

На основі складених аналітичних залежностей було змодельовано у середовищі САПР «MSC.Adams» процес конічного зношування алмазної втулки. Аналіз результатів комп'ютерного моделювання дозволив встановити емпіричний зв'язок між величиною конічного зношування втулки та параметрами процесу різання. Результатом досліджень є практичні рекомендації щодо покращення конструкції алмазної втулки

Ключові слова: конус, алмазна втулка, зношування, моделювання, силові характеристики, MSC.Adams

На основании составленных аналитических зависимостей было смоделировано в среде САПР «MSC.Adams» процесс конического износа алмазной втулки. Анализ результатов компьютерного моделирования позволил определить эмпирическую связь между величиной конического износа втулки и параметрами процесса резания. Результатом исследования являются практические рекомендации по улучшению конструкции алмазной втулки

Ключевые слова: конус, алмазная втулка, износ, моделирование, силовые характеристики, MSC.Adams

ОПТИМІЗАЦІЯ КОНСТРУКЦІЇ ВТУЛКИ АЛМАЗНОГО КАНАТУ ДЛЯ ВИСОКОМІЦНИХ ПОРІД ОБЛИЦЮВАЛЬНОГО КАМЕНЮ

С. І. Башинський

Старший викладач*

E-mail: ip_bass@i.ua

В. В. Котенко

Кандидат технічних наук, доцент**

E-mail: volodymyr99@gmail.com

С. В. Кальчук

Кандидат технічних наук, доцент*

E-mail: kalchuks@ukr.net

*Кафедра розробки родовищ корисних копалин
ім. проф. Бакка М. Т.***

Кафедра маркшейдерії*

***Житомирський державний
технологічний університет

вул. Черняхівського, 103, м. Житомир, Україна, 10005

1. Вступ

Алмазно-канатне різання – найбільш поширений невибуховий метод відокремлення монолітів високоміцних порід облицювального каменю від масиву. Робочий орган алмазної канатної установки представляє собою гнучкий сталевий трос, на який нанизані та жорстко закріплені втулки (перлини) із алмазними зернами. Така будова ріжучого робочого органу надає ряд переваг алмазно-канатному різанню природного каменю: простота конструкції, висока продуктивність та економічність, невеликі втрати сировини при відокремленні та подальшій обробці природного каменю. Разом з тим, велика кількість степенів свободи робочого інструмента спричиняє негативні явища: бічне відхилення канату від площини пропилю, нерівномірне зношування алмазних втулок. Вивчення факторів, що викликають ці явища, ускладнюється відносно високою вартістю алмазного канату. Тому, одним з перспективних напрямків дослідження є комп'ютерне моделювання процесу.

2. Аналіз літературних джерел та постановка проблеми

Вивченню процесу алмазно-канатного різання природного каменю та зношуванню робочого органу присвячено ряд наукових робіт. Так, у роботах [1, 2] описано

види зношування алмазних втулок та зроблено лише якісний аналіз факторів, що впливають на зношування втулок та алмазного канату в цілому, без визначення кількісних співвідношень між цими факторами.

У роботі [3] наведені результати спостереження за зношуванням алмазного канату при розпилюванні ряду порід облицювального каменю різної міцності. На базі цих даних зроблено аналіз залежності ресурсу канату від продуктивності розпилювання. Одиначна алмазна втулка та зміна її форми і розмірів внаслідок зношування не розглядалось.

Дослідження, що наведені у роботах [4, 5], присвячені експериментальному визначенню залежності величини лише лінійного зношування одиначної алмазної втулки від силових факторів при розпилюванні порід середньої міцності – пісковиків та мармуру. Проте, у цих дослідженнях не розглядалось явище конічного зношування. У роботі [6] вказано на наявність невірноваженого силового моменту, що призводить до конічного зношування втулок алмазного канату. Але відсутній детальний аналіз факторів, що викликають такий вид зношування.

