ ТЕРМОЦИКЛИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ И ПРОЧНОСТНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД.**

Известно, что большая часть материальных и энергетических затрат при разведке, разработке и обогащении полезных ископаемых уходит на процессы, связанные с разрушением горных пород. в общем объеме добычи полезных ископаемых буровые работы являются наиболее трудоемким и дорогостоящим процессом, оказывающим большое влияние на эффективность горных работ в целом.

Основным видом бурения в настоящее время является механическое, однако разработаны и прошли испытания способы бурения, основанные на других, нетрадиционных, видах воздействия (термомеханических, термических, плазменных и др.). Исследования показали, что по многим показателям эти, нетрадиционные, способы бурения не уступают, а иногда даже и превосходят механические способы.

Особое место в этом ряду занимают термомеханические способы бурения, основанные на комбинации теплового и механического воздействия на горную породу. Несмотря на очень высокие потенциальные возможности этого метода, все попытки широкого использования его на практике наталкиваются на очень существенное препятствие, а именно, невозможность эффективной работы механических разрушающих элементов (твердосплавных, алмазных и т.д.) в области высоких температур. Наиболее эффективное разупрочнение горных пород начинается при нагреве до температур 600 °С и выше. Именно при этих температурах начинается катастрофический износ механических режущих инструментов. Любые попытки совместить высокий нагрев горной породы и одновременно работу по этой породе механического инструмента оканчиваются резким повышением износа разрушающих механических элементов, а следовательно и потерей эффективности бурения в целом.

Существует другой способ термомеханического воздействия, основанный на комбинации нагрев – резкое охлаждение и последующее механическое разрушение. В этом случае любой механический рабочий орган может работать в области комфортных температур. Установлено, что резкое охлаждение нагре-

тых горных пород водой приводит к существенному необратимому снижению механической прочности [1]. Наибольшее разупрочнение наблюдается при сбросе температуры начиная с 600 °С и выше.

Так, например, в кварце (основном породообразующем минерале) нагретом до температуры 573 °С при охлаждении водой, за счет фазовых превращений наблюдается образование очень плотной сетки инверсионных трещин сотовой структуры с размером ячейки сота  $0,14 \div 0,25$  мм [2].

Рассмотрим некоторые примеры на практике данного способа воздействия.

В ИГТМ НАН Украины пошли по пути получения скважин большого диаметра путем расширения скважин диаметром 0,135 м, при этом расширяемая часть массива переводилась в меньшую категорию крепости термоциклическим воздействием [1]. Интенсивное охлаждение (термический удар) поверхности горной породы приводит к развитию на ней растягивающих напряжений, которые при определенных условиях вызывают зарождение и рост вглубь массива трещин. Плотность трещин и глубина их проникновения определяются параметрами термического удара (разностью температур поверхности горной породы и хладагента) и временем охлаждения. Глубина развития нарушенной зоны в массиве может достигать десятков сантиметров и более при достаточно высокой плотности вновь образованных трещин, обеспечивающей снижение механической крепости этой зоны в несколько раз.

Применительно к процессу расширения скважин указанный способ ослабления реализовывался следующим образом. Стенки опережающей скважины на определенном участке длины ее подвергались тепловому воздействию высокотемпературным источником. В результате этого массив горной породы, прилегающий к скважине, постепенно разогревался, и после прогрева массива на достаточную глубину эти же стенки подвергались интенсивному охлаждению в течение времени, достаточного для того, чтобы вокруг скважины образовалась сеть трещин и достигла глубины задаваемого контура расширения.

В условиях шахты им. Кирова ПО "Кривбассруда" в наклонном автосъезде с борта карьера "Южный" были проведены экспериментальные исследования. Породы, где проводились эксперименты, были представлены железистыми кварцитами с прослойками гематито-мартитового роговика крепостью  $f = 12 \div 14$  по шкале проф. М.М. Протождяконова.

В качестве буровой машины использовался станок НКР-100М, в котором была произведена замена привода вращения буровых штанг и пневмоударника на более мощные. К нему был изготовлен ряд породоразрушающих инструментов диаметром 0,2-0,5 м, представляющих собой металлический диск соответствующего диаметра с наваренными на него с рабочей стороны по концентрическим окружностям коронками К-40. По периферии диска делались вырезы для выхода продуктов разрушения.

В качестве генератора ударных импульсов был принят пневмоударник П-1-115 конструкции НИГРИ МЧМ Украины с энергией удара до 250 Дж. В качестве высокотемпературного теплового источника был использован ИК -

излучатель в виде спирали накаливания из нихромовой проволоки со следующей технической характеристикой:

Длина, м	2,2
Диаметр, м	0,12
Мощность, кВт	38
Диаметр нихромовой проволоки, м	0,0055
Питающее напряжение, В	380

В качестве хладоагента использовалась вода с температурой +20 °С, подача которой производилась через специально изготовленный линейный охладитель, представляющий собой перфорированную трубу длиной 0,5 м с заглушённым передним отверстием. Для увеличения теплосъёма с нагретой поверхности в воду подавался сжатый воздух. Расход воды составлял 5-15 л/мин.

