

ЗАЛЕЖНІСТЬ ВНУТРІШНЬОПОРОВОГО ТИСКУ  
ВІД ПРУЖНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПРИРОДНОГО КАМЕНЮ

*Отримано аналітичні залежності, що дозволяють оцінювати тиск кристалів льоду, які ростуть в сферичних пустотах реальних (що деформуються) капілярно-пористих тілах.*

**Вступ. Постановка проблеми.** Існують дані, які показують складний характер зміни міцнісних характеристик скельних порід при заморожуванні. Знання характеру зміни міцнісних властивостей гірських порід має практичне значення для розробки технічних засобів і способів руйнування гірських порід при видобуванні та переробці корисної копалини. Саме тому є актуальним питання встановлення значення тиску кристалізації води на стінки пор природного каменю.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У роботі [1] експериментально встановлено, що при охолодженні скельних порід від кімнатної температур і до 223–183 К спостерігається зниження межі міцності на розтягування на 30–50 %. При подальшому пониженні температури міцність на розтягування росте і при температурі 123 К стає рівній межі міцності при кімнатній температурі. Межа міцності скельних порід на стиснення при пониженні температури до 223–193 К практично залишається постійною або трохи знижується. При подальшому пониженні температури вона збільшується і при 123 К стає на 50–70 % вище, ніж при кімнатній температурі.

Такий характер зміни міцності скельних порід при охолодженні [2] пояснюють двома факторами: розвитком мікророзривів структурними термічними напруженнями на межах мінеральних зерен; зміцненням мінералів при їх охолодженні. В інтервалі температур, де спостерігається спад міцності порід, переважаючу роль виконує перший фактор, при температурі нижче за цей діапазон – другий фактор.

У роботі [3] описано дослідження твердості і питомої роботи руйнування гірських порід при температурах 293–93 К. Результати досліджень показали, що пониження температури від кімнатної до 213–193 К призвело до зменшення твердості в 1,2 і роботи руйнування в 2,1 раза. При подальшому зменшенні температури твердість зростає і при 93 К перевершує твердість при кімнатній температурі. Робота руйнування є мінімальною при температурах 219–193 К і при подальшому зниженні температури вона зростає, але при температурі 93 К залишається нижче, ніж при кімнатній температурі в 1,25 раза.

**Мета дослідження.** Встановити залежність внутрішньопорового тиску від пружних властивостей природного каменю.

**Викладення основного матеріалу.** Відомо, що тиск, який виникає при зростанні і тепловому розширенні кристалів у порах ідеальних тіл (що не деформуються), може досягати значень, які можна співставити з граничною міцністю багатьох будівельних матеріалів. Проте насправді ми маємо справу з реальними тілами. Тому під дією цього тиску відбуватиметься деформація як кристалів, так і матеріалу перешкоди, що розмежує пори. Внаслідок цього виникне робота з деформації кристала  $A_1$  і матриці  $A_2$ . Причому повна робота  $A_n$ , що здійснюється тільки для деформації кристала, складатиметься з робіт  $A_1$  і  $A_2$  як складових:

$$\dot{A}_r = \dot{A}_1 + \dot{A}_2 \quad (1)$$

У ізобаричному процесі механічна робота  $A$ , пов'язана зі зміною об'єму  $\Delta V$  визначається рівністю:

$$A = -P\Delta V \quad (2)$$

Із (1) та (2) маємо:

$$P\Delta V = P_1\Delta V_r + P_2\Delta V_e, \quad (3)$$

де  $\Delta V_r$ ,  $\Delta V_k$  – відповідно зміна об'ємів перешкоди (сферичної пори) і кулястого кристала внаслідок їх деформації під дією рівномірних тисків  $P_1$  і  $P_2$ .