У науковій публікації [7] вивчалось питання зношування алмазних зерен під час алмазно-канатного різання високоміцних порід природного каменю. Зміна форми самого ріжучого елемента алмазного канату не розглянуто.

Апроксимація методом нейронних мереж для отримання нелінійних математичних моделей продуктивності різання та зношування алмазного канату при розпилюванні мармуру виконана у роботі [8]. Явище втрати початкової форми алмазною втулкою не розглядалось.

Наведена у публікації [9] методика оптимізації конструкції алмазозносного шару ріжучих елементів передбачає фіксоване розташування алмазних зерен у металевій зв'язці і не враховує явище конічного зношування самої втулки.

Питання раціонального використання робочого інструмента та дослідження його зношування під час роботи на кар'єрах високоміцних порід облицювального каменю до теперішнього часу у повній мірі не розкрито. Не зважаючи на широку увагу у науковій літературі до алмазно-канатного різання, явище конічного зношування алмазних втулок канату залишається не розкритим.

3. Мета та задачі дослідження

Метою досліджень є встановлення причин конічного зношування алмазних втулок та взаємозв'язку їх із силовими факторами процесу алмазно-канатного різання.

Для досягнення поставленої мети слід розв'язати наступні задачі:

- розглянути динаміку руху одиначної алмазної втулки по криволінійній поверхні вибою;
- з отриманих аналітичних залежностей визначити силові фактори, що найбільше впливають на числове значення кута конічного зношування;
- встановити емпіричні залежності між кутом конічного зношування та силовими параметрами за допомогою дослідження моделі алмазної втулки у середовищі САПР;
- на основі аналізу отриманих залежностей дати практичні рекомендації щодо зниження витрат, які пов'язані із конічним зношуванням алмазних втулок.

4. Математичне та комп'ютерне моделювання роботи одиначної алмазної втулки

Під час роботи алмазний канат рухається по криволінійній траєкторії, що характеризується радіусом кривизни ρ , з постійною лінійною швидкістю v . Тому, втулка матиме лише доцентрове прискорення a_c . До зовнішніх зусиль, що діють на втулку, відносяться: статичний натяг канату T_1 та T_2 зі сторони вільних ділянок канату, реакція опору поверхні розкладається на нормальну складову N та дотичну силу опору F_m , яка чисельно рівна силі різання. (рис. 1).

У рамках даного дослідження дією сили земного тяжіння на одиначну алмазну втулку розглядати не будемо, оскільки просторове орієнтування алмазної втулки постійно змінюється в часі, а маса алмазної втулки мала у порівнянні з іншими силовими факторами, що діють на втулку.

Загальне рівняння динаміки руху алмазної втулки матиме вигляд:

$$ma_c = T_1 + T_2 + N + F_m. \quad (1)$$

Перепишемо (1) згідно принципу д'Аламбера у вигляді:

$$T_1 + T_2 + N + F_m + \Phi = 0, \quad (2)$$

де $|\Phi| = ma_c = mv^2/\rho$ – сила інерції, ρ – радіус кривизни поверхні пропилю, v – поздовжня швидкість канату (для процесу різання – величина постійна).

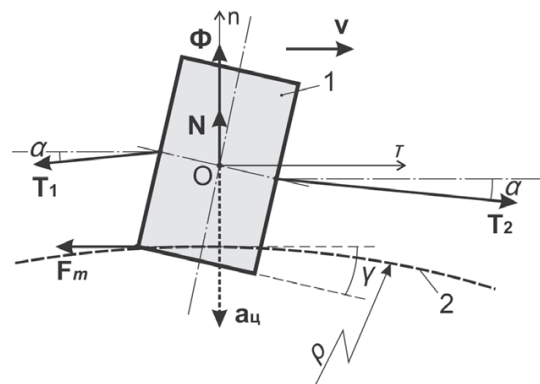


Рис. 1. Розрахункова схема одиначної алмазної втулки: 1 – алмазна втулка; 2 – криволінійна поверхня пропилю

