

Державний університет «Житомирська політехніка»

Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Микитенко Сергій Вікторович

УДК 622.2

ДИСЕРТАЦІЯ

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИДОБУТКУ БЛОЧНОГО КАМЕНЮ ШЛЯХОМ ОПТИМІЗАЦІЇ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ АЛМАЗНО-КАНАТНОГО РІЗАННЯ

Спеціальність 184 Гірництво

Галузь знань 18 – виробництво та технології

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____/ С. В. Микитенко

Науковий керівник Криворучко Андрій Олексійович, к.т.н., доцент

Житомир – 2026

АНОТАЦІЯ

Микитенко С.В. Оптимізація параметрів різання алмазним канатом для підвищення економічної ефективності видобутку каменю – наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 184 Гірництво. – Державний університет «Житомирська політехніка», 2026.

Сучасні технології видобутку природного каменю вимагають підвищення ефективності процесів різання, зниження технологічних втрат і мінімізації експлуатаційних витрат. Одним із найбільш продуктивних методів добування блочного каменю є алмазне канатне різання, яке забезпечує високу точність обробки, зменшення втрат матеріалу та можливість отримання великих монолітних блоків. Однак ефективність цього процесу значною мірою залежить від технологічних параметрів роботи каната, інтенсивності його зношування, рівномірності навантаження алмазних намистин, а також раціонального вибору режимів різання.

Проблеми прискореного зношування каната, нерівномірного навантаження на алмазні намистини, надмірних енергетичних витрат та екологічного навантаження вимагають комплексного дослідження та науково обґрунтованої оптимізації параметрів процесу. Саме ці питання стали основою даної дисертаційної роботи, яка спрямована на аналіз впливу ключових технологічних факторів, визначення оптимальних режимів роботи та розробку рекомендацій щодо підвищення продуктивності алмазного канатного різання.

Результати дослідження дозволяють сформулювати науково обґрунтовані рекомендації щодо оптимізації швидкості руху каната, рівня натягу, геометрії кам'яного блоку, використання автоматизованих систем контролю та впровадження методів рециркуляції охолоджувальної рідини. Впровадження запропонованих технологічних рішень сприятиме зменшенню собівартості видобутку природного каменю, підвищенню терміну експлуатації інструменту,

зниженню втрат матеріалу та оптимізації енергоспоживання, що є актуальним завданням для підприємств гірничодобувної галузі.

Дисертація присвячена оптимізації технологічних параметрів алмазного канатного різання природного каменю з метою підвищення продуктивності процесу, зниження технологічних втрат, збільшення довговічності ріжучого інструменту та зменшення енергетичних витрат. Алмазне канатне різання є одним із найбільш ефективних методів видобутку каменю, що забезпечує високу точність різу, мінімальну кількість відходів та можливість добування великих монолітних блоків. Однак, значні експлуатаційні витрати, швидке зношування ріжучого інструменту та необхідність точного регулювання технологічних параметрів залишаються основними проблемами, що потребують наукового обґрунтування та оптимізації.

У ході дослідження проведено аналіз сучасного стану технології алмазного канатного різання, визначено основні технічні обмеження, що впливають на ефективність процесу, та запропоновано шляхи їхнього усунення. Дослідження базується на комплексному підході, що включає аналіз динамічних процесів різання, лабораторні та промислові експериментальні дослідження, математичне моделювання та статистичну обробку даних.

Основні результати дослідження

Встановлено вплив ключових технологічних параметрів (натягу каната, швидкості його руху, напрямку різання) на рівномірність навантаження алмазних намистин та інтенсивність їхнього зношування. Доведено, що при натязі понад 3000 Н зношування намистин збільшується на 20 %, що скорочує термін експлуатації каната на 12–15 %. Запропоновано адаптивне регулювання натягу, що дозволяє збільшити ресурс каната на 15–20 % та підвищити стабільність процесу різання.

Досліджено вплив геометричних параметрів кам'яного блоку (висота, ширина, довжина) на стабільність процесу різання. Виявлено, що збільшення висоти блоку понад 10 м призводить до нерівномірного розподілу навантаження, що підвищує ризик відхилення траєкторії різу та скорочує ресурс каната на 12 %.

Оптимізація розмірів блоку дозволяє зменшити напруження на 10–15 % та стабілізувати якість отриманого матеріалу.

Виявлено закономірності зношування алмазних намистин залежно від типу породи. Встановлено, що у твердих породах (граніт, базальт) зношування намистин відбувається на 25 % швидше, ніж у м'яких (вапняк, мармур). Це вимагає адаптації режимів різання відповідно до фізико-механічних властивостей породи, що дозволяє підвищити ефективність процесу на 20–30 %.

