

## ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАЛЕЖНОСТІ ПРОЦЕСУ АЛМАЗНО-КАНАТНОГО РІЗАННЯ ПРИРОДНОГО ОБЛИЦЮВАЛЬНОГО КАМЕНЮ

(Представлено д.геол.н. Підвисоцьким В.Г.)

*Адаптовано теорію розпилювання природного каменю дисковим інструментом для опису процесу різання каменю з використанням алмазного каната. Встановлено аналітичні залежності між енергосиловими параметрами алмазно-канатної установки, конструктивними параметрами робочого інструмента та кількісними й якісними показниками процесу алмазно-канатного різання.*

**Вступ.** Геологічна будова Українського кристалічного щита обумовила наявність значних запасів природного облицювального каменю на території Житомирської області. Родовища твердих порід Коростенського плутону вирізняються значними розмірами як в плані, так і за потужністю. Разом з тим потужність шару розкривних порід незначна і в окремих випадках взагалі дорівнює нулю. Це створює передумови для розвитку видобувної галузі регіону, що й підтверджується кількістю та різноманіттям родовищ природного облицювального каменю. Однією з поширених технологій відокремлення монолітів від масиву на кар'єрах Житомирщини є технологія, пов'язана з використанням алмазного каната як робочого різального органу.

Незважаючи на широкий інтерес науковців даною технологією, на сьогоднішній день не існує цілісної теорії руйнування природного каменю алмазним канатом, а дослідження вчених часто обмежуються вивченням лише вузько окреслених питань. Зважаючи на поширеність технології алмазно-канатного розпилювання існує потреба у цілісному теоретичному вивченні процесів, пов'язаних з роботою гнучкого робочого органу.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Вивченням процесів пов'язаних з роботою алмазно-канатних установок та розробкою теорії енергетичного руйнування гірських порід за допомогою алмазних канатів займається російський вчений Г.Д. Першин [1, 2]. Але базою для його досліджень використовується Кібік-Кордонське родовище мармуру. Процес відокремлення моноліту мармуру та твердих порід каменю схожі на перший погляд, проте мають ряд суттєвих відмінностей. Тому запропонована теорія не підходить для опису та вивчення процесів різання алмазним канатом в умовах родовищ високоміцних кристалічних порід Житомирщини. Складнощі у вивченні роботи алмазного каната пов'язані із високою вартістю даного інструмента, яка в середньому становить 80–90 доларів США за погонний метр каната. Тому одним із методів досліджень роботи алмазного каната є створення цифрової комп'ютерної моделі процесу розпилювання природного каменю за допомогою алмазної канатної установки.

**Мета роботи.** Дана робота спрямована на створення математичної моделі процесу розпилювання [3] шляхом введення у розрахункові залежності силових параметрів роботи алмазної канатної установки.

**Викладення основного матеріалу та результати досліджень.** Робочий орган алмазно-канатної установки є система з нескінченного (замкнутого) несучого сталевго каната з нанизаними на нього різальними елементами у вигляді втулок, на зовнішній поверхні яких за допомогою методів порошкової металургії закріплені алмазні зерна.

Технологія виготовлення сучасних алмазних різальних інструментів для видобування та обробки твердих порід природного каменю не передбачає спеціально орієнтованого розташування алмазних зерен у масиві алмазоносного шару. Тому при подальших дослідженнях будемо вважати, що координати розташування зерен алмазів у масиві зв'язки – величини випадкові.

Товщина стружки (шару породи), що знімається алмазним зерном, залежить від його вильоту над поверхнею металевго зв'язки. Детальне вивчення будови алмазоносного шару показало, що розподіл зерен за вильотом над зв'язкою відповідає нормальному закону, що

описується інтегральною функцією Гауса [4]. Тоді кількість робочих зерен у лінії різання об'ємом  $\Delta V_p$  визначатиметься, згідно з формулою:

$$N_p = \frac{4,39n_1K}{2 \cdot 10^5} \cdot \Delta V_p \cdot \frac{1 - \Phi(t_1)}{2} \quad (1)$$

де  $n_1$  – кількість зерен у одному караті алмазів, визначається за таблицею;  $K$  – умовна концентрація алмазів у алмазоносному шарі, %; 4,39 – маса алмазів у  $1 \text{ см}^3$  алмазоносного шару при  $K = 100$  %;  $\Phi(t_1)$  – інтегральна функція Гауса від спеціального параметра  $t_1$ , що визначається згідно з теорією ймовірності:

$$t_1 = \frac{b_1 - \bar{b}}{\sigma}$$

де  $b_1$  – поточне значення перевищення алмазних зерен над рівнем зв'язки;  $\bar{b}$  – середньозважене значення перевищення зерен;  $\sigma$  – середньоквадратичне відхилення ряду.