Розглянемо стан рівноваги алмазної втулки. Визначивши систему координат (nOt) , початок якої співпадає з центром маси втулки, а осі направлені по нормалі та дотичній до поверхні пропилю, спроектуємо рівняння (2) на осі системи координат. Рівноважний стан визначається системою рівнянь, де третє рівняння – сума моментів сил відносно т. О:

$$\begin{cases} -T_1 \cdot \cos \alpha + T_2 \cdot \cos \alpha - F = 0, \\ -T_1 \cdot \sin \alpha - T_2 \cdot \sin \alpha + N + \frac{mv^2}{\rho} = 0, \\ T_1 \cdot h_1 - T_2 \cdot h_2 - F_m \cdot h_3 + M_{\text{деф}} = 0, \end{cases} \quad (3)$$

де h_1, h_2, h_3 – відстані від ліній дії відповідних сил до т. О, при чому в загальному випадку $h_1=f_1(\alpha, \gamma)$, $h_2=f_2(\alpha, \gamma)$, $h_3=f_3(\alpha, \gamma)$; γ – кут конусного зношування алмазної втулки; $M_{\text{деф}}$ – момент, викликаний деформацією згину несучого троса, $M_{\text{деф}}=\pi d_{\text{тр}} \cdot E/64\rho$; $d_{\text{тр}}$ – діаметр троса $d_{\text{тр}}=5$ мм; E – модуль Юнга алмазного канату, $E=207$ ГПа.

В даній системі рівнянь серед зусиль невизначеними є натяг T_2 . Дане зусилля чисельно рівне натягу T_1 , збільшеному на величину, що пропорційна силі опору F_m . Також невизначеними є сама сила опору F_m та нормальна реакція поверхні N . Тому введемо додаткову залежність:

$$F_m = N \cdot \mu, \quad (4)$$

де μ – коефіцієнт алмазно-канатного різання, залежить від породи, що розпилюється [9, 10].

Після ряду математичних перетворень із перших двох рівнянь системи (3), з врахуванням (4), виразимо зусилля натягу T_2 :

$$T_2 = \frac{\mu \cdot \frac{mv^2}{\rho} + T_1 \cdot (\cos \alpha + \mu \cdot \sin \alpha)}{(\cos \alpha - \mu \cdot \sin \alpha)}. \quad (5)$$

Таким чином, перепишемо систему (3) у вигляді:

$$\begin{cases} T_2 = \frac{\mu \cdot \frac{mv^2}{\rho} + T_1 \cdot (\cos \alpha + \mu \cdot \sin \alpha)}{(\cos \alpha - \mu \cdot \sin \alpha)} \\ N = T_1 \cdot \sin \alpha + T_2 \cdot \sin \alpha - \frac{mv^2}{\rho} \\ T_1 \cdot f_1(\alpha, \gamma) - T_2 \cdot f_2(\alpha, \gamma) - N \cdot \mu \cdot f_3(\alpha, \gamma) + 2,45 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{E}{\rho} = 0. \end{cases} \quad (6)$$

Кут відхилення вектора зусилля натягу від осі алмазної втулки α залежить від конструктивних параметрів алмазного канату (діаметр та довжина алмазної втулки, кількість алмазних втулок на погонний метр довжини канату) та радіуса кривизни поверхні пропилу ρ . В процесі роботи алмазного канату діаметр алмазних втулок зменшується, але швидкість лінійного зношування алмазної втулки досить мала у порівнянні зі швидкістю різання. Тому можемо вважати діаметр алмазної втулки величиною постійною. Решта конструктивних параметрів алмазного канату взагалі не залежать від параметрів процесу алмазного різання і також є постійними величинами. Радіус кривизни пропилу – величина змінна і має діапазон можливих значень $(0; +\infty)$.

Вираз для аналітичного визначення залежності кута α від вказаних параметрів досить громіздкий і складний для подальшого використання у залежностях (6). Для його апроксимації було побудовано параметричну модель алмазної втулки у графічному середовищі САПР Аскон Компас (рис. 2), яка дозволяє автоматично перебудовувати зображення згідно введених даних та накладених геометричних зв'язків.