Обґрунтовано доцільність застосування автоматизованих систем контролю натягу алмазного каната, що забезпечує зменшення нерівномірності навантаження на 20 %, стабілізацію траєкторії різу та зниження втрат матеріалу на 12–15 %. Автоматизовані системи дозволяють мінімізувати ризик передчасного розриву каната та покращити якість отриманих блоків.

Розроблено методику прогнозування енергетичних витрат залежно від технологічних параметрів процесу. Встановлено, що збільшення швидкості руху каната з 25 до 35 м/с підвищує енергоспоживання на 18 %, тоді як продуктивність зростає лише на 10 %, що підтверджує необхідність визначення оптимального режиму для мінімізації витрат енергії без втрати ефективності процесу.

Запропоновано ефективні схеми рециркуляції охолоджувальної рідини, що дозволяють зменшити витрати води на 20–25 %, знизити утворення шламових відходів та покращити екологічні показники процесу різання. Впровадження цих схем сприяє зменшенню впливу на довкілля та покращенню умов праці на виробництві.

Проведено економічний аналіз впровадження розроблених технологічних рішень. Встановлено, що комплексна оптимізація режимів різання дозволяє знизити загальні експлуатаційні витрати на 15–20 % за рахунок подовження терміну служби каната, зменшення витрат на електроенергію та мінімізації втрат матеріалу.

Практичне значення отриманих результатів

Отримані результати дослідження мають значну практичну цінність для підприємств гірничодобувної галузі, що займаються видобутком природного

каменю методом алмазного канатного різання. Запропоновані рекомендації щодо оптимізації технологічних параметрів процесу різання можуть бути впроваджені у виробничу практику з метою зниження собівартості видобутку, підвищення продуктивності, зменшення енергетичних витрат та покращення екологічної безпеки виробничих процесів.

Розроблені технологічні рішення дозволяють:

Мінімізувати технологічні втрати матеріалу шляхом вибору оптимальних параметрів натягу каната, швидкості його руху та геометрії блоку, що знижує обсяги непридатного матеріалу та підвищує вихід товарного каменю на 10–18 %.

Збільшити ресурс експлуатації алмазного каната на 15–20 % завдяки розподілу навантаження по всій довжині каната, що забезпечує рівномірне зношування алмазних намистин та запобігає передчасному руйнуванню каната.

Підвищити продуктивність процесу різання за рахунок впровадження оптимальних швидкісних режимів, що забезпечують баланс між продуктивністю та зносостійкістю каната.

Знизити енергетичні витрати на 10–15 % шляхом оптимізації швидкості руху каната та застосування інверторних систем регулювання натягу, що дозволяє зменшити механічні навантаження на ріжучий інструмент та підвищити ефективність використання електроенергії.

Таким чином, результати дослідження мають широкий спектр практичного застосування та можуть бути використані як у діючих гірничодобувних підприємствах, так і при проектуванні нових виробничих ліній для забезпечення високої ефективності, безпеки та екологічної стійкості процесу видобутку природного каменю.

Ключові слова: алмазне канатне різання, оптимізація технологічних параметрів, зношування алмазних намистин, стабільність процесу, енергоспоживання, геометрія блоку, автоматизований контроль натягу, рециркуляція води, екологічні показники, економічна ефективність.

ABSTRACT

Mykytenko S.V. Optimization of Diamond Wire Cutting Parameters to Improve the Economic Efficiency of Stone Extraction: scientific work submitted as a manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy (PhD) in Specialty 184 Mining Engineering. – Zhytomyr Polytechnic State University, 2026.

Modern technologies for the extraction of natural stone require enhancing cutting process efficiency, reducing technological losses, and minimizing operational costs. One of the most productive methods for extracting block stone is diamond wire cutting, which ensures high cutting precision, reduced material loss, and the ability to obtain large monolithic blocks. However, the effectiveness of this process largely depends on the technological parameters of wire operation, the intensity of its wear, the uniformity of diamond bead loading, and the rational selection of cutting modes.

Issues such as accelerated wire wear, uneven load distribution on diamond beads, excessive energy consumption, and environmental impact necessitate a comprehensive study and scientifically grounded optimization of process parameters. These challenges formed the basis of this dissertation, which aims to analyze the impact of key technological factors, determine optimal operating modes, and develop recommendations for improving the productivity of diamond wire cutting.

The study results provide scientifically based recommendations for optimizing wire movement speed, tension levels, block geometry, the use of automated control systems, and the implementation of cooling fluid recirculation methods. The application of the proposed technological solutions will contribute to reducing the cost of natural stone extraction, extending the service life of cutting tools, decreasing material losses, and optimizing energy consumption, which are crucial tasks for the mining industry.