Для проведения широкого диапазона научных исследований методикой было предусмотрено применение отдельных операций нагрева, охлаждения и механического воздействия на массив горных пород.

В процессе экспериментального бурения производилось расширение опережающих скважин диаметром 0,135 м пробуренных станком НКР-10М до диаметров 0,2-0,5 и по простиранию пластов и вкрест простирания. Глубина их составляла на менее 4 м.

На первом этапе предварительно пробуренные скважины диаметром 0,135 м расширялись чисто механическим способом до диаметра 0,2-0,5 м. При этом определялась скорость их расширения механическим способом.

На втором этапе скважины расширялись предлагаемым термомеханическим способом со знакопеременным воздействием (ТМО – термомеханический способ с охлаждением) до диаметра 0,2-0,5 м.

При ТМО – способе расширения вначале излучатель вводился в опережающую скважину на длину предполагаемого расширения и производилось тепловое воздействие на ее стенки в течение 1 ч, после чего излучатель отключался от источника электроэнергии и извлекался из скважины. Затем в скважину вводился линейный охладитель и производилось охлаждение стенок ее на нагретом участке в течение 6-10 мин. После этого, производилось механическое расширение опережающей скважины по длине, соответствующей обработанному участку. В ходе механического расширения проводилось орошение водой забоя расширенной выработки, что еще более способствовало повышению эффективности проходки, поскольку в этом случае термоудар осуществлялся дополнительно по поверхности забоя, температура которой была еще достаточно высока. Кроме того, охлаждение забоя обеспечивало полное пылеподавление в процессе работы рабочего органа и охлаждало породоразрушающие инструменты, повышая их износостойкость.

При каждом эксперименте длина проходки составляла порядка 0,2-0,5 м.

Установлено, що при ТМО-способе розширення швидкість проходки виробок зростає в 2,3-3,5 рази в залежності від діаметра розширення. С збільшенням діаметра розширення приращення швидкості проходки зменшується. Це пояснюється тим, що кожному умову нагріву і наступного охолодження відповідає свій оптимальний діаметр розширення, так як при конкретному тепловому впливі тепло розповсюджується в масив на певну глибину; глибина растрескивання масиву від охолодження пропорційна глибині попереднього прогріву. Для умов даного експерименту, коли прогрів здійснювався впродовж 1 ч, оптимальний діаметр розширення становив 0,4 м. На рис. 2 представлена залежність об'ємної швидкості розширення від діаметра при механічному і ТМО-способах проходки з максимумом в області діаметрів 0,4 м.

Цей висновок підтверджувався і мінімальною енергоємністю процесу руйнування при розширенні до діаметрів 0,3-0,4 м.

Енергоємність процесу розширення визначалася за формулою

$$a = \frac{N_m + N_n + N_{ox}}{V_{об}}, \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^3, \quad (1)$$

де  $N_m$  – потужність механічної частини робочого органу для станка НКР-100М з пневматичним приводом обертання бурового става і пневмоударником типу П-1-115,  $N_m = 100$  кВт (виходячи з витрати стисненого повітря і енергії на його отримання);  $N_n$  – потужність генератора теплового впливу, йдуча на нагрів масиву,  $N_n = 38$  кВт;  $N_{ox}$  – потужність, йдуча на подачу хладагенту;  $V_{об}$  – об'ємна швидкість розширення розраховувалася за формулою

$$V_{об} = \frac{\pi}{4} (D^2 - d^2) \cdot V_n, \text{ м}^3/\text{ч}, \quad (2)$$

де  $D$  – діаметр розширеної скважини, м;  $d$  – діаметр розширюваної скважини, м;

$V_n$  – лінійна швидкість розширення м/с.

При розрахунку енергоємності приймався  $N_{ox} = 0$ , вважалося, що витрати енергії на подачу хладагенту незначительні порівняно з іншими витратами.

Енергоємність процесу ТМО руйнування при розширенні скважин порівняно з чисто механічним способом значно нижче. Наприклад, при розширенні скважин вкрест простягання пластів до діаметра 0,3 м енергоємність розширення при механічному способі становила  $5,3 \cdot 10^5$  кДж/м<sup>3</sup>, а при ТМО розширенні  $1,6 \cdot 10^5$  кДж/м<sup>3</sup>, т.е. зменшилася в 3,3 рази.

При этом, как показали исследования, износ породоразрушающих инструментов при механическом и ТМО – способах расширения примерно одинаков, однако учитывая, что при ТМО – проходке скорость в 2,3-3,5 раза выше, чем при механическом расширении, износостойкость, выраженная в погонных метрах, была в 2,3-3,5 раза больше.

