

ВИСНОВКИ

У нашому винаході [2, 4] ми врахували негативний досвід компанії Analog Device. Приведені графіки (рис.3-6) підтверджують правильність нашого рішення у винаході.

Наявність вагової обробки у винаході [2] приводить до того, що мобільна система контролю (МСК) стає системою з перемінними параметрами. Використання вагової обробки вимагає застосування окремого нуля-органа. Необхідність вагової обробки підкреслює значення цифрової техніки у винаході, оскільки згладжування сигналів помилки з перемінними ваговими коефіцієнтами можливо зручніше в МСК виконати в цифровому вигляді. Ця частина МСК виконується програмою і перетворювачами сигналу до цифрового вигляду.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- 1 Заміховський Л.М. Діагностика технічного стану штангових глибинно-насосних установок./ Л.М. Заміховський, В.А. Ровінський, О.В. Євчук.- Івано-Франківськ: Сімфонія форте, 2006.-307с.
- 2 Спосіб вібраційного контролю свердловинної штангової насосної установки і пристрій для його реалізації. /Б.В. Копей, В.В. Лопатін, О.І. Стефанишин. -Реєстр. номер заявки а201002864, Бюл.№23 2010; Опубл. 10.12.2010.
3. Турчин А.М. Электрические измерения величин/ А.М. Турчин. - ЛВИКА им. А.Ф. Можайского, - Л. - 1967, 429с.
4. Копей Б.В.Мобільні вимірювальні системи в нафтогазовій та гірничій промисловості/ Б.В. Копей, В.В. Лопатін, О.І. Стефанишин. Монографія. - Івано-Франківськ, ІФНТУНГ, 2010, - 392с.
5. Давачі прискорень у мобільних інформаційно-вимірювальних системах/ Б.В. Копей, В.В. Лопатін, І.Б. Копей, Ю.А. Бобошко // Нафтогазова енергетика. Усеукраїнський щоквартальний науково-технічний журнал. - № 3(4) - 2007.- С. 47-54.
6. Волович А. Интегральные акселерометры / А. Волович, Г. Волович // Электроника, -2002 - №7 - С. 69-74.

УДК 622.78 (045):622.02:543.226

Канд. техн. наук К.С. Ищенко,
научн. сотр. В.Я. Осенний
(ИГТМ НАН Украины)

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМА РАЗРУШЕНИЯ И СТРУКТУРНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ В ГОРНЫХ ПОРОДАХ ПРИ ИХ ТЕРМИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

Дослідження механізму крихкого термічного руйнування і структурні зміни в гірських породах при їх тепловому (плазмовому) навантаженні.

На основі теорії термопружності і енергетичних показників описуваного процесу розглянуто механізм крихкого термічного руйнування гірських порід. При його оцінці враховувалась градієнтна, структурна та термічна пружність мінералів в породі. У лабораторних умовах на відібраних зразках порід (шелушці) продуктів руйнування кварцитів і сланців Кривбасу в процесі розширення свердловин повітряною плазмою проведені дослідження їх структурних змін з використанням методів рентгеноструктурного, термогравіметричного і диференціально-термічного аналізів. Для їх реалізації використовувались дослідницькі комплекси дериватограф і ДРОН- 3.

За результатами теоретичних досліджень проведена оцінка механізму крихкого термічного руйнування з використанням критерію міцності Баландина для будь-якої породи. Розраховані чисельні значення лінійної швидкості крихкого руйнування для кварцитів. Експериментально за результатами рентгеноструктурного, термогравіметричного і хімічного аналізів проаналізовані ендотермічні і окислювальні процеси розкладання мінералів в гірській породі. При теоретичній оцінці механізму термічного руйнування гірської породи отримані основні вирази, що описують структурні і градієнтні напруження в породі при її відділенні

(лущенні). З урахуванням градієнтних і структурних напружень породи оцінено час та момент руйнування поверхневого шару і його товщину. Отримані чисельні значення лінійної швидкості крихкого руйнування для кварцитів. При нагріванні кварцитів в діапазоні температур 513-773 К встановлено руйнування його кристалічної решітки. Ці руйнування відбуваються за рахунок послаблення та розриву найбільш слабких хімічних зв'язків між частками мінералів, що входять в структуру породи. У рентгенівському спектрі кварциту в структурі його кристалічної решітки відбуваються поліморфні перетворення. Це призводить до зменшення довжини зв'язків між мінералами, а отже і збільшення енергії розриву кристалічної решітки після опромінення її повітряною плазмою. Виконані дослідження дозволять розробити нові технологічні прийоми підготовки вибухових свердловин для реалізації ресурсо- і енергозберігаючих способів руйнування та технології видобутку міцних складно-структурних рудних і нерудних корисних копалин України.

STUDYING OF MECHANISM OF THE ROCK BREAKING AND STRUCTURAL CHANGES IN THE ROCKS UNDER THERMAL LOADING

To study mechanism of fragile thermal breaking of and structural changes in the rocks under thermal (plasma) loading.

On the basis of thermoelasticity theory and energy values of the described process, mechanism of fragile thermal rock breaking is estimated with taking into account gradient, structural and thermal elasticity of minerals in the rocks. Different rock samples and their structural changes were studied in laboratory by x-ray diffraction, thermogravimetric and differentially-thermal analyses and with the help of such research devices as Derivatograph and DRON- 3.

Basing on the theoretical findings, the mechanism of fragile thermal breaking was estimated by the Balandin strength criterion for different types of rocks. Numeric values of linear speed of the fragile breaking were calculated for the quartzites. Endothermic and oxidizing processes of mineral decomposition in the rocks were analyzed experimentally basing on results of x-rays, thermogravimetric and chemical analyses. The theoretical estimation of the thermal rock breaking mechanism helps to obtain basic formulas which describe structural and gradient stresses occurred when the rocks are separated (decorticated). Duration and moment of the surface layer breaking and its thickness are specified with taking into account the gradient and structural stresses. Numeric values of linear speed of the fragile breaking were specified for the quartzites. It was determined that when quartzites are heated up to the temperature range between 513 K and 773 K, its crystalline lattice was broken. Such breaking happens due to weakening and destructing of the most loosely-coupled chemical bonds between the mineral particles contained in the rock structure. The x-rayed spectrum of quartzite shows that various polymorphic transformations occur in the structure of the quartzite crystalline lattice. It results in reduced length of bonds between minerals and, consequently, increased breakage energy of the crystalline lattice after the lattice is irradiated by air plasma. The findings will allow to design new technological practices of preparing the blastholes for applying energy-saving methods of the rock breaking and technology of mining hard ores and non-metallic minerals with complicate structures peculiar for the Ukrainian deposits.