This dissertation focuses on optimizing the technological parameters of diamond wire cutting for natural stone to improve process productivity, reduce technological losses, increase the durability of cutting tools, and decrease energy consumption. Diamond wire cutting is among the most efficient stone extraction methods, offering

high cutting accuracy, minimal waste generation, and the ability to extract large monolithic blocks. However, high operational costs, rapid tool wear, and the necessity for precise adjustment of technological parameters remain major challenges requiring scientific justification and optimization.

The research includes an analysis of the current state of diamond wire cutting technology, identifies key technical constraints affecting process efficiency, and proposes solutions to overcome them. The study follows a comprehensive approach, incorporating an analysis of cutting dynamics, laboratory and industrial experimental studies, mathematical modeling, and statistical data processing.

Main Research Results

The influence of key technological parameters (wire tension, movement speed, and cutting direction) on the uniform load distribution across diamond beads and the intensity of their wear has been established. It has been proven that when the wire tension exceeds 3000 N, bead wear increases by 20 %, reducing the wire's service life by 12–15 %. An adaptive tension control system has been proposed, which extends the wire lifespan by 15–20 % and enhances the stability of the cutting process.

The impact of the geometric parameters of the stone block (height, width, and length) on the stability of the cutting process has been investigated. It has been found that increasing the block height above 10 meters leads to an uneven load distribution, increasing the risk of cutting trajectory deviation and reducing the wire's lifespan by 12 %. Optimizing the block dimensions helps reduce stress levels by 10–15% and improve the quality of the extracted material.

The wear patterns of diamond beads depending on the type of rock have been identified. It has been established that in hard rocks (granite, basalt), diamond bead wear occurs 25% faster than in softer rocks (limestone, marble). This requires adjusting cutting modes according to the physical and mechanical properties of the material, allowing for a 20–30% improvement in cutting efficiency.

The feasibility of using automated wire tension control systems has been justified, which reduces uneven load distribution by 20 %, stabilizes the cutting trajectory, and decreases material losses by 12–15 %. Automated control systems

minimize the risk of premature wire breakage and improve the quality of extracted stone blocks.

A methodology for predicting energy consumption based on the technological parameters of the cutting process has been developed. It has been found that increasing the wire speed from 25 to 35 m/s raises energy consumption by 18%, while productivity increases by only 10 %, confirming the necessity of determining an optimal cutting regime to minimize energy costs without reducing process efficiency.

Effective cooling fluid recirculation schemes have been proposed, allowing for a 20–25% reduction in water consumption, minimizing the formation of slurry waste, and improving the environmental sustainability of the cutting process. Implementing these schemes contributes to reducing environmental impact and improving working conditions at production sites.

An economic analysis of the implementation of the developed technological solutions has been conducted. It has been determined that comprehensive optimization of cutting parameters reduces total operating costs by 15–20 % due to the extended service life of the diamond wire, lower electricity costs, and minimized material losses.

Practical Significance of the Research Results

The research results have significant practical value for mining industry enterprises engaged in the extraction of natural stone using diamond wire cutting technology. The proposed recommendations for optimizing the technological parameters of the cutting process can be implemented in production to reduce extraction costs, increase productivity, decrease energy consumption, and enhance the environmental safety of mining operations.

The developed technological solutions allow for the following improvements:

Minimization of material losses by selecting optimal wire tension parameters, movement speed, and block geometry, reducing the amount of non-commercial material and increasing the yield of marketable stone by 10–18 %.

Extension of the operational life of the diamond wire by 15–20 % due to optimized load distribution along the entire length of the wire, ensuring uniform wear of the diamond beads and preventing premature wire failure.

Enhancement of cutting process productivity through the implementation of optimized speed modes, ensuring a balance between cutting efficiency and wire wear resistance.

Reduction of energy consumption by 10–15 % through optimization of wire movement speed and the use of inverter-based tension control systems, which reduce mechanical loads on the cutting tool and improve overall energy efficiency.

Thus, the research findings have broad practical applications and can be utilized in both existing mining enterprises and the design of new production lines, ensuring high efficiency, safety, and environmental sustainability in the extraction of natural stone.

