

# Розробка корисних копалин

УДК 622.23.054.7

С.І. Башинський, ст. викл.

Житомирський державний технологічний університет

## ДИФЕРЕНЦІАЛЬНІ ЗАЛЕЖНОСТІ СИЛОВИХ ПАРАМЕТРІВ РОБОТИ АЛМАЗНОГО КАНАТА ПРИ ВИДОБУВАННІ БЛОКІВ ТВЕРДИХ ПОРІД ОБЛИЦЮВАЛЬНОГО КАМЕНЮ

(Представлено д.геол.н., проф. В.Т. Підвисоцьким)

*Розглянуто рівновагу гнучкої нитки на криволінійній поверхні. Складено систему рівнянь, що описують рівноважний стан та внесено поправки згідно з особливостями роботи алмазного каната. В результаті отримано залежності, що дозволяють уточнити цифрову модель процесу відокремлення монолітів від масиву та оцінити ефективність роботи силових агрегатів алмазно-канатної установки.*

**Постановка проблеми.** 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 із тим, потужність розкривних порід незначна і в окремих випадках взагалі дорівнює нулю. Це створює передумови для розвитку видобувної галузі регіону, що й підтверджується кількістю та різноманітням 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 за допомогою алмазного каната, 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 Першин Г.Д. 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 Житомирщини [1, 2]. Складності у вивченні роботи алмазного каната пов'язані з високою вартістю даного інструмента, яка в середньому становить 80–90 доларів США за погонний метр каната. Тому одним із методів досліджень роботи алмазного канату є створення цифрової комп'ютерної моделі процесу розпилювання природного каменю за допомогою алмазної канатної установки.

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

**Викладення основного матеріалу.** Оскільки робочий орган алмазної канатної установки є гнучким тілом нескінченної довжини, що рухається з постійною швидкістю, то існує потреба розглянути диференціальні рівняння рівноваги гнучкого троса (нитки) на шорсткій поверхні.

При розпилюванні міцних порід облицювального каменю інструментом із твердим робочим органом геометричні параметри вибою однозначно визначається формою робочого органу та траєкторією його руху. Тому в цих випадках проводиться лише кількісне вивчення параметрів розпилювання. При роботі гнучкого органу форма вибою залишається невизначеною, а на геометрію вибою впливають кінетостатичні параметри процесу розпилювання. Вивчення даного процесу потребує як кількісної, так і якісної оцінки параметрів.

Сили взаємодії гнучкого різального органу з породою в процесі її розпилювання можуть бути визначені із задачі про рівновагу гнучкої невагомої нитки на шорсткій поверхні.

Якщо на будь-яке тіло вагою  $\vec{G}$ , що знаходиться у рівновазі на шорсткій площині, діяти рушійною силою  $\vec{P}$  як показано на рисунку 1, то реакція поверхні  $\vec{R}$  буде відхилятися від вертикалі на деякий кут  $\varphi$ , величину якого можна виразити:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{F_{\text{од}}}{N} = f. \quad (1)$$

Кут  $\varphi$  називається кутом тертя та його значення у багатьох випадках є суттєвим.

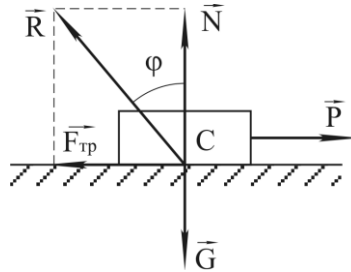


Рис. 1. Реакція шорсткої поверхні та кут тертя

Розглянемо елементарну ділянку троса на криволінійній поверхні, що показана на рисунку 2 [4].