Введение. Железорудная промышленность - одна из основных отраслей горно-металлургического комплекса (ГМК) Украины, которая обеспечивает более четверти валового национального продукта и более 40% валютных поступлений [1]. По выпуску железорудного сырья в настоящее время доминируют предприятия с открытым способом разработки полезных ископаемых [2]. Глубина на ряде карьеров Кривбасса достигла своей проектной величины. Отставание вскрышных работ на горно-обогатительных комбинатах постоянно увеличивается, что усложняет ведение работ и повышает себестоимость 1т руды. А

это значит, что перевод предприятий на открыто-подземную разработку железистых кварцитов очевиден. Что же касается буровзрывного комплекса, то он на подземных работах остается без существенных изменений. Отсюда следует, что существующие методы расчета скважинных зарядов не учитывают новых подходов в корректировке и совершенствовании их конструкций в связи с постоянно изменяющимися условиями добычи крепких руд. Поэтому, при расчете основных параметров буровзрывных работ – обоснование конструкций скважинных зарядов, тип применяемого ВВ и размещение его в рудном массиве, очередность инициирования зарядов, должны быть учтены изменяющиеся горно-геологические и горнотехнические условия залегания, структурные особенности горных пород и напряженно-деформированное состояние массива в местах ведения горных работ.

Следовательно, подготовка зарядных полостей для размещения взрывчатых веществ в массиве горных пород является важным технологическим звеном при взрывных работах. По мнению авторов работы [3], для создания увеличенного диаметра на определенных участках скважин – котловых полостей с концентрацией в них ВВ, необходимо применять такую технику и технологии, которые обеспечивали бы в дальнейшем эффективную взрывную отбойку, дробление и измельчение руды. Перспективной технологией создания в массиве котловых расширений является комбинированная технология обуривания блоков железистых кварцитов заключающаяся в бурении механическими, пневмоударными или гидроударными станками скважин малого диаметра по расширенной сетке и последующее их термическое расширение в заданных частях взрывной скважины плазменным способом, электродуговыми плазмотронами. С этой целью в ИГТМ НАН Украины разработаны и испытаны в промышленных условиях Кривбасса различные модификации плазменных установок – УПРС-1, УПРС, УПС [4, 5]. Размещенные заряды ВВ в котловых расширениях при меньшей массе его излучают такую же удельную энергию, как при взрыве цилиндрического заряда, масса которого в 1,5 раза больше.

Исследования по определению рациональных параметров теплового нагружения массива с целью формирования котловых полостей и эффективного термического разрушения железистых кварцитов требуют глубокого изучения физико-химических процессов, происходящих в породах при высокотемпературном нагревании.

Анализ состояния проблемы. Процессы термического разрушения крепких руд и сопутствующих пород при расширении скважин представляют собой хрупкое поверхностное шелушение, происходящее под действием градиентных и структурных термических напряжений. Термическое воздействие на горные породы формирует градиентные напряжения, возникающие в породах при наличии градиента температур, а структурные – возникающие в минеральных зернах породы и, прежде всего, на их контактах, зависящие от свойств соседних минералов, слагающих разрушаемую породу. Структурные термические напряжения возникают в породе, как при наличии градиента температур, так и при ее равномерном нагреве.

В настоящее время частично описан механизм термического хрупкого шелушения породы, исходя из теории термоупругости, на основе рассмотренных градиентных термических напряжений [6-10]. Автор работы [11] пытался оценить механизм хрупкого термического разрушения горных пород с позиции теории термоупругости и энергетических показателей процесса. Механизм хрупкого термического разрушения горных пород с учетом градиентных и структурных термических напряжений впервые описан в работе [12]. В связи с этим для разработки новых технологических приемов ресурсосберегающих технологий ведения буровзрывных работ в крепких сложно-структурных породах необходимо теоретически описать и в последующем развить механизм хрупкого термического разрушения горных пород, а также экспериментально оценить характер разрушения пород при тепловом (плазменном) воздействии на горный массив и структурные изменения в минеральных зернах породы (шелушке) на их контактах. Поэтому, решение описанных выше проблем является актуальной научно-технической задачей для горнодобывающей отрасли Украины.

Цель работы – исследование механизма хрупкого термического разрушения и структурные изменения в горных породах при их тепловом (плазменном) нагружении.

Методика, задачи и результаты исследований. Ввиду того, что на сегодняшний день нет единого мнения о механизме и параметрах, определяющих хрупкое разрушение различных горных пород, воспользуемся моделью, которая описывает полупространство вида $Z \geq 0$, заполненного неоднородной средой со свойствами горной породы и слагающих ее минералов, нагреваемого теплоносителем с температурой θ и коэффициентом теплопередачи α . Такая модель является вполне корректной для всех процессов хрупкого разрушения горных пород (расширение скважин), так как продукты шелушения минимум на два порядка по своим размерам меньше поверхности нагрева породы при этих процессах.

Тогда градиентные напряжения в породе для принятой модели задачи можно представить в виде

$$\sigma_{\delta\delta} = \sigma_{yy} = \beta ET(1 - \mu)^{-1}; \quad (1)$$

$$\sigma_{xy} = \sigma_{yz} = \sigma_{zx} = \sigma_{zz} = 0, \quad (2)$$

где

$$T = \theta \left[\operatorname{erfc} \frac{z}{2(a\tau)^{1/2}} - \exp(h^2 a \tau + hz) \operatorname{erfc} \frac{\tau + 2ha\tau}{2(a\tau)^{1/2}} \right]; \quad (3)$$

$$\operatorname{erfc}(u) = 2\pi^{-1/2} \int_u^{\infty} \exp(-u^2) du;$$

β – коэффициент линейного теплового расширения породы, $1/^\circ\text{C}$; E – модуль упругости породы, Па; μ – коэффициент Пуассона; a – температуропроводность породы, $\text{м}^2/\text{с}$; τ – продолжительность нагрева, с; $h = a/\lambda$, $1/\text{м}$; λ – теплопроводность породы, $\text{Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$.