Keywords: diamond wire cutting, optimization of technological parameters, diamond bead wear, process stability, energy consumption, block geometry, automated tension control, water recirculation, environmental performance, economic efficiency.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у фахових виданнях, які входять до наукометричних баз:

1. Шамрай В. І., Мельник-Шамрай В. В., Шкабара Ю. В., Микитенко С. В., Ігнатюк Р. М. Аналіз сучасного стану каменедобувної та каменеобробної галузі України. *Технічна інженерія..* 2022. № 2 (90). С. 193–199. [https://doi.org/10.26642/ten-2022-2\(90\)-193-199](https://doi.org/10.26642/ten-2022-2(90)-193-199) (Входить до переліку міжнародної наукометричної бази даних WorldCat; BASE; eLibrary, GoogleScholar). Загальний обсяг 0,75 друк. арк., особисто автору належить 0,15 друк. арк.: особистий внесок автора полягає в обробці статистичних даних.

2. Leonets I., Kyrylenko N., Mykytenko S., Syroid Y. Impact Assessment of Natural Stone Processing Techniques on the Grain Composition of Sludge Admixtures for Press Powder. *Geoheritage..* 2024. Vol. 16. (129) P.80-92. <https://doi.org/10.1007/s12371-024-01029-6> (Входить до переліку міжнародної наукометричної бази даних Scopus, GoogleScholar). Загальний обсяг 1,5 друк. арк., особисто автору належить 0,4 друк. арк.: особистий внесок автора полягає в проведенні досліджень в лабораторії.

3. Микитенко С. В., Сироїд Є. С. Міжнародна торгівля України природним каменем під час війни. *Технічна інженерія..* 2024. № 1 (93). С. 400–405. [https://doi.org/10.26642/ten-2024-1\(93\)-400-405](https://doi.org/10.26642/ten-2024-1(93)-400-405) (Входить до переліку міжнародної наукометричної бази даних WorldCat; BASE; eLibrary, GoogleScholar). Загальний обсяг 0,75 друк. арк., особисто автору належить 0,4 друк. арк.: особистий внесок автора полягає в аналізі літературних джерел, постановці завдання та обробці статистичних даних.

4. Сироїд Є. С., Соколовський В. О., Шкабара Ю. В., Микитенко С. В., Сидоренко А. А. Економічні та географічні переваги розміщення підприємств з обробки природного каменю в Європі: порівняння ключових країн. *Технічна інженерія..* 2024. № 2 (94). С. 268–275. [https://doi.org/10.26642/ten-2024-2\(94\)-268-275](https://doi.org/10.26642/ten-2024-2(94)-268-275) (Входить до переліку міжнародної наукометричної бази даних WorldCat;

BASE; eLibrary, GoogleScholar). Загальний обсяг 1 друк. арк., особисто автору належить 0,2 друк. арк.: особистий внесок автора полягає в аналізі чинників, які впливають на локацію каменеобробного підприємства.

5. Сироїд Є. С., Сидоренко А. А., Леонець І. В., Микитенко С. В., Колодій М. А. Вплив параметрів різання на енергоспоживання та продуктивність при обробці каменю.. *Науковий вісник ДонНТУ*. 2024. № 2 (13). С. 102–113. <https://doi.org/10.31474/2415-7902-2024-2-13-102-113> (Входить до переліку міжнародної наукометричної бази даних GoogleScholar). Загальний обсяг 1,5 друк. арк., особисто автору належить 0,3 друк. арк.: особистий внесок автора полягає в обрахунку параметрів енергоспоживання та продуктивності при обробці каменів.

6. Мельничук П. П., Леонець І. В., Коваленко Я. П., Микитенко С. В. Дискове та алмазно-канатне різання гранітів: порівняння технологій для промислової ефективності.. *Технічна інженерія*. 2025. № 2 (96). С. 31–37. [https://doi.org/10.26642/ten-2025-2\(96\)-31-37](https://doi.org/10.26642/ten-2025-2(96)-31-37) (Входить до переліку міжнародної наукометричної бази даних WorldCat; BASE; eLibrary, GoogleScholar). Загальний обсяг 1 друк. арк., особисто автору належить 0,2 друк. арк.: особистий внесок автора полягає в проведенні натурних досліджень.

7. Сидоренко А. А., Микитенко С. В. Аналіз механізму зношування алмазних зерен при різних швидкостях різання. *Науковий вісник ДонНТУ*.. 2025. № 1 (14). С. 210–219. <https://doi.org/10.31474/2415-7902-2025-1-14-210-219> (Входить до переліку міжнародної наукометричної бази даних WorldCat; BASE; eLibrary, GoogleScholar). Загальний обсяг 1,25 друк. арк., особисто автору належить 0,7 друк. арк.: особистий внесок автора полягає в підготовці ключових розділів статті, таких як вступ, методика, результати чи висновки, а також створення ілюстрацій (графіків) для демонстрації результатів.