У реальних умовах на робочій поверхні інструмента різною мірою виступають численні зерна алмазів, які беруть участь у процесі руйнування породи. Тому, розглядаючи реальну роботу конкретного алмазного зерна, слід враховувати, що поверхня вибою має порушений (тріщинуватий) шар, утворений попередньою роботою зерен інструмента. Експериментальні дослідження [4] показують, що розміри подряпини більші у 1,1–1,9 разів за розміри зони контакту. Це підтверджує теорію про ядро руйнування при різанні порід виколуванням. Наявність попередньо порушеного (тріщинуватого) шару гірської породи суттєво впливає на силові та енергетичні параметри і дозволяє зменшити зусилля різання та подачі на 20–30 %. Таким чином, вважатимемо шар породи товщиною  $a'$  повністю знятим на деякій ділянці, якщо на цій ділянці було знято 80 % породи. Тобто необхідно, щоб 80 % твірних містили алмазні зерна.

Ймовірність такого випадку обраховується як:

$$Q = \left( \frac{2N_p^L \cdot d \cdot k}{\pi \cdot d_g} \right)^{0,8L_p} \quad (2)$$

В кінцевому результаті з формули (2) можна знайти необхідну довжину поверхні втулки (втулок) для зняття одного шару породи з ймовірністю 95 %. Враховуючи час, за який канат проходить відстань довжиною  $l_g$ , виразимо товщину шару породи через швидкість заглиблення каната у породу:

$$a' = \frac{v_n}{v_\tau} l_g = \frac{v_n}{v_\tau} \cdot \frac{0,88 \cdot \frac{1}{(\pi \cdot d_g)}}{0,832 \cdot 10^{-5} \cdot n_1 K \cdot d^2 \cdot (1 - \Phi(t_1))} \quad (3)$$

де  $v_n$  – швидкість заглиблення каната або нормальна швидкість;  $v_\tau$  – поздовжня швидкість каната.

Ефективність роботи та експлуатаційна міцність конструктивних елементів алмазно-абразивних інструментів значною мірою залежать від силових показників процесу руйнування. Значна різноманітність фізико-механічних властивостей природного каменю потребує універсальності розрахункових залежностей для визначення силових показників різання, що дозволило б використовувати їх для розрахунку показників ефективності роботи інструмента та для проектування основних вузлів установок та робочих органів різального інструмента.

Процес заглиблення зерна буде характеризуватися опором породи руйнуванню, яка може бути оцінена її твердістю.

Тоді нормальна складова сили різання буде залежати від показника твердості породи  $H$  та контактної площі зерна  $S_3$ :

$$f_N = H \cdot S_3 \quad (4)$$

Для розрахунку нормальної складової слід зазначити кілька умов:

- 1) форму зерен алмазних порошоків, з деякою похибкою, приймаємо сферичною;
- 2) кожне робоче алмазне зерно, внаслідок абразивного зношування, має площинку затуплення розміром  $\Delta$  (рис. 1).

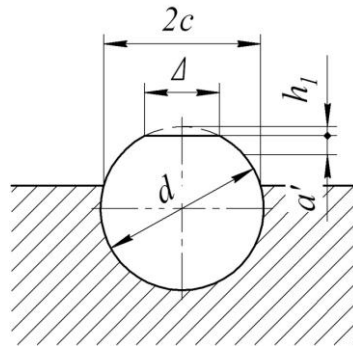


Рис. 1. Схема визначення площі поверхні контакту алмазного зерна з породою

Експериментальні дослідження, які проводилися у Київському інституті надтвердих матеріалів АН УРСР [4], показують, що незважаючи на виняткову твердість алмазів, у процесі різання гострі краї алмазних кристалів затуплюються і руйнування породи відбувається зернами алмазів із площинками затуплення. Розміри площинок затуплення коливаються в межах 150–280 мкм і мають криволінійну форму. Це дає підстави розглядати кожне окреме алмазне зерно втулки як твердий різець (індентор) з округлою поверхнею.