Структурные термические напряжения описываются выражениями [12]:

$$(\sigma_{ji})_1 = -\delta_{ji} \left\{ \frac{\beta E}{1-\mu} \left[\gamma_i \frac{G_1(G-G_2)}{G(G_1-G_2)} + \frac{2}{3} \frac{K_1(K-K_2)}{K(K_1-K_2)} \right] + \frac{3K_1K_2}{K_2-K_1} (\bar{\beta} - \beta) \right\} \frac{\tau}{P_1}; \quad (4)$$

$$(\sigma_{ji})_2 = -\delta_{ji} \left\{ \frac{\beta E}{1-\mu} \left[\gamma_i \frac{G_2(G-G_1)}{G(G_2-G_1)} + \frac{2}{3} \frac{K_2(K-K_1)}{K(K_2-K_1)} \right] + \frac{3K_1K_2}{K_1-K_2} (\bar{\beta} - \beta) \right\} \frac{\tau}{P_2}. \quad (5)$$

где индексы 1 и 2 относятся, соответственно к первому и второму смежным минералам породы; δ_{ji} – единичный тензор Кронекера: $\delta_{ji} = 1$, если $j = i$, $\delta_{ji} = 0$, если $j \neq i$; $\gamma_x = \gamma_y = 1/3$, $\gamma_z = -2/3$; G , K – модуль сдвига и модуль всестороннего сжатия, Па; $\bar{\beta}$ – средневзвешенное значение коэффициента линейного теплового расширения породы, состоящей из минералов 1 и 2, $\bar{\beta} = \beta_1 P_1 + \beta_2 P_2$; P_1 и P_2 – объемное содержание первого и второго минералов в породе.

Рассмотрим механизм хрупкого термического разрушения пород, который учитывает градиентные и структурные напряжения. Для этого представим, что в поверхностном слое любой породы существует определенная система микротрещин с различной ориентацией (рис.1) на границе которой, между породными слоями, на ее поверхности напряжения находятся в равновесном состоянии $\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z = 0$.

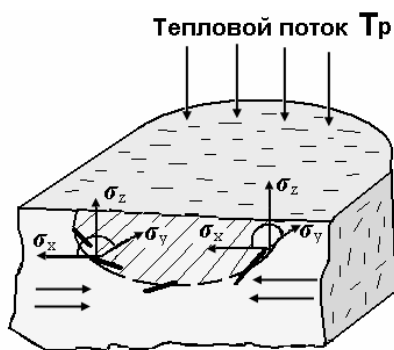


Рис. 1 – Слой горной породы с микротрещинами, подверженный тепловому нагружению

Тогда, под действием структурных термических напряжений (4) и (5) вблизи от нагреваемой поверхности микродефекты (в первую очередь на границе минеральных зерен) развиваются сначала как трещины сдвига, а затем в поле сжимающих напряжений (1) переходят в трещины отрыва, ориентированные примерно параллельно нагреваемой поверхности. В тот момент, когда напряжения при двухосном сжатии поверхностного слоя породы достигают предельного значения σ_d происходит потеря устойчивости этого слоя, ограниченного

сверху трещиной отрыва. Края трещины отрыва при этом выходят на свободную поверхность. Происходит так называемое шелушение породы с поверхности по механизму потери устойчивости поверхностного слоя.

Следовательно, в тот момент, когда поверхность нагреваемой породы растет до температуры разрушения T_p , двухосные сжимающие напряжения достигают предельного значения σ_d и поверхностный слой толщиной Δ , отделенный снизу трещиной отрыва, теряет устойчивость. Проведем оценку параметров хрупкого термического разрушения воспользовавшись критерием прочности Баландина для любой породы. Тогда условие разрушения примет вид

$$\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - \sigma_1\sigma_2 - \sigma_2\sigma_3 - \sigma_3\sigma_1 - (\sigma_{\tilde{n}} - \sigma_{\delta}) \cdot (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) = \sigma_{\delta}\sigma_{\tilde{n}}, \quad (6)$$

где $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – главные градиенты напряжений, Па; σ_c, σ_p – предел прочности породы на сжатие и растяжение, Па.

Согласно принятой модели, $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_{xx} = \sigma_{yy}, \sigma_3 = \sigma_{zz}$, а в предельном случае $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_d$, где σ_d – предел прочности на двухосное сжатие, Па. С учетом этого выражение (6) примет вид:

$$\sigma_{\tilde{a}}^2 - \sigma_{\tilde{a}}(\sigma_{\tilde{n}} - \sigma_{\delta}) - \sigma_{\tilde{n}}\sigma_{\delta} = 0, \quad (7)$$

Откуда

$$\sigma_{\tilde{a}} = \sigma_{\tilde{n}} - \sigma_{\delta} + \left(\sigma_{\tilde{n}}^2 - \sigma_{\tilde{n}}\sigma_{\delta} + \sigma_{\delta}^2 \right)^{1/2} \quad (8)$$

Пренебрегая значением σ_p по сравнению с σ_c , из выражения (8) получим

$$\sigma_{\tilde{a}} \approx 2\sigma_{\tilde{n}}. \quad (9)$$

С учетом (9) из (1) для момента разрушения поверхностного слоя, согласно механизму потери устойчивости, имеем

$$\dot{O}_{\delta} = 2\sigma_{\tilde{n}}(1 - \mu) \cdot (\beta E)^{-1}. \quad (10)$$

Тогда в момент разрушения поверхностного слоя из (3) получим

$$\psi(0, \tau_{\delta}) = \dot{O}_{\delta} / \theta, \quad (11)$$

где τ_p – время от начала нагрева до момента разрушения поверхностного слоя, с.

Определив τ_p из (11) и подставив его значение в (3), найдем толщину отделяющихся частиц породы Δ из выражения

$$\psi(\Delta, \tau_\delta) = \dot{Q}_\Delta / \theta, \quad (12)$$

где T_Δ – температура породы на глубине Δ в момент времени τ_p .