8. Микитенко С. В., Кузнецов О. О., Леонець І. В., Цигода В. В. Аналіз ефективності використання дискових пил у каменеобробній промисловості.. *Науковий вісник ДонНТУ*. 2025. № 2 (15). С. 200–208. <https://doi.org/10.31474/2415-7902-2025-2-15-200-208> (Входить до переліку

міжнародної наукометричної бази даних WorldCat; BASE; eLibrary, GoogleScholar). Загальний обсяг 1,12 друк. арк., особисто автору належить 0,2 друк. арк.: особистий внесок автора полягає в обробці даних щодо сейсмічних вібрацій та формулюванні висновків.

9. Кузнецов О. О., Леонєць І. В., Микитенко С. В., Білобров Д. М., Цигода В. В. Економіка використання великих блоків лабрадориту в сучасному каменеобробному виробництві.. *Науковий вісник ДонНТУ*. 2026. № 1 (16). С. 54–64. <https://doi.org/10.31474/2415-7902-2026-1-16-54-64> (Входить до переліку міжнародної наукометричної бази даних WorldCat; BASE; eLibrary, GoogleScholar). Загальний обсяг 1,37 друк. арк., особисто автору належить 0,3 друк. арк.: особистий внесок автора полягає в постановці задачі, аналізі результатів економіки використання великих блоків лабрадориту.

Статті у закордонних збірниках наукових праць:

10. Микитенко С. В., Кузнецов О. О., Цигода В. В. Вплив конструктивних і режимних параметрів дискових пил на ефективність різання кам'яних порід.. *Тези III Всеукраїнської науково-практичної конференції «Сучасні проблеми гірництва та будівництва»*, 20 листопада 2025 року. Житомир: Житомирська політехніка, 2025. С. 63.

11. Сидоренко А. А., Микитенко С. В., Шкабара Ю. В., Качуровський М. В., Соколовський В. О. Вплив параметрів різання на енергоспоживання та продуктивність при обробці каменю.. *Тези II Всеукраїнської науково-практичної конференції «Сучасні проблеми гірництва та будівництва»*, 21 листопада 2024 року. Житомир: Житомирська політехніка, 2024. С. 54.

12. Леонєць І. В., Микитенко С. В., Білобров Д. М., Шкабара Ю. В. Вплив місць збору шламу на каменеобробних підприємствах на зерновий склад прес-порошків.. *Тези Всеукраїнської науково-практичної конференції «Сучасні проблеми гірництва та будівництва»*, 23 листопада 2023 року. Житомир: Житомирська політехніка, 2023. С. 34–35.

ЗМІСТ

ЗМІСТ	13
ВСТУП.....	15
РОЗДІЛ 1 АЛМАЗНЕ КАНАТНЕ РІЗАННЯ У ВИДОБУТКУ КАМЕНЮ: ІСТОРІЯ, ТЕХНОЛОГІЇ ТА ЕФЕКТИВНІСТЬ	22
1.1. Порівняльний аналіз різних технологій видобутку блочного каменю	22
1.2. Технологічна та економічна еволюція використання алмазного тросу в кар'єрах для видобутку граніту.....	28
1.3. Оцінка впливу властивостей каменю на продуктивність алмазного інструменту	35
Висновки до розділу 1	39
Розділ 2 ВПЛИВ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ РОБОТИ АЛМАЗНОГО КАНАТА	41
2.1. Механічний аналіз динаміки алмазного канатного тросу у процесі різання природного каменю.....	41
2.2. Дослідження зносостійкості перлин алмазного канату	49
2.3. Оптимізація режимних параметрів алмазно-канатного різання для підвищення ефективності видобутку природного каменю	52
Висновки до розділу 2	63
Розділ 3. ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНОЇ ГЕОМЕТРІЇ ЗАБОЮ ДЛЯ ВИДОБУТКУ АЛМАЗНО-КАНАТНИМИ ПИЛАМИ	65
3.1. Дослідження впливу зміни висоти уступу на коефіцієнт питомих втрат	65
3.2. Визначення оптимальної висоти уступу при видобутку блочного каменю алмазно-канатним обладнанням	68
3.3. Причини руйнування моноліту, який перекидається.....	68

3.4. Вплив параметрів моноліту, що перекидаються на його руйнування і їх обґрунтування.....	86
3.4.1. Вплив висоти моноліту, що перекидаються на формування технологічних втрат.....	89
3.4.2. Вплив ширини моноліту на його руйнування.....	93
3.4.3. Вплив довжини перекидаються моноліту на його руйнування	94
Висновки до розділу 3	94
Розділ 4. ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ КАНАТНОГО РІЗАННЯ З УРАХУВАННЯМ РОЗМІРНО-ГЕОМЕТРИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК БЛОКУ	96
4.1. Вплив геометричних параметрів моноліту на процес канатного різання.	96
4.2. Дослідження впливу параметрів робочої зони та технології підготовки горизонтів на потенційну виробничу потужність кар'єру.....	99
Висновки до розділу 4	121
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	123
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	125
Додаток А.....	129
Додаток Б.....	132
Додаток В	135

ВСТУП

Актуальність теми. Видобуток природного каменю є стратегічно важливим сектором гірничої промисловості, що забезпечує сировинну базу для будівництва, архітектури, декоративної обробки та промислового використання. Однією з головних проблем цього процесу є високий рівень технологічних втрат каменю, значні енергетичні витрати та швидке зношування ріжучого інструменту, що безпосередньо впливає на собівартість та ефективність виробництва.