При моделюванні використано наступні конструктивні параметри, які відповідають параметрам втулки, що призначена для алмазно-канатного розпилювання високоміцних порід облицювального каменю: довжина алмазної втулки 8,0 мм; діаметр втулки 11,0 мм; відстань між алмазними втулками 30,0 мм.

По отриманим результатам дослідження було побудовано графік залежності $\alpha=f(\rho)$ (рис. 3, а) та за

допомогою методу лінійного вирівнювання (рис. 3, б) підбрано апроксимуючу залежність:

$$\alpha = \frac{1077,8}{\rho} - \frac{4376,3}{\rho^2}. \quad (7)$$

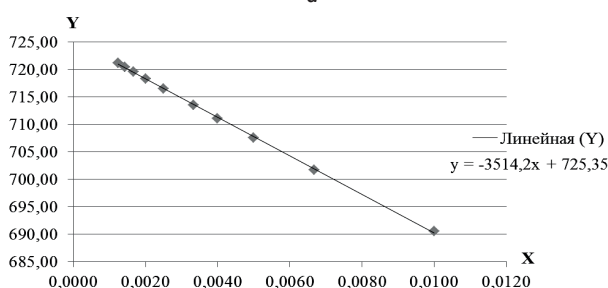
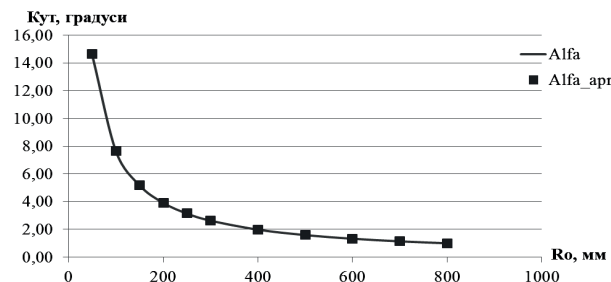


Рис. 3. Встановлення емпіричної залежності зміни кута повороту втулки від радіуса кривизни пропилу: а – графік зміни кута повороту α («Кут») від радіуса кривизни пропилу ρ («Ro») та його апроксимація; б – лінійне вирівнювання даних ($X = 1/\rho$; $Y = (\alpha - \alpha_1)/(\rho - \rho_1)$)

Рівняння (7) встановлює залежність кута α від значення радіуса кривизни поверхні пропилу при заданих конструктивних параметрах.

Кут γ в системі рівнянь (6) – це кут повороту алмазної втулки навколо центра маси в стані рівноваги під дією зовнішніх зусиль. Кут повороту

по своїй суті чисельно дорівнює граничному значенню до якого прямуватиме кут кінцевого зношування при заданих параметрах роботи. Аналіз системи рівнянь (6) виявляє, що вихідними параметрами для визначення кута рівноваги γ є статичний натяг канату T_1 та радіус кривизни ρ . Для подальших досліджень з метою встановлення аналітичних залежностей між цими параметрами було використано метод комп'ютерного моделювання. В якості програмного середовища було обрано САПР