Определить линейную скорость хрупкого термического разрушения породы, зная Δ и τ_p , из (11) и (12), можно из выражения $v_{\dot{\epsilon}} = \Delta / \tau_\delta$ или по формуле из работы [11]

$$v_{\dot{\epsilon}} = \alpha a \lambda^{-1} (\theta - T_p) \cdot (T_p - \gamma_c / c)^{-1}, \quad (13)$$

где γ_c – скрытая энергия разрушения, то есть та энергия, которая уносится вместе с единицей массы разрушенной породы, Дж/кг; c – удельная теплоемкость породы, Дж/(кг·К).

Численное значение отношения γ_c / c не менее чем на три порядка меньше численного значения T_p . Пренебрегая значением γ_c / c , из (13) получим

$$v_{\dot{\epsilon}} = \alpha a \lambda^{-1} (\theta / T_p - 1), \quad (14)$$

Для хрупких железистых кварцитов T_p колебалась от 360 °С до 450 °С. Принимая во внимание, что для плазменных процессов усредненная температура для забоя колебалась от 1200 до 1300 °С, то линейная скорость расширения скважины с диаметра 105 мм до диаметров равном – Ø 200, 300, 400 и 500 мм составила: $v_{\dot{\epsilon}} = 5-6$ м/ч; $v_{\dot{\epsilon}} = 2,5-3,0$ м/ч; $v_{\dot{\epsilon}} = 0,8-1,2$ м/ч; $v_{\dot{\epsilon}} = 0,6-0,9$ м/ч соответственно.

Объемную скорость $v_{об}$ хрупкого термического разрушения породы определим из выражения

$$v_{\dot{\epsilon}} = \int v_{\dot{\epsilon}} dS, \quad (15)$$

где S – поверхность нагреваемой породы, ограниченная изолинией $\theta = T_p$ – при расширении скважин – площадь образующей поверхности усеченного конуса.

Тогда, для примера рассмотрим процессы термического расширения скважин, работы по созданию котловых расширений ведут согласно разработанной технологии снизу вверх и разрушаемая поверхность скважины представляет собой боковую поверхность усеченного конуса. Ниже нижнего и выше верхнего сечения усеченного конуса параметры теплоносителя уже недостаточны для обеспечения условий хрупкого термического разрушения породы. Следовательно, ниже нижнего сечения усеченного конуса радиус его равен радиусу котлового расширения R_k , а выше верхнего – радиусу скважины R_c . В точках образующей усеченного конуса на уровне верхнего и нижнего его сечений температура теплоносителя равна T_p . Распределение температуры теплоносителя θ по длине образующей L поверхности усеченного конуса можно описать уравнением

$$\theta = \theta_i n_2^2 (L^2 + n_2^2)^{-1}, \quad (16)$$

где θ_0 – максимальная температура теплоносителя, °С; n_2 – параметр, характеризующий распределение температуры теплоносителя по длине образующей поверхности усеченного конуса характеризует его длину. При $L = n_2$ из (17) получим $\theta = \theta_0 / 2$. Это свидетельствует о том, что параметр n_2 характеризует расстояние точки $L/2$, на котором по длине образующей усеченного конуса температура теплоносителя уменьшается в два раза. При расширении скважины плазменными установками $n_2 \approx 0,35$ м. При $L = L_p$, где L_p – расстояние от точки $L/2$, на котором $\theta = T_p$, из (16) получим

$$T_p = \theta_0 n_2^2 (L_p^2 + n_2^2)^{-1},$$

откуда
$$L_p = n_2 \left[\left(\theta_0 / T_p \right) - 1 \right]^{1/2}.$$

Элементарную кольцевую поверхность по образующей усеченного конуса можно представить в виде

$$dS = \pi \left[R_{\dot{e}} + R_c - (L / L_p) \cdot (R_{\dot{e}} - R_c) \right] dL. \quad (17)$$

Тогда объемная скорость хрупкого термического разрушения породы при расширении скважин, согласно (15) с учетом (14) и (17), будет

$$\begin{aligned} v_{\dot{a}}^n &= \int_s v_{\dot{e}} dS = \frac{\pi \alpha a}{\lambda} \int_{-L_p}^{L_p} \left(\frac{\theta}{T_p} - 1 \right) \left[R_{\dot{e}} + R_c - \frac{L}{L_p} (R_{\dot{e}} - R_c) \right] dL = \\ &= \frac{\pi \alpha a}{\lambda} \int_{-L_p}^{L_p} \left[\frac{\theta_0 n_2^2}{T_p (L^2 + n_2^2)} - 1 \right] \cdot \left[R_{\dot{e}} + R_c - \frac{L}{L_p} (R_{\dot{e}} - R_c) \right] dL = \\ &= \frac{2\pi \alpha a n_2}{\lambda T_p} \left\{ (R_{\dot{e}} + R_c) \left[\theta_0 \operatorname{arctg} \left(\frac{\theta_0}{T_p} - 1 \right)^{1/2} - T_p \left(\frac{\theta_0}{T_p} - 1 \right)^{1/2} \right] - \frac{R_{\dot{e}} - R_c}{2 \left[\left(\theta_0 / T_p \right) - 1 \right]^{1/2}} \left[\theta_0 \ln \left(\frac{\theta_0}{T_p} \right) - \theta_0 + T_p \right] \right\}. \quad (18) \end{aligned}$$

Максимальная линейная скорость термического хрупкого разрушения породы при расширении скважины будет в точке $L/2$, когда выполняется условие $\theta = \theta_0$:

$$v_{\dot{e}_{\max}} = \alpha a \lambda^{-1} \left(\theta_0 / T_p - 1 \right). \quad (19)$$

С учетом (19) из (18) получим максимальную объемную скорость разрушения породы в точке $L/2$ при расширении скважин:

$$v_{\dot{u} \max}^n = v_{\dot{e} \max} \frac{2\pi n_2}{\theta_o - T_p} \left\{ \begin{array}{l} (R_e + R_c) \left[\theta_o \arctg \left(\frac{\theta_i}{T_p} - 1 \right)^{1/2} - T_p \left(\frac{\theta_o}{T_p} - 1 \right)^{1/2} \right] - \\ - \frac{R_e - R_c}{2 \left[\left(\frac{\theta_o}{T_p} - 1 \right)^{1/2} \right]} \left[\theta_o \ln \left(\frac{\theta_o}{T_p} \right) - \theta_o + T_p \right] \end{array} \right\}. \quad (20)$$

Исследование физико-химических процессов при термическом расширении скважин в магнетитовых кварцитах Кривбасса методом дифференциально-термического анализа и изучения химического, минерального состава кварцитов, а также выделяющихся газов позволили определить, что при нагреве кварцитов в диапазоне температур 550-775 К одновременно с окислительными процессами происходят эндотермические процессы разложения минералов – дегидратация гетита и диссоциация сидерита [13]. В результате реакций разложения минералов разрушаются их кристаллические решетки, что происходит за счет ослабления и разрыва наиболее слабых химических связей между частицами и на что затрачивается энергия, минимальная величина которых характеризуется величиной энергии активации.