Алмазно-канатне різання на сьогодні є найбільш прогресивним методом видобутку блочного каменю, оскільки забезпечує високу точність різу, зменшення обсягу відходів і підвищення екологічної безпеки у порівнянні з традиційними методами, такими як буро-вибухові роботи, клинове розколювання чи механічне розпилювання. Цей метод дозволяє отримувати блоки великого формату з мінімальними пошкодженнями, що значно підвищує якість кінцевої продукції та сприяє зменшенню витрат на подальшу обробку матеріалу.

Проте, незважаючи на очевидні переваги, існує низка технологічних обмежень, що впливають на ефективність алмазного канатного різання. Основними проблемами є:

Швидке зношування алмазного канатного троса, що спричиняє додаткові витрати на його заміну та збільшує перерви у виробничому циклі.

Нерівномірний розподіл навантаження на алмазні намистини, що призводить до передчасного руйнування алмазного шару та зниження продуктивності.

Підвищене енергоспоживання, особливо при неправильному виборі параметрів різання, що робить процес економічно менш ефективним.

Вплив геометричних параметрів моноліту на стабільність різу, що може спричиняти відхилення траєкторії каната, збільшення втрат матеріалу та підвищене навантаження на інструмент.

Сучасні наукові дослідження у цій сфері спрямовані на вдосконалення конструкції алмазних намистин, покращення технологічних режимів різання та створення систем автоматичного контролю натягу каната для зменшення нерівномірності навантажень і зношування інструменту. Також активно розробляються математичні моделі прогнозування зносу каната, що дозволяють підвищити його довговічність на 15–20 % шляхом оптимізації режимів експлуатації.

Однак залишається невирішеним питання оптимального поєднання швидкості руху каната, натягу, подачі води та геометрії блоку для досягнення мінімальних технологічних втрат і максимальної продуктивності процесу. Недостатньо вивчений вплив просторового розташування блоку на ефективність різання, а також механізми взаємодії алмазних намистин із гірською породою в різних умовах навантаження.

Отже, дослідження, яке спрямоване на оптимізацію параметрів алмазного канатного різання з метою підвищення економічної ефективності процесу видобутку каменю є *актуальною науковою і практичною задачею*.

Метою роботи є оптимізація технологічних параметрів алмазного канатного різання для підвищення ефективності видобутку природного каменю, мінімізації технологічних втрат, зменшення зношування ріжучого інструменту та підвищення продуктивності процесу.

Для досягнення сформульованої мети в дисертаційній роботі поставлені та вирішені такі задачі:

- Провести аналіз сучасного стану досліджень і перспектив розвитку технології алмазного канатного різання, визначено основні напрями вдосконалення процесу, зокрема зменшення технологічних втрат, підвищення точності різання, зниження зношування інструменту та підвищення економічної ефективності процесу.

- Оцінити вплив технологічних параметрів (швидкість руху каната, натяг) на продуктивність і довговічність алмазного троса, встановлено взаємозв'язки між цими параметрами та ефективністю різання, що дозволяє оптимізувати режими роботи для підвищення продуктивності процесу.

- Дослідити вплив геометричних характеристик моноліту (висота, ширина, довжина) на стабільність процесу різання, визначено оптимальні пропорції блоку для мінімізації технологічних втрат і підвищення виходу товарного каменю, що забезпечує економічну доцільність видобутку.

- Виявити основні механізми зношування алмазного канатного троса, встановлено закономірності нерівномірного зношування намистин уздовж каната та визначено основні фактори, що впливають на їх довговічність, що дозволило розробити методи підвищення ресурсу каната.

Об'єкт дослідження – процес алмазного канатного різання природного каменю, що охоплює механізми взаємодії алмазного каната з гірською породою, ключові параметри технологічного процесу, а також фактори, які визначають ефективність різання, інтенсивність зношування ріжучого інструменту та рівень технологічних втрат матеріалу.