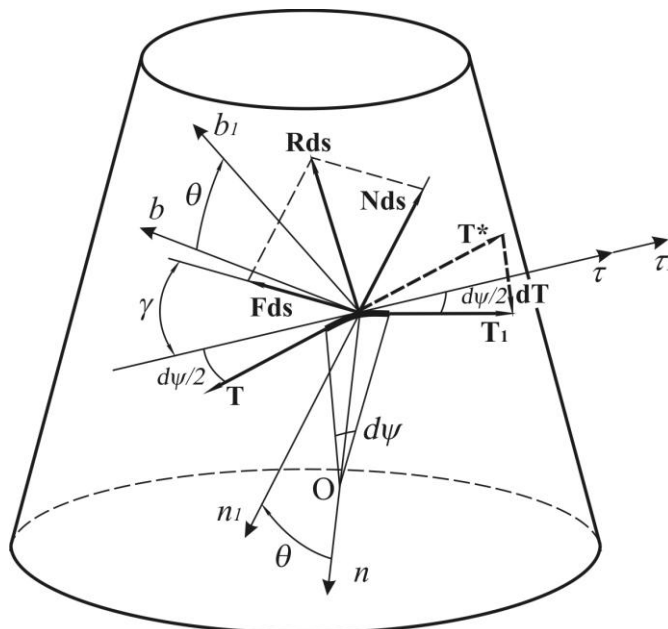


Рис. 2. Схема зусиль, що діють на елементарну ділянку троса

Довжину дуги ділянки приймемо рівною  $ds$ , яка відповідає куту повороту  $d\psi$ . На елемент троса діють: сила натягу  $\vec{T}$ , що прикладена до одного кінця ділянки; сила натягу  $\vec{T}_1$ , що прикладена до другого кінця, та реакція поверхні  $\vec{R}ds$ , пропорційна його довжині.

Проведемо осі натурального трьохгранника, орієнтуючи його за елементом троса. Дотична до елементарної ділянки вісь  $\tau$  збігається з дотичною до криволінійної поверхні віссю  $\tau_1$ , нормаль  $n$  пройде через центр кривизни елемента  $O$ , а бінормаль  $b$  буде перпендикулярна першим двом осям. Центр другого натурального тригранника сумістимо з центром першого, нормаль  $n_1$  до поверхні буде відхилятися від нормалі  $n$  на величину кута  $\theta$ . Бінормаль  $b_1$  і дотична  $\tau_1$ , знаходяться у одній площині, дотичній до криволінійної поверхні, та повернута відносно осі  $b$  також на кут  $\theta$ , який називається кутом геодезичного схилення.

Із врахуванням вибраних осей координат, повну реакцію поверхні можна представити із двох складових:

$$\vec{R}ds = \vec{N}ds + \vec{F}ds, \quad (2)$$

де  $\vec{N}ds$  – нормальна реакція поверхні, направлена в бік від'ємного напрямлення осі  $n_1$ ;  $\vec{F}ds$  – сила тертя елемента троса, що діє в площині, дотичній до поверхні.

Оскільки елемент троса знаходиться у рівновазі, то згідно з теоремою про три сили, можна записати

$$\vec{T} + \vec{T}_1 + \vec{R}ds = 0. \quad (3)$$

Силу натягу  $\vec{T}_1$  представимо у вигляді:

$$\vec{T}_1 = \vec{T}^* + d\vec{T}, \quad (4)$$

де  $\vec{T}^*$  – сила натягу, з якою досліджуваний елемент діє на ліву частину троса, що була уявно відкинута.

Згідно з аксіомою про дію та протидію, сили  $\vec{T}$  та  $\vec{T}^*$  чисельно рівні та протилежно спрямовані. Тоді, врахувавши (4) та (2), запишемо вираз (3) у вигляді:

$$(\vec{T}^* + d\vec{T}) + \vec{T} + \vec{N}ds + \vec{F}ds = 0.$$

Спроєктувавши дане рівняння на осі натурального тригранника, отримаємо:

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

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

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

Вважаючи, що  $\sin \frac{d\psi}{2} \approx \frac{d\psi}{2}$ ,  $\cos \frac{d\psi}{2} \cong 1$ ,  $dT \cdot \frac{d\psi}{2} \approx 0$ ,  $d\psi = \frac{ds}{\rho}$  та враховуючи залежність кута тертя