Энергия активации E является одним из параметров кинетического уравнения Аррениуса, описывающего температурную зависимость константы скорости реакции k в широком интервале температур для реакций различных порядков:

$$k = A \cdot e^{-E/RT}, \quad (21)$$

где A – предэкспоненциальный коэффициент; R – универсальная газовая постоянная.

Кинетические параметры реакций дегидратации и диссоциации минералов, относящихся к реакциям типа $A_{ТВ} \rightarrow B_{ТВ} + C_{ГАЗ}$ и не сопровождающиеся образованием промежуточных продуктов, можно определять неизотермическим методом, по кривым потери массы образцов (кривая ТГ), полученными в условиях линейного повышения температуры. Эндотермический эффект разложения гетита и сидерита в магнетитовых кварцитах, как видно из термограмм, полученных на приборе «Дериватограф», сопровождается потерей массы кварцитов (от 0,5 до 1,16 %), нагреваемых в атмосфере воздуха, а также инертной атмосфере азота, что позволяет рассчитать кинетические параметры процессов термического разложения минералов по известным методикам [14, 15].

Определение величин энергии активации и предэкспоненциального множителя сводится к решению кинетического уравнения в логарифмической форме [14]:

$$\ln \left[\frac{1}{(1-\alpha)^n} \cdot \frac{d\alpha}{dT} \right] = \ln \frac{A}{q} - \frac{E}{RT}, \quad (22)$$

где α – изменение массы образцов при нагревании; q – скорость подъема температуры в образце; n – порядок реакции.

Рассматриваемый в решаемой задаче математический коэффициент, оценивающий порядок реакции разложения при котором скорость ее термического разложения максимальна для твердых тел, то их средние значения можно рассчитывать для всего температурного интервала разложения минералов в породе, как графическим методом, так и по известным зависимостям [16].

Для графического определения энергии активации предэкспоненциального множителя на термограмме кривую ТГ делят параллельными линиями через 10° и для каждой температуры определяют потери массы W (мг), а также величины мгновенной скорости $\frac{dW}{dT}$ (методом численного дифференцирования). С учетом величины потери массы в конце реакции W_k рассчитывают и строят зависимость

$$\ln \left[\frac{1}{\left(1 - \frac{W}{W_e}\right)^n} \cdot \frac{dW}{dT} \cdot \frac{1}{W_e} \right] \quad (23)$$

от обратной температуры нагрева ($10^3/T$). Из полученной линейной зависимости можно определить величину энергии активации по наклону прямой ($E = R \cdot \text{tg} \varphi$) и величину предэкспоненциального множителя по величине отрезка, отсекаемого прямой на оси ординат ($\ln \frac{A}{q}$).

Для обработки и оценки дериватограмм, величины порядка реакции и сравнение полученных кинетических параметров воспользуемся методами математического анализа, согласно работ [14, 16, 17].

Данные расчета кинетических параметров разложения минералов в магнетитовых кварцитах, нагреваемых со скоростью 10-15 град/мин в воздушной и инертной средах приведены в таблице 1.

Как видно из табл. 1, температурные интервалы, в которых наиболее интенсивно происходят реакции разложения гетита и сидерита в исследуемых образцах магнетитовых кварцитов и которые определяются графическим методом (кривые ДТГ и ТГ), различаются незначительно и находятся в пределах от 513-573 до 773-813 К. Температуры, соответствующие максимальной скорости реакции разложения, то есть пикам (кривой ДТГ), определяющим точки перегиба C_s , составляют 623-653 К.

Таблица 1 – Кинетические параметры разложения минералов в магнетитовых кварцитах Кривбасса

Номер образца	Атмосфера печи	Скорость нагрева q , град/мин	Температурный интервал эффекта T , К	Температура, соответствующая максимальной скорости разложения, К	Потеря массы в конце реакции W_k , %	Порядок реакции		Энергия активации E , кДж/моль
						n_{cp}	n_{cs}	
9301	О	15	543-773	633	0,93	–	1,86	106,9
	N_2	10	543-773	643	1,61	2,10	2,00	108,5
9315	О	15	543-793	653	0,51	1,75	2,15	106,3
	N_2	10	573-813	628	1,84	1,75	2,33	105,3
9321	О	10	513-773	623	0,54	–	2,59	99,1

Потери массы у образцов магнетитовых кварцитов в конце реакции разложения составляют от 0,51 до 0,93 % при нагреве в воздушной атмосфере и от 1,61 до 1,84 % в атмосфере азота. Значительная разница в потерях массы образцов пород при их нагреве в различных атмосферах печи объясняется окислительными процессами, проходящими в магнетите в атмосфере воздуха и сопровождавшимися увеличением массы.

Величины порядка реакции, рассчитанные по точке перегиба (кривая ДТГ) n_{cs} , и средние для всего температурного интервала n_{cp} несколько отличаются. Так, величина n_{cs} составляет 1,75-2,10, а величина n_{cp} – 1,86-2,59. Величины энергии активации, необходимые для начала процесса разложения минералов при температурах 513-773 К, имеют близкие значения – 99,1-108,5 кДж/моль.

Кинетические параметры реакции разложения минералов, как видно из табл. 1, практически не изменяются при прохождении реакции в различных газовых средах – в воздухе, азоте.