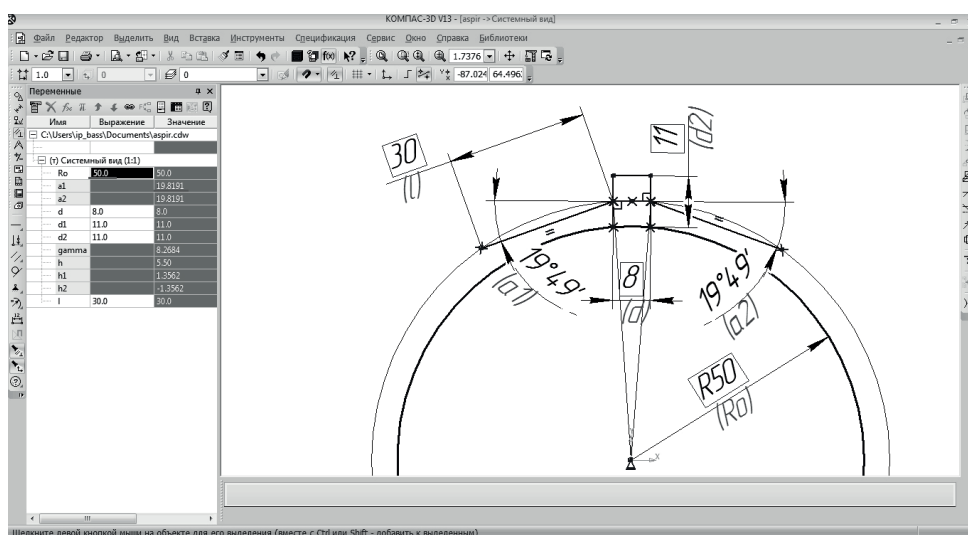


Рис. 2. Параметризована геометрична модель алмазної втулки у графічному середовищі САПР Аскон Компас

«MSC.Adams». Даний вибір обумовлений широким інструментарієм для моделювання лінійних і нелінійних задач та інженерного аналізу. Окрім цього до складу цієї САПР входить модуль Adams Machinery, який дозволяє моделювати тросові системи у дискретному режимі. Таким чином є можливість використати результати даних досліджень при подальшому моделюванні та вивченні алмазного канату як механічної системи у одному програмному середовищі.

Алмазна втулка змодельована у двовимірному просторі у вигляді прямокутної пластини, яка має змогу лише обертатися у площині виду навколо свого центра маси (рис. 4).

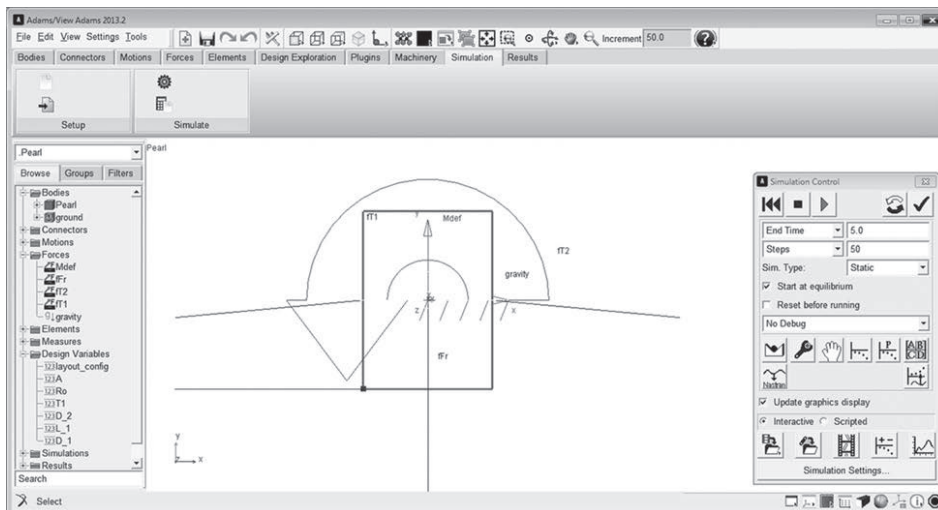


Рис. 4. Вигляд моделі алмазної втулки у графічному модулі «MSC.Adams/View»

На пластину діють зусилля натягу: « $fT1$ » та « $fT2$ », зусилля опору « fFr » та момент деформованого канату « $Mdef$ ». Зусилля натягу прикладені до середини вертикальних сторін і нахилені до осі втулки під кутом α (змінна « A », яка розраховується згідно (7)). Величина зусилля « $fT1$ » дорівнює змінній « $T1$ », а зусилля « $fT2$ » розраховується по (5). Зусилля « fFr » розраховується згідно (4), використовуючи вимірювачі « $fT1_Y$ » та « $fT2_Y$ ». Для реєстрації кута повороту алмазної втулки використовується вимірювач « γ ». Моделювання проходить в режимі «Статика».