згідно з (1), отримаємо:

$$\frac{dT}{ds} = F \cos \gamma; \quad (5)$$

$$\frac{T}{\rho} = N \cos \theta + F \sin \gamma \cdot \sin \theta; \quad (6)$$

$$\operatorname{tg} \theta = f \sin \gamma. \quad (7)$$

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

Перетворимо вираз (6) із врахуванням (7):

$$\frac{T}{\rho} = N \cos \theta + F \sin \gamma \cdot \sin \theta = N(\cos \theta + f \sin \gamma \cdot \sin \theta) = N(\cos \theta + \operatorname{tg} \theta \cdot \sin \theta) = \frac{N}{\cos \theta}$$

або

$$N = \frac{T}{\rho} \cos \theta. \quad (8)$$

Крім того, спираючись на вираз (7) запишемо, що:

$$\cos \gamma = \sqrt{1 - \sin^2 \gamma} = \sqrt{1 - \frac{\operatorname{tg}^2 \theta}{f^2}}. \quad (9)$$

Підставляючи (1), (8) та (9) у (5) та враховуючи, що  $ds = \rho \cdot d\psi$ , отримаємо:

$$\frac{dT}{\rho \cdot d\psi} = N \cdot f \cdot \cos \gamma = \frac{T}{\rho} f \cdot \cos \theta \cdot \sqrt{1 - \frac{\operatorname{tg}^2 \theta}{f^2}}. \quad (10)$$

Скоротивши на  $\rho$  і  $f$ , матимемо:

$$\frac{dT}{T} = \cos \theta \sqrt{f^2 - \operatorname{tg}^2 \theta} \cdot d\psi. \quad (11)$$

Таким чином, отримали диференціальне рівняння, яке встановлює залежність натягу троса  $T$  від кута обхвату поверхні  $\psi$ , коефіцієнта тертя  $f$  та кута геодезичного схилення  $\theta$ , що визначають умову рівноваги.

Взявши визначений інтеграл від обох частин рівняння (11), отримаємо умову відсутності повздовжнього ковзання троса по поверхні:

$$\frac{T_1}{T} \leq e^{\int_0^{\psi} \cos \theta \sqrt{f^2 - \operatorname{tg}^2 \theta} \cdot d\psi} \quad (12)$$

Тобто елемент троса на випуклій поверхні не матиме повздовжнього ковзання до тих пір, поки натяг однієї гілки  $T_1$  не перевищить максимально можливого значення, яке визначається натягом іншої гілки та рядом параметрів згідно з виразом. У випадку рівномірного руху троса по шорсткій поверхні дана умова повинна також виконуватися.

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

При руйнуванні каменю на алмазне зерно окрім сили тертя діє сила опору породи руйнуванню. Сила тертя алмаза за породою, порівняно із силою опору руйнуванню є незначною величиною. Експериментально визначено, що коефіцієнт тертя алмаза по міцним породам лежить в межах 0,06–0,08. [5] Об'єднаємо силу тертя та силу опору руйнуванню у комплексний параметр – силу різання. Природа даного зусилля схожа із силою тертя. Існує залежність:

$$F_{\text{риз}} = N \cdot \mu,$$

де  $\mu$  – коефіцієнт руйнування породи алмазним інструментом (аналогічно коефіцієнту тертя) [1].

Таким чином, рівняння (8) та (12) у випадку роботи алмазного каната набудуть вигляду:

$$N = \frac{T}{\rho}; \quad (13)$$

$$\frac{T_1}{T} \leq e^{\int_0^{\psi} \mu \cdot d\psi}. \quad (14)$$

Рівняння (13) дає змогу визначати нормальну реакцію поверхні вибою, яка діє на алмазний канат. Згідно з аксіомою статички про дію та протидію, нормальна реакція опори чисельно рівна силі притиску, отже завдяки рівнянню (13) можна визначати силу притиску у будь-якій точці вибою алмазного каната.

Повздовжня кривизна вибою змінюється по довжині канату, отже і кут  $d\psi$  є величиною змінною. Тому перепишемо (14) у інших координатах:

$$\frac{T_1}{T} \leq e^{\int_0^L \frac{\mu}{\rho} \cdot ds}, \quad (15)$$

де  $ds$  – елементарна довжина каната;  $L$  – довжина пропилю.