Очевидно, що на межі розділення тиску  $P_1$  і  $P_2$  рівні як контактні тиски:

$$P_e = P_1 = P_2 \quad (4)$$

Підставивши (4) в (3), отримаємо:

$$P\Delta V_e = P_e(\Delta V_r + \Delta V_e). \quad (5)$$

Відповідну зміну об'ємів під дією тисків  $P$  і  $P_e$  можна представити в такому вигляді:

$$\Delta V_e = 3V_1\varepsilon_e, \quad (6)$$

$$(7)$$

$$\Delta V_i = \frac{3V_1}{a_0} \Delta a_i,$$

де  $\varepsilon_e$  – відносна деформація кристала під дією тиску  $P_e$ ;  $\Delta a_i$  – видовження радіуса ( $a_0$ ) сферичної пори матриці під дією рівномірного тиску  $P_e$ .

На основі відомого рішення Ляме раціональне переміщення ( $\Delta a_i$ ) точки на внутрішній поверхні сферичної пори ( $r = a_0$ ) виражається рівнянням [1]:

$$\Delta a = P_e \frac{\tilde{N}}{\tilde{A}_i} \dot{a}_0, \quad (8)$$

де  $\tilde{N} = \frac{1+2\mu}{2} \left( \frac{2(1-\mu_i)}{1+\mu_i} + \frac{b^3}{a_0^3} \right) \left( \frac{b^3}{a_0^3} - 1 \right)^{-1}$ ;  $E_i$  і  $\mu_i$  – модуль пружності й коефіцієнт Пуасона матеріалу перепони (матриці);  $b$  – зовнішній радіус сферичної оболонки.

З рівнянь (5–7) з врахуванням  $\beta = \frac{3(1-\mu)}{A}$  і  $\varepsilon = \beta \frac{D}{3}$  [1] знаходимо:

$$P_e = \left( \frac{\tilde{A}\tilde{A}_i}{\tilde{A}\tilde{A}_i + \tilde{N}\tilde{A}_e} \right)^{1/2D}, \quad (9)$$

де  $\tilde{A} = 1 - 2\mu_e$ ;  $\tilde{A}_e$  і  $\mu_e$  – відповідно модуль Юнга і коефіцієнт Пуасона кристала (включення).

Позначимо корінь виразу (9) через  $d$  і будемо називати його коефіцієнтом жорсткості сумісно деформованої системи «кристал–перепона»:

$$d = \left( \frac{\tilde{A}\tilde{A}_i}{\tilde{A}\tilde{A}_i + \tilde{N}\tilde{A}_e} \right)^{1/2}. \quad (10)$$

Із (10) випливає, що при  $0 \leq \tilde{A}_i \leq \infty$ ,  $0 \leq d \leq 1$ , тобто коефіцієнт жорсткості може мати залежно від пружних постійних капілярно-пористих тіл численні значення від 0 до 1 (табл. 1).

Таблиця 1

Розрахункові значення коефіцієнта жорсткості  
для систем «включення–матриця» при  $\mu_i = 0,2$ ;  $\tilde{A}_{eii\dot{a}o} = 10^4$ , МПа

$E \cdot 10^4$ , МПа	0	1	2	3	4	5	8	10
$d$ , лід	0	0,63	0,76	0,82	0,85	0,88	0,92	0,94

Таким чином тиск, що виникає при зростанні і тепловому розширенні кристалів в сферичних порожнинах реальних (що деформуються) капілярно-пористих тіл, визначається з урахуванням пружних характеристик кристала і перешкоди такими виразами:

$$P_e^n = \left( \frac{\dot{\varepsilon} \dot{O}}{\nu} \text{Ln} C / \tilde{N}_\infty + 2\sigma / \dot{a}_0 \right) d; \quad (11)$$

$$E_e^j = \left( \frac{Q \Delta \dot{O}}{V_i \dot{O}_0} + \frac{2\sigma}{\dot{a}_0} \right) d; \quad (12)$$

$$P_e^o = \Delta \gamma \frac{\Delta T}{\beta_e} d, \quad (13)$$

де  $\sigma$  – питома вільна поверхнева енергія кристалів;  $C / \tilde{N}_\infty$  – кристалізаційний тиск від перенасичення розчином;  $\dot{\varepsilon} T$  – абсолютна температура кристала;  $\gamma$ ,  $\beta$  – коефіцієнти термічного розширення відповідно до матриці та кристала льоду;  $\nu$  – об'єм молекули;  $Q$  – теплота фазового переходу.