У процесі різання з породою контактує лише половина бічної поверхні, тому величину  $S_3$  можна визначити згідно з формулою:

$$S_3 = \frac{\pi}{2} \left( d \cdot a' + \frac{\Delta^2}{2} \right) \quad (5)$$

Підставивши рівняння (5) у (4), останнє набуде вигляду:

$$f_N = H \cdot K_{noc} \cdot \frac{\pi}{2} \left( d \cdot a' + \frac{\Delta^2}{2} \right) \quad (6)$$

де  $K_{noc}$  – коефіцієнт, що враховує перекриття зрізів та послаблення опору породи заглибленню алмазного зерна внаслідок порушення структури контактної поверхні вибою.

Робота алмазного зерна при руйнуванні гірських порід має схожу природу із процесом ковзання твердого тіла по шорсткій поверхні. Тому нормальна та дотична сили пов'язані між собою деяким коефіцієнтом різання  $m$ , який залежить виключно від характеристик породи.

$$\frac{f_N}{f_T} = m = \text{const} \quad (7)$$

Використовуючи теорію руйнування гірських порід, розроблену російським вченим Ю.І. Протасовим, можна виразити силу різання через характеристики міцності породи та технологічні параметри інструмента:

$$f_T = \frac{\sigma_{cm} \cdot K_{nl} \cdot K_{noc}}{2\mu} \cdot \frac{\pi}{2} \left( d \cdot a' + \frac{\Delta^2}{2} \right) \quad (8)$$

Тоді, враховуючи (7), коефіцієнт різання визначиться як:

$$m = \frac{f_N}{f_T} = \frac{H \cdot 2\mu}{\sigma_{cm} \cdot K_{nl}} \quad (9)$$

Так як робочий орган алмазної канатної установки є гнучке тіло нескінченної довжини, що рухається з постійною швидкістю, то для математичного опису алмазного каната скористаємося диференціальними рівняннями рівноваги гнучкого троса (нитки) на шорсткій поверхні.

$$\tau: (T^* + dT) \cos \frac{d\psi}{2} - T \cos \frac{d\psi}{2} - F \cdot ds \cos \gamma = 0 \quad (10)$$

$$n: (T^* + dT) \sin \frac{d\psi}{2} - T \sin \frac{d\psi}{2} - N \cdot ds \cos \theta - F \cdot ds \sin \gamma \sin \theta = 0 \quad (11)$$

$$b:x - N \cdot ds \sin \theta + F \cdot ds \sin \gamma \cdot \cos \theta = 0 \quad (12)$$

де  $T^*$  – сила натягу в гілці каната, що набігає, і яка була уявно відкинута.

Ці рівняння можна вважати рівняннями рівноваги елементарної ділянки троса на криволінійній поверхні.

При розпилюванні природного облицювального каменю, поверхня вибою формується шляхом руйнування поверхні каменю алмазним канатом. Таким чином, кривизна алмазного каната та кривизна повздожнього контуру поверхні вибою співпадають, а величина кута геодезичного схилення  $\theta = 0$ .

При наданні канату крутної деформації в пропили виникає явище авторотації каната. За рахунок тертя, крутний момент викликає неврівноважене зусилля, що спрямоване по бінормалі каната. Таким чином, система рівнянь рівноваги каната (10), (11), (12) набуде вигляду:

$$\frac{dT}{ds} = Nm \cos \gamma \quad (13)$$

$$\frac{T}{\rho} = N \quad (14)$$

$$m \sin \gamma = \frac{P}{N} \quad (15)$$

Дане рівняння дає розв'язок відносно  $T$  в натуральних координатах:

$$T_1 = \frac{e^{\frac{m}{\rho} l_e}}{2} + \frac{\rho^2 P^2}{2m^2 \cdot e^{\frac{m}{\rho} l_e}} \quad (16)$$

де  $T_1$  – натяг каната у ведучій гілці.

Сила натягу каната у ведучій гілці після  $k$ -ої алмазної втулки:

$$T_k = T_{cm} + \frac{\sum \left( e^{\frac{m}{\rho_i} l_e} \right)}{2} + \frac{\sum \left( \frac{\rho_i^2 P_i^2}{e^{\frac{m}{\rho_i} l_e}} \right)}{2m^2} \quad (17)$$

де  $T_{cm}$  – статичний натяг каната, що створюється алмазно-канатною установкою.