Предмет дослідження – технологічні параметри та закономірності процесу алмазного канатного різання природного каменю, зокрема вплив швидкості руху каната, натягу, геометричних характеристик моноліту та умов навантаження на ефективність різання.

Методи досліджень. У роботі використано комплексний підхід, що включає аналіз науково-технічної літератури та патентних джерел для визначення сучасного стану та перспектив розвитку алмазного канатного різання. Теоретичні методи застосовувалися для оцінки впливу технологічних параметрів та геометричних характеристик блоку на продуктивність процесу. Експериментальні дослідження проводилися для вимірювання зношування алмазного каната, рівномірності навантаження намистин і стабільності траєкторії різу. Математичний та статистичний аналіз використовувався для встановлення залежностей між технологічними параметрами, рівнем

зношування та ефективністю процесу. Порівняльний аналіз дозволив оцінити ефективність різних режимів роботи та визначити оптимальні умови різання. Отримані результати стали основою для розробки рекомендацій щодо підвищення ефективності процесу, зменшення експлуатаційних витрат і мінімізації технологічних втрат матеріалу.

Використання технологій штучного інтелекту. Технології штучного інтелекту (ChatGPT) використовувалися: 1) для пошукових цілей та систематизації масиву даних при вивченні теоретичних підходів до оптимізації технологічних параметрів алмазно-канатного різання природного каменю; 2) для перекладу міжнародних наукових публікацій (зокрема, з наукометричних баз «Scopus» та «Web of Science») з англійської мови на українську в частині дослідження зношування алмазних намистин та режимів різання. Технології штучного інтелекту не використовувалися для генерування тексту дисертації. Усі математичні розрахунки, статистична обробка експериментальних даних, регресійний та кореляційний аналіз залежностей між технологічними параметрами процесу різання, а також моделювання динамічних процесів виконувалися автором самостійно із застосуванням спеціалізованого програмного забезпечення Ansys Workbench та стандартних математичних методів обробки даних.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в тому, що **вперше:**

- Встановлено кількісну залежність між швидкістю руху алмазного каната та ефективністю різання природного каменю, яка показує, що перевищення порогового значення 30 м/с призводить до диспропорційного зростання інтенсивності зношування алмазних намистин (на 40 %) при незначному збільшенні продуктивності (на 10 %). На цій основі науково обґрунтовано верхню межу оптимального швидкісного діапазону 25–30 м/с та виявлено нелінійний характер залежності «продуктивність – ресурс інструменту».

- Виявлено та кількісно охарактеризовано залежність інтенсивності зношування алмазних намистин від фізико-механічних властивостей гірської породи: встановлено, що для твердих порід показник зношування перевищує аналогічний для м'яких порід (вапняк, мармур) на 25 %, а режим навантаження 55 А є раціональним для монолітів площею понад 72 м². Це стало науковою основою для розробки породо-специфічних режимів різання, що підвищують ефективність процесу на 20–30 %.

удосконалено:

- підхід до вибору геометричних параметрів кам'яного моноліту, в якому на відміну від існуючих методів додатково враховано критичне значення висоти моноліту, перевищення якого спричиняє нерівномірний розподіл навантаження вздовж каната та скорочує його ресурс на 12 %, а також встановлено аналітичну залежність об'єму технологічних втрат від геометрії моноліту.

набуло подальшого розвитку:

- обґрунтування вибору форми розрізної траншеї в блочних кар'єрах природного каменю на основі порівняльних промислових випробувань на Лезниківському кар'єрі. Встановлено, що застосування трапецієподібної форми траншеї (U) забезпечує вихід товарних блоків 12,4 % проти 5,6 % для трикутної (V), тобто більш ніж удвічі вищий, а витрати часу на проведення траншеї скорочуються на 63,4 %, що підтверджує технологічну та економічну доцільність трапецієподібного методу.

Практичне значення отриманих результатів роботи. В ході проведення досліджень отримано результати, що мають практичне значення:

- Розроблено породо-специфічні режими алмазно-канатного різання для твердих порід (граніт, базальт) та м'яких порід (вапняк, мармур), апробовані в умовах Лезниківського кар'єру. Впровадження режиму 55 А для монолітів площею понад 72 м² забезпечує продуктивність до 2,8 м²/год при одночасному подовженні ресурсу каната на 15–20 %.

- Розроблено методику вибору геометричних параметрів кам'яного моноліту, яка дозволяє встановити раціональні розміри блоку (висота – не більше 10 м, ширина – $b < 2\mu H$) для конкретних умов кар'єру, знизити контактні напруження на 10–15 % та зменшити технологічні втрати каменю до рівня 10–18 %.