Проведенные исследования показали перспективность применения рабочих органов, основанных на комбинированном воздействии на горные породы, включающем длительный нагрев призабойной зоны массива, длительное охлаждение и механическое разрушение.

На практике, в производственных условиях, такие рабочие органы могут быть реализованы двух типов: с совмещенной схемой процессов тепловой обработки массива и механического расширения; с отдельной схемой выполнения операций.

Совмещенная схема может быть реализована, например, в устройстве, в котором на направляющем пилоте первым размещен генератор тепла, осуществляющий тепловое воздействие на стенки опережающей скважины, затем охладитель, охлаждающий их, и следом механический расширитель. Все они жестко соединены между собой.

При отдельной схеме выполнения операций вначале производится тепловая обработка расширяемого массива, для чего генератор тепла с охладителем перемещаются по скважине, производя ее обработку. Механическое расширение выполняется отдельно от тепловой обработки, его можно производить по истечении любого промежутка времени после тепловой обработки, поскольку разупрочнение массива в результате последней необратимо.

В работе [3] рассмотрено влияние воздействия нагрев – охлаждение на тонкий поверхностный слой породы. Исследования проводились на образцах гранодиорита, представляющего из себя полнокристаллическую горную породу промежуточного состава между гранитом и кварцевым диоритом. Эксперименты проводились по следующей схеме:

- фрикционный нагрев поверхности горной породы стальным фрикционным кольцом с осевой нагрузкой от 1 до 4 кН и скоростью вращения 500 об/мин до температур от 100 до 700 С;
- резкое охлаждение нагретой поверхности струей воды с расходом 1,35 л/мин;
- измерение твердости  $P_{ин}$  поверхностного слоя после термоциклической обработки (для сравнения, измерение твердости производилось также после нагрева без обработки водой).

Авторами получена практически линейная зависимость изменения твердости гранодиорита от температуры нагрева поверхности.

При этом, для температур выше 600 °С, твердость поверхностного слоя снижается в 1,8 раза для нагрева и в 2 раза после цикла нагрев-охлаждение.

В ходе проведения экспериментов получен еще один важный результат. При термофрикционном воздействии наблюдается не только разупрочнение

поверхностного слоя, а и разрушения слоя шелушением в виде отделяющихся мелких чешуек, как это обычно имеет место при термическом бурении скважин газовыми струями [4].

Схема воздействия, где имеет место фрикционный нагрев участка поверхности породы, а затем резкое его охлаждение с последующим механическим разрушением имеет место при алмазном бурении. Под сектором коронки порода срезается алмазами и одновременно от трения разогревается, а при прохождении промывочного окна – резко охлаждается. Так как функции резания – нагрева под сектором совмещены, то режимы бурения подбираются таким образом, чтобы температура нагрева на забое была невысокой, во избежание катастрофического износа алмазов. Следовательно, эффект термоциклического разрушения в стандартных алмазных буровых коронках – невысок.

Предложена очень простая конструкция алмазной коронки в которой функции резания и нагрева разнесены [5]. Сбегающая часть сектора коронки выполнена в виде упругой консоли, армированной термостойким фрикционным материалом. Расчеты показывают, что такая конструкция позволяет разогревать участки породы до 600-1000 °С с последующим резким охлаждением. При этом рабочие алмазы выводятся из зоны высокого нагрева.

Для сравнения энергетических показателей термоциклического воздействия с некоторыми другими нетрадиционными способами разрушения проанализированы данные по исследованию плазмозарошечного и плазменного разрушения горных пород.

В ИГТМ АН Украины проводились испытания полноразмерных образцов плазмозарошечных породоразрушающих органов проходческих комбайнов, имитирующих проходческую машину 1КВ [6]. Исследования проводились в породах крепостью  $f = 16 \div 20$  по шкале проф. М.М. Протождяконова. Конструкция термомеханического рабочего органа предусматривала предварительный нагрев породы струей плазмотрона и последующее ее разрушение механической шарошкой. Применялись плазмотроны с мощностью 36, 65, 93 кВт. При определенных соотношениях тепловой и механической нагрузок удавалось добиваться минимальной энергоемкости плазмозарошечного разрушения в  $270 \div 350$  кВт·ч/м<sup>3</sup> ( $9,72 \cdot 10^5 \div 1,26 \cdot 10^6$  кДж/м<sup>3</sup>), при этом, энергоемкость проходки чисто механическим способом составляла  $300 \div 320$  кВт·ч/м<sup>3</sup> ( $1,08 \cdot 10^6 \div 1,152 \cdot 10^6$  кДж/м<sup>3</sup>), а скорость плазмозарошечной проходки в  $3 \div 4$  раза выше, чем механической.