5. Визначення кута кінчного зношування залежно від параметрів процесу різання

Аналіз системи (6) із врахуванням (7) показує, що кут повороту γ залежить від двох незалежних змінних: сили статичного натягу T_1 та радіуса кривизни пропилю ρ . Вплив даних параметрів на кут повороту вивчався за допомогою розробленої у САПР «MSC.Adams» моделі. Дана САПР «MSC.Adams» дозволяє виконувати моделювання зі зміною кожного окремого параметра у вказаних межах та автоматично будує графік залежності між двома обраними змінними.

Так, при дослідженні впливу статичного натягу алмазного канату на кут повороту алмазної втулки змінна « Ro », яка відповідає за радіус кривизни пропилю, була по черзі зафіксована на значеннях 5000 мм та

500 мм. Під час моделювання, значення статичного натягу змінювалось від 0,1 до $4 \cdot 10^3$ Н. Графік зміни кута γ від статичного натягу канату T_1 наведено на рис. 5.

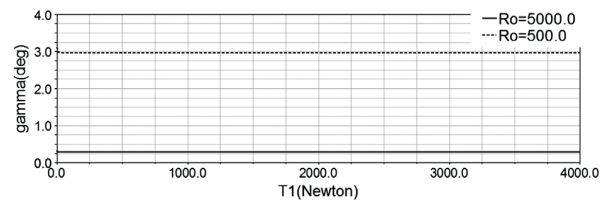
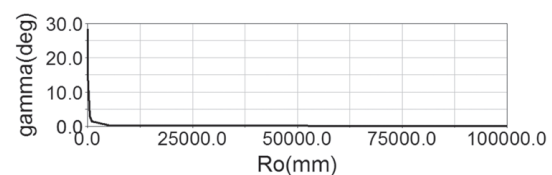
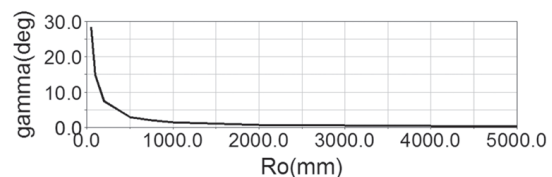


Рис. 5. Графік зміни кута повороту γ (« γ ») залежно від сили статичного натягу канату T_1 (« $T1$ ») при фіксованих значеннях радіуса кривизни пропилю ρ

Для дослідження впливу кривизни пропилю на кут повороту алмазної втулки змінна « $T1$ », яка відповідає за величину статичного натягу канату, була зафіксована на значенні 3000 Н, що відповідає середньому значенню сили статичного натягу алмазного канату при розпилюванні високоміцних облицювальних порід природного каменю. Під час моделювання, значення радіуса кривизни пропилю змінювалось від 50 до 10^5 мм. Графік зміни кута γ від статичного радіуса кривизни ρ наведено на рис. 6, а.



а



б

Рис. 6. Графіки зміни кута повороту втулки γ (« γ ») залежно від радіуса кривизни поверхні пропилю ρ (« Ro »): а – при $\rho \in (0; 10^5)$; б – при $\rho \in (0; 5000)$; – для збільшення зображення графіка.

На цьому графіку (рис. 6, а) спостерігається заломлення кривої на проміжку значень радіуса кривизни (0–5000 мм). Тому для кращої деталізації графіка на даному проміжку значень було проведено додатковий

етап моделювання (рис. 6, б), на якому чітко прослідковується обернена залежність вказаних величин.

6. Аналіз емпіричної залежності кута конічного зношування від параметрів алмазно-канатного різання

Як видно з наведених графіків (рис. 6), при зміні сили статичного натягу кут повороту не змінюється. Тому, можемо констатувати, що явище конічного зношування не залежить від величини зусилля статичного натягу алмазного канату.