Порівнюючи відстань між алмазними втулками канату із довжиною пропилю, можемо вважати відстань між втулками як елементарну довжину. Тоді, згідно з визначенням інтеграла, перепишемо (15):

$$\frac{T_1}{T} \leq e^{\sum_{i=0}^N \frac{\mu}{\rho_i}}, \quad (16)$$

де  $l$  – відстань між алмазними втулками каната;  $N$  – кількість втулок у пропилю ( $N = L/l$ );  $\rho_i$  – кривизна каната на  $i$ -тій алмазній втулці.

**Висновки.** Різницю натягів каната забезпечує силовий момент головного шківів алмазно-канатної установки, а початковий або статичний натяг ( $T$ ) створює механізм посування установки. Таким чином, використання рівняння (21) у комп'ютерній моделі процесу алмазно-канатного розпилювання дає змогу оцінити необхідний силовий момент головного приводного шківів канатної установки у будь-який момент часу на кожній стадії розпилювання. Отримані результати можна використати при запровадженні автоматизації та при виборі силового обладнання при проектуванні алмазно-канатних установок з цифровим модулем автоматизації. Це дозволить зменшити вплив людського фактора на процес видобування блоків природного облицювального каменю з використанням алмазного каната і, як наслідок, підвищить продуктивність видобувної ланки технологічного комплексу кар'єра та покращить якісні показники блоків природного облицювального каменю.

#### Список використаної літератури:

1. 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.

2. *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. – 152 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 трав. 2010 р.) : в 2-х т. – Житомир : ЖДТУ, 2010. – Т. 1. – 148–149 с.
4. *Протас А.Я.* Основы механики нитей : учеб. пособие / *А.Я. Протас.* – Могилев : МТИ, 1998. – 60 с.
5. *Александров В.А.* Силовые и энергетические параметры при царапании гранита единичным алмазным зерном / *В.А. Александров, Д.М. Мифлинг, В.А. Мельник* // Сверхтвердые материалы. – 1985. – № 3. – С. 53–58.

БАШИНСЬКИЙ Сергій Іванович – старший викладач кафедри геотехнологій ім. Бакка М.Т. Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

- каменевидобування;
- фізичні процеси в гірництві;
- комп'ютерні технології.

E-mail: [ip\\_bass@i.ua](mailto:ip_bass@i.ua)

Стаття надійшла до редакції 25.04.2013

**Башинський С.І.** Диференціальні залежності силових параметрів роботи алмазного каната при видобуванні блоків твердих порід облицовального каменю

**Башинский С.И.** Дифференциальные зависимости силовых параметров работы алмазного каната при добычи блоков твердых пород облицовочного камня

**Bashinsky S.I.** Differential relations of working diamond wire force parameters during dimension stone of decorative hard rock mining

УДК 622.23.054.7

**Дифференциальные зависимости силовых параметров работы алмазного каната при добычи блоков твердых пород облицовочного камня / С.И. Башинский**

Рассмотрено равновесие гибкой нити на криволинейной поверхности. Составлено систему уравнений, которая описывает равновесное состояние, и внесено поправки для особенностей работы алмазного каната. В итоге получено зависимости, позволяющие уточнить цифровую модель процесса отделения монолита от массива и оценить эффективность работы силовых агрегатов алмазно-канатной установки.

**Ключевые слова:** алмазный канат, равновесие гибкой нити, моделирование.

УДК 622.23.054.7

**Differential relations of working diamond wire force parameters during dimension stone of decorative hard rock mining / S.I. Bashinsky**

Equilibrium of flexible fiber have considered on curved surface. Combined equation have written for describing equilibrium state and made amendments according features of diamond wire working. Relations had been got as result of considering. They allow specialize digital model of mining dimension stone process and estimate working efficiency of diamond wire saw power aggregates.

**Key words:** diamond wire, equilibrium of flexible fiber, modeling.