Расчетные кинетические параметры разложения минералов, выполненные с использованием обзорной термограммы, несколько отличаются по своим значениям от показателей потерь массы минералов из-за большой крутизны кривой ТГ. Поэтому дополнительно была построена растянутая термограмма при небольшой скорости нагрева 2,5 град/мин. Результаты уточненного расчета по растянутой термограмме, приведенные в таблице 2, показали, что величина порядка реакции уменьшается, приближаясь к 1, однако энергия активации практически не изменяется, величина ее составляет 100,5-112,6 кДж/моль.

Величина энергии активации, определяющая энергетическую возможность начала реакции разложения, характеризует величину теплоты разложения, разность между которыми уменьшается с уменьшением порядка реакции. В связи с этим можно предположить, что в магнетитовых кварцитах для разложения минералов (диссоциации сидерита и дегидратации гетита), разрушения их кри-

сталлических решеток при 513-773 К требуются затраты тепла, по величине приблизительно равные величинам энергии активации.

Таблица 2 – Уточненные кинетические параметры реакции разложения минералов в магнетитовых кварцитах

Номер образца	Скорость нагрева q , град/мин	Порядок реакции n_{cp}	Множитель A , c^{-1}	Энергия активации E , кДж/моль
9301	2,5	1,39	$1,75 \cdot 10^5$	101,3
		1,38	$2,48 \cdot 10^6$	112,6
0,88		$1,75 \cdot 10^5$	100,5	
9321		1,37	$3,03 \cdot 10^5$	100,8

Определение кинетических параметров, входящих в уравнение (21), позволяет рассчитать величину константы скорости химической реакции разложения минералов. Зависимость k от температуры нагрева в диапазоне 573-753 К для магнетитовых кварцитов носит экспоненциальный характер. Константа скорости реакции возрастает (для образца № 9315) от $1,2 \cdot 10^{-4} c^{-1}$ при 573 К до $1,9 \cdot 10^{-2} c^{-1}$ при 753 К, но если увеличить температуру на 30^0 , например от 693 до 723 К или от 723 до 753 К, величина k удваивается. Константа скорости при величинах порядка реакции, близких к 1, равна скорости реакции V ($V = k\pi^2$ [15]), которая оценивает скорость уменьшения концентраций исходных реагентов во времени или скорость разложения минералов и существенно зависит от температуры нагрева.

На полученных термограммах в температурных интервалах 473-633 К, 633-723, 773-833, 873-1513, 1523-1643, 1643-1693, 1723-1733 К зарегистрированы аномальные участки (характерные изломы, горбы) - эндотермические и экзотермические эффекты, указывающие на прохождение в породах фазовых превращений и химических реакций. Термические эффекты имеют различные геометрические формы, амплитуды, площади дифференциальных кривых нагревания (ДТА) и, в основном, сопровождаются изменением массы вещества. Характерный ход кривых ДТА показывает, что изменение массы образцов происходит только при химических процессах (дегидратации, диссоциации, окислении) и позволяют выявить природу термических эффектов, протекающих в породах при нагревании.

Так, в температурном интервале 293-873 К зафиксированы несколько экзотермических эффектов, растянутость и асимметрия которых указывают на относительно медленно проходящие процессы. Для выяснения физико-химической сущности этих эффектов проведены дополнительные исследования в атмосфере азота (N_2), а также при охлаждении нагретой до 893 К в воздушной атмосфере породы. Сравнение термограмм показывает, что характер процессов в породах, проходящих при нагреве в атмосфере воздуха и азота, совершенно различен. В воздушной среде на термограммах регистрируются все термиче-

ские эффекты, протекающие в породе при нагреве, а в инертном газе не фиксируются эффекты, обусловленные окислительными процессами. Термограммы при нагревании и охлаждении нагретой породы позволяют выявить обратимые полиморфные превращения.

Анализ процессов, происходящих в магнетитовом кварците в диапазоне температур 423-873 К, показал очень сложные превращения: дегидратацию и диссоциацию, приводящие к разрушению кристаллической решетки минералов; окислению и образованию новых фаз; обратимые полиморфные превращения; сложный механизм химических реакций, а также термическое разложение минералов. При этом, энергия активации реакции, необходимая для разрыва или ослабления отдельных химических связей в породе при этих процессах, составляет 106 ккал/моль, концентрация вещества – 0,57 г, порядок реакции – 1. Это позволяет определить скорость данной реакции и температурную зависимость константы скорости.

По построенным термогравиметрическим кривым (ТГ, ДТА, ДТГ) проведены комплексные исследования процессов, происходящих в горных породах при термическом нагружении. Так, согласно анализу построенных кривых установлено, что первая стадия дегидратации заключается в потере хлоритами приблизительно половины структурной воды и сопровождается миграцией ионов *Mg* в направлении гидроксильных слоев бруситовой сетки. На второй же стадии дегидратации образуется оливин. Причем, ориентировка вновь образованных кристаллов оливина непосредственно связана со структурой исходного хлорита. В процессе этого термического превращения из структуры удаляются кремнезем и вода. При температурах ~ 640°C первое термическое превращение соответствует дегидратации бруситового слоя, а при температуре 800°C – талькового слоя структуры хлоритов. Отношение площадей под кривой ДТГ, облучаемых и необлученных хлоритов приблизительно равно ~ 1,7, что соответствует отношению энергий активации.

Анализ результатов термогравиметрических исследований показал, что кинетические константы эндотермических процессов, протекающих в кристаллических решетках хлорито-аспидных сланцев, подвергнутых облучению воздушной плазмы, а в решетках исходной фазы значительно отличаются, что подтверждают результаты расчета энергии активации [18, 19].