Графік зміни кута повороту алмазної втулки від значення радіуса кривизни виявляє обернену залежність кута повороту γ від радіуса кривизни пропилю. При малих значеннях кривизни пропилю ($\rho < 500$ мм) спостерігається різке збільшення кута зношування. Отримані графіки (рис. 7) апроксимуються до кривої, яка описується емпіричним рівнянням:

$$\gamma = \frac{1535,1}{\rho} - \frac{5952,3}{\rho^2}. \quad (8)$$

Коефіцієнт апроксимації становить 0,99, що свідчить про чіткий функціональний зв'язок між кутом повороту та радіусом кривизни пропилю. Очевидно, що числові коефіцієнти у (8) визначаються геометричними параметрами алмазної втулки. Але встановлення цих зв'язків потребує окремого дослідження.

Згідно з (8) на ділянках з малими радіусами кривизни пропилю буде спостерігатися посилення конічного зношування алмазних втулок. Ділянки з малими радіусами кривизни пропилю алмазного канату спостерігаються на початковій (при зрізанні гострих кутів) та на кінцевій стадіях різання блоків природного каменю (рис. 7) [11].

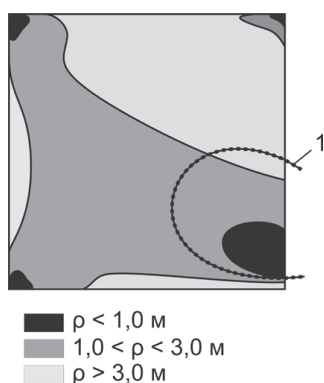


Рис. 7. Розподіл значень радіуса кривизни (ρ) при алмазно-канатному різанні у вертикальній площині:
1 — контур алмазного канату

Стадія основного різання найбільш триваліша та становить 75–80 % тривалості розпилювання високоміцних порід природного каменю і характеризується значеннями радіуса кривизни пропилю 1,5–3 м, яким відповідає кут конічного зношування 0,8–1,2°. При середньому значенні кута конічного зношування 1° на зношеній алмазній втулці залишається частина алмазоносного шару (що формує конус), об'єм якої становить 4 % від початкового об'єму алмазоносного шару втулки. Зважаючи на високу вартість алмазного канату, з метою раціонального використання матеріалів при виготовленні алмазних втулок за результатами проведених досліджень рекомендується використовувати конусну основу втулок. Це дозволить повністю використати об'єм алмазоносного шару та заощаджувати 0,568 см³ його об'єму при виготовленні 1 погонного метру алмазного канату. При концентрації алмазних зерен 100 % економія складе 0,5 г або 2,5 карат на 1 м.п. канату. При середній ринковій ціні на алмазні шліфпорошки зернистістю 500/400 у 0,2 \$/карат, економічний ефект становитиме 0,5 \$/м.п.

7. Висновки

На основі вивчення динаміки руху одиничної алмазної втулки було розроблено математичну модель процесу конічного зношування алмазної втулки при розпилюванні високоміцних порід облицювального каменю.

Аналіз отриманих залежностей виявив два незалежних параметри, що впливають на кут конічного зношування втулки.

Для подальших досліджень виконано комп'ютерне моделювання процесу зношування одиничного елемента алмазного канату та досліджено ступінь впливу кожного з визначених параметрів на кут конічного зношування. На основі моделювання в середовищі САПР «MSC.Adams» було отримано ряд числових даних параметрів процесу різання каменю одиничним елементом та визначено той факт, що величина конічного зношування алмазної втулки не залежить від зусилля статичного натягу алмазного канату і має обернену залежність від значення радіуса кривизни пропилю. В результаті апроксимації даних, отриманих при тестуванні комп'ютерної моделі, було визначено емпіричну функцію, що описує зв'язок між цими параметрами.