Разрушение горных пород высокотемпературной газовой струей, истекающей из сопла плазмотрона, исследовалось Институтом горного дела совместно с Институтом теоретической и прикладной механики СО АН СССР на лабораторной плазменной установке и в производственных условиях [2].

Бурение выполнялось плазмобуром с воздушной вихревой стабилизацией дуги и воздушным охлаждением электродов. Наружный диаметр плазмобура составлял 70 мм. Мощность плазмобура менялась в пределах от 30 до 90 кВт. Бурение выполнялось в следующих породах: гранодиорите, граните, двуслюдя-

ном граните, аркозовом песчанике, диабазовом порфирите, кварците. Средний диаметр образованных скважин составлял 100 мм. Глубина буримых скважин составляла 600 – 700 мм. Энергетические показатели бурения для некоторых пород показаны в таблице 1.

*Таблица 1*

Порода	Мощность горелки, кВт	Объемная энергия разрушения, кВт·с/г [2].	Объемная энергия разрушения, кДж/м <sup>3</sup> × 10 <sup>6</sup>
Гранодиорит	30	48,5	130,9
	40	28,0	75,6
	60	16,2	43,7
	90	14,5	39,2
Гранит	30	12,5	33,7
	40	9,5	25,6
	60	8,5	22,9
	90	8,0	21,6
Диабазовый порфирит	30	36,0	97,2
	40	24,0	64,8
	60	15,0	40,5
	90	12,0	32,4
Кварцит	30	44,0	118,8
	40	34,0	91,8
	60	20,0	54,0
	90		43,2

Анализ приведенных исследований показывает, что удельная энергоемкость плазменного бурения существенно превышает аналогичный показатель для механического, а тем более термомеханического бурения скважин одного и того же диаметра. Это находится в полном соответствии с данными, приведенными в работе [7], где показана сравнительная оценка по энергоемкости различных способов разрушения горных пород. Здесь, относительный коэффициент энергоемкости термомеханического разрушения оценивается в 0,1, механического в 0,7, а плазменного в 120. Энергоемкость термомеханического разрушения с охлаждением нагретой породы (ТМО – разбуривание) имеет тот же порядок, что и плазмашарошечное разрушение.

Таким образом, для большинства горных пород охлаждение в воде после сильного нагрева является исключительным фактором разупрочнения. При этом, термоциклическое разупрочнение имеет преимущества перед другими термомеханическими способами разрушения:

- нет губительного влияния высоких температур на механические разрушающие элементы;
- термоциклическое разупрочнение необратимо, в отличие от ослабления породы чистым нагревом;

– в зоне разрушения любого бурового органа есть энергия в виде осевого усилия и вращения, что легко преобразуется в нагрев породы трением, и промывочная вода для резкого охлаждения нагретой породы.

### **Список литературы**

1. Разрушение горных пород при резком охлаждении: Моногр. / А.А. Кожевников, В.В. Крисан, Ю.Н. Вахалин и др. – Д.: ТОВ "Лизгунов Пресс", 2011. – 152 с.
2. Бергман Э.Д., Покровский Г.Н. Термическое разрушение горных пород плазмобурами. – Новосибирск: Наука, 1971. – 193 с.
3. 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.
4. Дмитриев А.П., Гончаров С.А. Термическое и комбинированное разрушение горных пород. – М.: Недра, 1978. – 304 с.
5. Патент України №110443. Бюл. №19. 10.10.2016/ А. Ю. Дреус, А.О. Кожевников, А.К. Судаков, Ю.Н. Вахалин. Термомеханічний породоруйнуючий інструмент.
6. Полуянский С.А., Алымов Б.Д., Трусков И.В. Плазмощарошечное 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., 2018

*Надійшла до редколегії 09.03.2018 р.*

*Рекомендовано до публікації д.т.н. П.І. Піловим*

УДК 622.27:621.926.9(339.138)

**А.О. БОГДАН,**

**В.С. БІЛЕЦЬКИЙ,** д-р техн. наук

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

**М.І. СОКУР,** д-р техн. наук

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

## **МОДЕЛЮВАННЯ НАПРУЖЕНОГО СТАНУ БАРАБАНА РУДОПОМОЛЬНОГО МЛИНА ЗА ДОПОМОГОЮ ПРОГРАМНОГО РЕСУРСУ SolidWorks**

*Постановка проблеми та стан її дослідження.* Для вивчення напруженого стану барабана рудопомольного млина застосовується фізичне і математичне, зокрема, комп'ютерне, моделювання. Водночас, фізичне моделювання багатотоннажних млинів самоподрібнення (AG) та напівсамоподрібнення (SAG) стикається зі значними проблемами, обумовленими труднощами в отриманні високоякісних даних для промислових об'єктів, що суттєво ускладнює експеримент