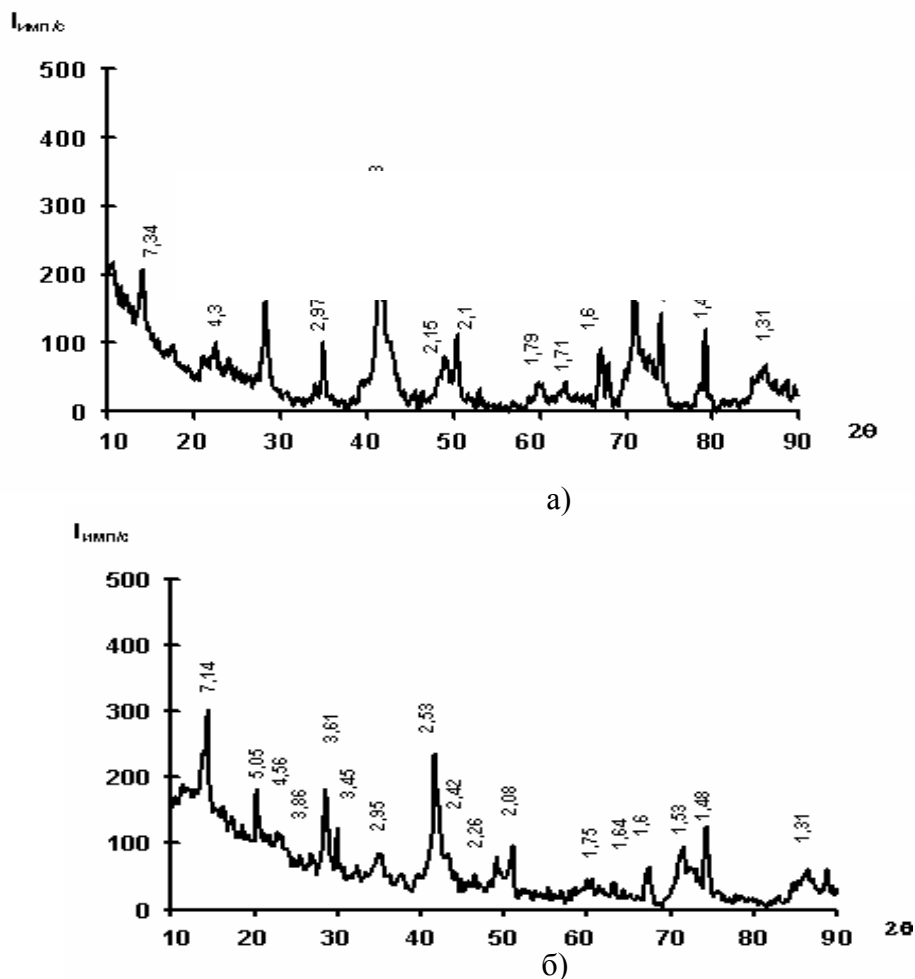
Для полной оценки изменений, происходящих в кристаллических решетках хлоритов и кварцитов (шелушке) и процессов, провоцирующих их изменения, проведен рентгеноструктурный анализ параметров этих решеток на автоматизированном комплексе ДРОН-3 в монохроматизированном C_{α} - K_{α} излучении по известным методикам, а расшифровка их фазового состава проведена по специальным карточкам [20, 21].

Рентгенофазный анализ в составе исходного хлорито-аспидного сланца показал кварц, сидерит, хлорит и мусковит с небольшим количеством магнетита. Аспидный сланец подвергнутый высокотемпературным потокам плазмы (шелушка отделившаяся от забоя, фракции +12) содержит также кварц, сидерит, хлорит, мусковит и маггемит. Это говорит о том, что в процессе нагревания породы произошли фазовые

изменения в структуре магнетита. В небольшом количестве появился магнезиоферрит. Межплоскостные расстояния магнетита и магнезиоферрита незначительно отличаются.

Межплоскостные расстояния у шелушки хлорита несколько выше, чем у исходного хлорита (материнская порода).

На рис. 2 *а*; *б*; представлены рентгеновские дифрактограммы исследуемых типов пород (шелушек): *а* – хлоритов и *б* – кварцитов.



а) – хлорит; б) – кварцит.

Рис. 2 – Рентгеновские дифрактограммы испытуемых образцов пород Криворожского бассейна

Сравнение анализируемых дифрактограмм позволяет судить об изменении структурных параметров горных пород. Так, рентгенофазовый анализ кристаллической решетки кварцита (рис. 2, спектр *б*) позволяет идентифицировать полиморфные превращения: в кварце – образуется фаза α – кристобалита (главные линии на рентгенограмме 7,14; 5,05; 3,61; 2,53; 2,08; 1,75; 1,48), а в хлоритах (рис.2, спектр *а*) – главные линии 7,34; 4,3; 3,66; 2,97; 2,53; 2,15; 2,1; 1,79; 1,53; 1,4; 1,31.

Кроме того, из рентгеноструктурных исследований следует, что величины

трансляционных векторов \vec{a} уменьшились от $5,3 \text{ \AA}$ до 4 \AA , а \vec{b} от $9,8 \text{ \AA}$ до $8,0 \text{ \AA}$, что в свою очередь было связано с уменьшением длины связи, а следовательно, увеличением энергии разрыва кристаллической решетки после облучения ее воздушной плазмой.

В результате проведения физико-химических исследований установлено, что в процессе нагревания горных пород потоками низкотемпературной плазмы, величины энергии активации (как минимальной энергии, которой должны химически реагирующие молекулы для образования активированного комплекса) увеличились, что приводило к смещению химического равновесия [22].

Выводы.

1. По результатам выполненных теоретических исследований механизма термического разрушения горных пород получены основные выражения, описывающие структурные и градиентные напряжения в породе при ее отделении (шелушении). С учетом градиентных и структурных напряжений численно оценено время и момент разрушения поверхностного слоя и толщину отделяющейся породы (шелушки). Рассчитаны линейная скорость хрупкого разрушения для кварцитов при плазменном расширении скважин при различных диаметрах котловых полостей.

2. Полученные экспериментальные данные по изучению процессов, протекающих в горных породах при нагревании, в том числе термических эффектов, изменений массы вещества, скорости протекания реакций, величин теплоты реакций, позволяет более глубоко изучить механизм разрушения горных пород. Установлено, что для плохо термобуримых пород, к которым относятся хлорито-аспидные сланцы и железистые кварциты, при термическом их разрушении необходимо учитывать факт увеличения энергии разрушения в процессах облучения их плазменными потоками.