Враховуючи практичні значення параметрів розпилювання високоміцних порід природного каменю, надано рекомендації щодо покращення конструкції алмазної втулки, які сприяють підвищенню раціонального використання робочого інструмента та скорочують витрати на матеріали при його виготовленні, а саме: застосувати для виготовлення алмазних втулок основу не циліндричної, а конічної форми, розміри якої визначаються, отриманими в ході досліджень, залежностями.

Література

1. Huang, H. Study on the Wear of Diamond Beads in Wire Sawing [Text] / H. Huang, X. P. Xu // Materials Science Forum. – 2006. – Vols. 532-533. – P. 436–439. doi: 10.4028/www.scientific.net/msf.532-533.436.
2. Huang, G. Q. Analysis of the Breakage of Diamond Wire Saws in Sawing of Stone [Text] / G. Q. Huang, X. P. Xu // Key Engineering Materials. – 2006. – Vol. 304-305. – P. 123–126. doi: 10.4028/www.scientific.net/kem.304-305.123.
3. Бычков, Г. В. Износостойкость алмазного каната по данным зарубежного и отечественного опыта [Текст] / Г. В. Бычков // Добыча, обработка и применение природного камня. – 2011. – Вып. 11. – С. 237–246.

4. Özcelik, Y. Performance Analysis of a Diamond Bead in Its Lifetime by Using Single Bead Test Machine [Text] / Y. Özcelik, E. Yilmazkaya. – Global Stone Congress, 2010. – P. 1–5.
5. Özçelik, Y. Assessment of the Wear of Diamond Beads in the Cutting of Different Rock Types by the Ridge Regression [Text] / Y. Özçelik, S. Kulaksiz, M. C. Çetin // Journal of Materials Processing Technology. – 2002. – Vol. 127, Issue 3. – P. 392–400. doi: 10.1016/s0924-0136(02)00429-6
6. Cardu, M. Experimental Research on the Wear on Diamond Impregnated Beads in Hard Rock Cutting [Text] / M. Cardu, E. Michelotti // Industrial Diamond Review. – 2008. – Vol. 1. – P. 34–39.
7. Zhang, J. S. The Experiment Research of Diamond Wire Saw in Quarrying Granite with High Efficiency [Text] / J. S. Zhang, B. Huang, Z. Wang, X. L. Wang, Z. W. Liu // Materials Science Forum. – 2004. – Vol. 471-472. – P. 117–121. doi: 10.4028/www.scientific.net/msf.471-472.117
8. Jain, S. C. Prediction of Cutting Performance of Diamond Wire Saw Machine in Quarrying of Marble: A Neural Network Approach [Text] / S. C. Jain, S. S. Rathore // Rock Mechanic and Rock Engineering. – 2011. – Vol. 44, Issue 3. – P. 347–371. doi: 10.1007/s00603-011-0137-6
9. Першин, Г. Д. Методические основы расчета рациональной конструкции алмазосодержащего сегмента камнерезных пил [Текст] : сб. науч. тр. / Г. Д. Першин, С. И. Церман // Добыча, обработка и применение природного камня. – 2010. – Вып. 10. – С. 295–302.
10. Cardu, M. Rock cutting by diamond tools: an experimental research [Text] / M. Cardu, E. Michelotti, E. Lovera // Industrial diamond review. – 2008. – Vol. 4. – P. 31–34.
11. Башинський, С. І. Дослідження процесу різання природного облицювального каменю алмазним канатом [Текст] / С. І. Башинський // Технологічний аудит і резерви виробництва. – 2013. – Т. 4, № 2 (12). – С. 34–39. – Режим доступу: <http://journals.urau.ua/tarp/article/view/16249/13678>
12. Башинський, С. І. Визначення стадій розпилювання блоків за допомогою канатної пили за граничним радіусом кривизни вибою інструмента [Текст] : тези VII Всеукр. наук. конф. / С. І. Башинський, М. С. Комаров // Сучасні проблеми екології та геотехнологій. Т. 2. – Житомир: ЖДТУ, 2010. – С. 287–288.