Згідно з аксіомою про рівність дії та протидії і врахувавши отримані залежності (17) у (14), сила реакції поверхні пропили на втулку, а відтак і сила притиску втулки:

$$N_k = F_n = \frac{T_k}{\rho_k} = \frac{T_{k-1}}{\rho_k} + \frac{e^{\frac{m}{\rho_k} l_e}}{2\rho_k} + \frac{\rho_k P_k^2}{2m^2 e^{\frac{m}{\rho_k} l_e}} \quad (18)$$

Отримані залежності (17) та (18) визначають силові параметри для будь-якої втулки, залежно від силових параметрів процесу розпилювання, властивостей породи та геометричних параметрів контуру пропили. На практиці нема потреби визначати силові параметри для конкретної точки каната, однак ці залежності відображають математичну модель процесу розпилювання. Дані вирази наведені у рекурентній формі, що ускладнює математичний обрахунок, тому для спрощення моделювання слід використовувати потужності ЕОМ, створивши комп'ютерну цифрову модель процесу розпилювання природного каменю з використанням алмазних канатних установок.

**Висновки.** Розглянувши теорію руйнування гірських порід та теорію обробки каменю дисковим інструментом, було розроблено теоретичні основи алмазного канатного розпилювання природного каменю. Отримані залежності поєднують та враховують в собі конструктивні параметри алмазного абразивного інструмента, фізико-механічні властивості породи, кінематичні та силові параметри роботи алмазної канатної установки. Окремо розглянуто процес руйнування породи на рівні одиничного алмазного зерна в умовах роботи алмазного каната, що суттєво відрізняється від аналогічного процесу при обробці каменю дисковим периферійним або торцевим інструментом.

Аналіз силових характеристик роботи каната в цілому базується на основах механіки гнучких ниток. Проте при розгляданні диференціальних залежностей було прийнято до уваги специфічність роботи та будови алмазного каната, як: дискретність робочої поверхні, явище авторотації та бічного зсуву, формування поверхні контакту самим алмазним канатом, нестационарність траєкторії руху каната.

Отримані рівняння містять спільні параметри, що дозволяє об'єднати їх у одну спільну механіко-математичну модель процесу алмазного канатного розпилювання каменю.

#### Список використаної літератури:

1. *Першин Г.Д.* Канатные пилы. Обоснование конструктивных параметров и режимов работы : монография / Г.Д. Першин, М.Ю. Гуров, Г.И. Чеботарев // Магнитогорск : ГОУ ВПО МГТУ им. Г.И. Носова, 2006. – 126 с.
2. *Першин Г.Д.* Добыча блоков мрамора алмазно-канатными пилами : учеб. пособие / Г.Д. Першин, Г.А. Караулов, Н.Г. Караулов. – Магнитогорск : МГТУ, 2003. – 103 с.

3. *Башинський С.І.* Геометричне моделювання контуру алмазного каната / *С.І. Башинський, С.В. Кальчук* // Тези XXXV наук.-практ. міжвуз. конф., присвяченої Дню університету, 25–28 травня 2010 року : В 2-х т. – Житомир : ЖДТУ, 2010. – Т. 1. – С. 148–149.
4. *Александров В.А.* Обработка природного камня алмазным дисковым инструментом / *В.А. Александров*. – К. : Наук. думка, 1979. – 240 с.

БАШИНСЬКИЙ Сергій Іванович – асистент кафедри геотехнологій ім. проф. М.Т. Бакка Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

- гірництво;
- сучасні методи видобутку та обробки каменю;
- алмазні технології.

Стаття надійшла до редакції 27.04.2012

**Башинський С.І.** Теоретичні дослідження залежності процесу алмазно-канатного різання природного облицювального каменю

**Башинський С.И.** Теоретические зависимости процесса алмазно-канатного резания природного облицовочного камня

**Bashinsky S.<sup>2</sup>.** Theoretical relations of the natural facing stone cutting with diamond wire

УДК 622.23.054.7

**Теоретические зависимости процесса алмазно-канатного резания природного облицовочного камня / С.И. Башинський**

Адаптировано основы теории распиливания природного камня дисковым инструментом для описания процесса резания камня с использованием алмазного каната. Установлены аналитические зависимости между энергосиловыми параметрами алмазно-канатной установки, конструктивными параметрами рабочего инструмента и количественными и качественными показателями алмазно-канатного резания.

УДК 622.23.054.7

**Theoretical relations of the natural facing stone cutting with diamond wire / S.<sup>2</sup>. Bashinsky**

The disk blade cutting natural stone theory has been adopted for the description natural stone cutting with the diamond wire. The analytical relations have been determined between the energy-power parameters of the diamond wire saw, the working tool design factors and quantitative and qualitative values of the diamond wire cutting.