**Висновок.** Аналітичні залежності (11) і (12) дозволяють оцінювати тиск кристалів, що ростуть у сферичних порожнинах реальних (що деформуються) капілярно-пористих тіл, які перенасичені водою та переохолоджені. З них виходить, що тиск кристалізації знаходиться в значній залежності як від параметрів, що визначають процес кристалізації, так і від величин, що характеризують фізико-хімічні властивості кристала і перешкоди.

За формулою (13) визначається тиск, що виникає при тепловому розширенні кристалів льоду в порах реальних матеріалів. Як видно, тут тиск також знаходиться залежно від фізико-механічних параметрів кристала і перешкоди.

За інших однакових умов ( $P_c = \text{const}$ ,  $P_o = \text{const}$ ) для значень тиску, що виникає при рості і тепловому розширенні кристалів, сильний вплив мають пружні властивості кристалів і матриці, тобто коефіцієнт жорсткості  $d$  системи «кристал–перешкода». Так, при  $0 \leq d \leq 1$  ( $0 \leq \dot{A}_r \leq \infty$ ) тиски змінюються від 0 до максимуму.

Таким чином тиски, які виникають при зростанні і тепловому розширенні кристалів льоду в порах природного каменю та інших капілярно-пористих тілах, можуть досягати залежно від фізико-механічних величин, що характеризують розчин (розплав), кристал і перешкоду, критичних значень, що здатні руйнувати багато будівельних матеріалів у процесі їх корозії.

#### Список використаної літератури:

1. *Голдаев Н.П.* Результаты экспериментального исследования полей удельных тепловых потоков при воздействии сверхзвуковых струй на преграды / *Н.П. Голдаев, Г.С. Жердев, Н.Н. Попов* // Комплексные исследования физических свойств горных пород : тез. докл. Всесоюзной научн. конф. вузов СССР (Москва, 2–4 февраля 1977 г.) – М. : Изд-во МГИ, 1977. – С. 32–33.
2. Разрушение горных пород при термохимическом воздействии / *А.Н. Москалев, Е.Ю. Пигида, Л.Г. Кереклици, Ю.Н. Вахалин*. – К. : Наукова думка, 1987. – 248 с.
3. *Дмитриев А.П.* Термодинамические процессы в горных породах : учебник для вузов / *А.П. Дмитриев, С.А. Гончаров*. – М. : Недра, 1983. – 312 с.
4. *Безухов Н.И.* Основы теории упругости, пластичности и ползучести / *Н.И. Безухов*. – М. : Высшая школа, 1968. – 512 с.
5. Физические свойства горных пород и полезных ископаемых (петрофизика) : Справочник геофизика. – М. : Недра, 1976. – 527 с.
6. *Стеклов О.И.* Стойкость материалов и конструкций к коррозии под напряжением / *О.И. Стеклов*. – М. : Машиностроение, 1990. – 384 с.
7. *Ставрогин А.Н.* Механика деформирования и разрушения горных пород / *А.Н. Ставрогин, А.Г. Протосеня*. – М. : Недра, 1992. – 224 с.

КОРОБІЙЧУК Валентин Вацлавович – кандидат технічних наук, доцент кафедри геотехнологій ім. проф. М.Т. Бакка Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

- гірництво;
- комп'ютерні технології.

Стаття надійшла до редакції 04.01.2012

**Коробійчук В.В.** Залежність внутрішньопорового тиску від пружних властивостей природного каменю  
**Коробийчук В.В.** Зависимость внутривпорового давления от упругих свойств природного камня  
**Korobiychuk V.V.** Dependence into pores pressure from resilient properties of natural stone

УДК 622.2:631.4

**Зависимость внутривпорового давления от упругих свойств природного камня / В.В. Коробийчук**

Получены аналитические зависимости, что позволяют оценивать давление кристаллов льда, которые растут в сферических пустотах реальных (деформирующихся) капиллярно-пористых телах

УДК 622.2:631.4

**Dependence into pores pressure from resilient properties of natural stone / V.V. Korobiychuk**

Analytical dependences are got, that allow to estimate pressure of crystals of ice, which grow in spherical emptinesses the real (becoming deformed) capillary porous bodies.