3. Результаты исследований позволят разработать новые технологические приемы подготовки взрывных скважин для реализации ресурсо- и энергосберегающих способов и технологий отбойки крепких сложно-структурных рудных и нерудных полезных ископаемых Украины.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Большаков В.Н. Пути инновационного развития металлургии Украины / В.Н. Большаков // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2003. – №4. – С. 1-3.
2. Яковенко А.В. Железорудная промышленность Украины: проблема эффективности в рыночных условиях / А.В. Яковенко // Вісник Криворізьського технічного університету. – Кривий Ріг: КТУ, 2005. – № 8. – С. 268 - 272.
3. Булат А.Ф. Повышение эффективности буровзрывных работ в крепких рудах / А.Ф. Булат, В.А. Никифорова, В.Я. Осенний // Вісник КДПУ. Випуск 2/2006 (37), Частина 2. – Кременчук. – 2006. – С. 93-94.
4. Холявченко Л.Т. Технология и установка плазменного расширения скважин для горнорудных предприятий / Л.Т. Холявченко, В.Я. Осенний // Плазмотехнология – 95. – Запорожье, 1995. – С. 221 - 224.
5. Kholiyavchenko L.T. Results of testing the plasma widening hole plants in the Krivbass mines / L.T. Kholiyavchenko., V.Ya. Osenniy // Proc. of the 5th European Conference on Thermal Plasma Processes, St Petersburg, 1988. – P. 174.
6. Киль И.Д. Исследование процесса разрушения горных пород под действием высокотемпературных газовых струй при бурении взрывных скважин на карьерах: Дис...канд. техн. наук: 05.15.11 / Московский горный институт – М., 1967. – 124с.
7. Дмитриев А.П. Исследование физических основ и технических средств термического бурения взрывных скважин: Дис...д-ра. техн. наук: 05.15.11 / Московский горный институт – М., 1969. – 350с.
8. Бергман Э.Д. Термическое разрушение пород плазмобуром / Э.Д. Бергман, Г.Н. Покровский. – Новоси-

бирск: Наука, 1971. – 128с.

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

10. Германович Л.Н. Температурные поля и термоупругие напряжения в горных породах при их термическом разрушении: Дис...канд. техн. наук: 05.15.11 / Московский горный институт – М., 1982. – 190с.

11. Дудолодов Л.С. Некоторые задачи теории теплопроводности и квазистатической термоупругости с их применением к задаче термического бурения горных пород: Дис...канд. физ-мат. наук: 05.15.11 / СО ИГД АН СССР. – Новосибирск, 1969. – 79с.

12. Гончаров С.А. Механизм и параметры термического хрупкого разрушения горных пород / С.А. Гончаров // Изв. ВУЗов Горный журнал. – 1990. – №3. – С.70-75.

13. Ларкина Л.П. Исследование физико-химических процессов в магнетитовых кварцитах Кривбасса методом термографии / Л.П. Ларкина, Б.Д. Алымов, В.Я. Осенний, Л.Н. Пивоварова // Интенсификация процессов разрушения горных пород. – Киев: Наук.думка, 1986. С.34-38.

14. Пилюян Г.О. Введение в теорию термического анализа / Г.О. Пилюян. – М.: Наука, 1964. – 232с.

15. Topor N.D. Determination of the Kinetic of simultaneous reactions / N.D.Topor, L.I. Tolokonnikova, B.M. Kadenatsi // J.of Therm. Anal. – 1981. – 22, №5. – P.221-230.

16. Толоконникова Л.И. Определение кинетических констант разложения твердых тел дериватографическим методом в неизотермическом режиме. Выбор способа математической обработки дериватограмм / Л.И. Толоконникова, Н.Д. Топор, Б.М. Каденаци, В.А. Мошкина //Физическая химия, Деп.№6386-73, 1973. –С.20.

17. Уэндландт У. Термические методы анализа / У Уэндландт . – М.: Мир, 1978. – 528с.

18. Булат А.Ф. О кинетических параметрах физико-химических процессов дезинтеграции железистых кварцитов в условиях термического котлообразования / А.Ф. Булат, В.Я. Осенний // Методи хімічного аналізу: третій Міжнародний симпозіум (27-30 травня 2008). – Севастополь: Інститут біології южних морей НАН України, 2008. – С. 96.

19. Осенний В.Я. Кинетические параметры физико-химических процессов термических превращений в горных породах при плазменном котлообразовании / В.Я. Осенний, Н.В. Осенняя // Геотехнічна механіка: Між. відом. збір. наук. праць /Ін-т Геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України.– Дніпропетровськ, 2012.– №97.– С. 125-134.

20. Горелик С.С. Рентгеноструктурный и электроннооптический анализ. Приложения / С.С. Горелик, Л.Н. Расторгуев, Ю.А. Скаков. – М.: Металлургия, 1970. – 108с.

21. Руководство по рентгеноструктурному исследованию материалов / Под ред. В.А. Франк-Каменецкого. – Л.: Недра, 1975. – 399с.

22. Shumrikov V. Kinetic parameters of thermal processes taking in rocks under the action of plasma /V. Shumrikov, V. Osenniy // Progress in Plasma Processing of Materials. P. Fauchais, J.Amoroux. – NY.: Begell Hausse. 2001. – P. 605 -609.

УДК 625.144.2:625.142.4:004.5

Д-р техн. наук В.В. Рибкін,
кандидати техн. наук О.В. Губар,
В.С. Андреев, М.П. Настечик,
В.В. Циганенко, М.А. Арбузов
(ДВУЗ «ДНУЗТ»)

ОСНОВНІ ВИМОГИ ДО РОЗДІЛЬНИХ СКРІПЛЕНЬ ДЛЯ КРИВИХ ДЛЯНОК КОЛІЇ РАДІУСОМ МЕНШЕ 350 М

В статье освещены основные требования к отдельным скреплениям магистральных колеей общего пользования, и уделено особое внимание промежуточным скреплениям на железобетонных шпалах для кривых участков колеи с радиусом меньше 350 метров.

BASIC REQUIREMENTS TO SEPARATE CLEATING OF THE CURVED AREAS IN THE TRACKS WITH RADIUS LESS THAN 350 M

The article presents basic requirements to the separate cleating of main tracks of general use, and focuses on intermediate cleating in the reinforce-concrete railway ties for the curved areas in tracks with radius less than 350 meters.

Досвід експлуатації залізниць показав, що для всіх видів дерев'яних і залізобетонних підрейкових основ найбільші складнощі викликають питання