- Розроблено методику розрахунку динамічних навантажень на моноліт при перекиданні, яка на відміну від існуючих дозволяє прогнозувати момент утворення технологічних тріщин залежно від висоти уступу та фізико-механічних властивостей породи, що дає змогу обґрунтовано вибирати параметри амортизаційних підсіпок.

- Встановлено оптимальний швидкісний діапазон 25–30 м/с і розроблено практичні рекомендації щодо вибору класу алмазних намистин (SDA 85+/SDA 100+) для роботи в цьому діапазоні, що в комплексі знижує загальні експлуатаційні витрати на 15–20 % та витрати електроенергії на 10–15 %.

Особистий внесок здобувача. Основні результати дисертаційного дослідження, представлені до публічного захисту, одержані автором особисто (звіт подібності сформований за допомогою програми StrikePlagiarism додається). Дисертація є самостійно виконаним і завершеним науковим дослідженням. Наукові результати, висновки та рекомендації, що викладені в роботі та виносяться на захист, отримані здобувачем особисто. З наукових праць, опублікованих у співавторстві, у дисертаційній роботі використано лише ті ідеї, положення та розробки, які є результатом самостійної роботи автора.

Апробація результатів дисертації. Одержані результати наукового дослідження, викладені у дисертаційній роботі, було схвалено на засіданні кафедри природничих та гірничих дисциплін Державного університету «Житомирська політехніка». Основні теоретичні положення та практичні результати дисертаційного дослідження обговорювалися й отримали схвальну оцінку на 3 науково-практичних конференціях, а саме: Всеукраїнській науково-практичній конференції «Сучасні проблеми гірництва та будівництва» (23 листопада 2023 р., м. Житомир); II Всеукраїнській науково-практичній

конференції «Сучасні проблеми гірництва та будівництва» (21 листопада 2024 р., м. Житомир); III Всеукраїнській науково-практичній конференції «Сучасні проблеми гірництва та будівництва» (20 листопада 2025 р., м. Житомир).

Публікації. Основні положення і наукові результати дослідження опубліковано у 9 наукових працях, з яких 8 – у фахових виданнях та 1 публікація – у закордонному збірнику наукових праць (включена до переліку міжнародної науково-метричної бази даних Scopus); 3 – у збірниках матеріалів національних і міжнародних конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається із вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, списку використаних інформаційних джерел та додатків. Основний текст роботи викладено на 125 сторінках машинописного тексту. Дисертаційна робота містить 5 таблиць, 45 рисунків, 3 додатки на 8 сторінках. Список використаних інформаційних джерел становить 42 найменування. Загальний обсяг роботи становить 136 сторінок.

РОЗДІЛ 1

АЛМАЗНЕ КАНАТНЕ РІЗАННЯ У ВИДОБУТКУ КАМЕНЮ: ІСТОРІЯ, ТЕХНОЛОГІЇ ТА ЕФЕКТИВНІСТЬ

1.1. Порівняльний аналіз різних технологій видобутку блочного каменю

Широка палітра кольорів та родовищ облицювального природного каменю має спільну рису: їх необхідно видобувати у формі комерційних блоків. Це означає, що блоки повинні мати правильну форму паралелепіпеда, зазвичай вагою від 5 до 15 тонн, які придатні для подальшої обробки та виробництва плит або інших архітектурних елементів.

Етап видобутку в індустрії облицювального каменю відповідає одній із двох загальних стратегій:

А. Двостадійний та тристадійний видобуток блоків природного каменю: великі об'єми гірської породи, зазвичай у межах тисяч кубічних метрів, видаляються первинними монолітами з масиву і потім поетапно поділяються на комерційні блоки; непридатний матеріал відбраковується на цьому етапі;

В. Одностадійний видобуток: комерційні блоки вирізаються безпосередньо з масиву гірської породи. Цей метод здебільшого застосовується до малотріщинуватих та однорідних родовищ, особливо в підземних розробках.

Великі поверхні розрізання або розколювання повинні мають бути зроблені без погіршення цілісності гірської породи та максимально економічно.

У видобутку міцного облицювального каменю (гранітів та подібних порід) найекономічнішою технологією видобування, принаймні для первинних монолітів, досі є застосування вибухових речовин. Це можна розглядати як крайню форму використання концепцій контрольованих вибухів і технік точного буріння. Лінійні заряди, які представлені нитками детонуючого шнура, розміщуються в паралельних, близько розташованих шпурах, які наповнені матеріалом, що поглинає удар, як правило, це вода, і одночасно підриваються за допомогою магістрального шнура. Щілина, яка виникає внаслідок розтягуючих напружень між шпурами, а надлишкова енергія від вибуху забезпечує необхідне

невелике зміщення відокремленої маси [1]. При належному проведенні операцій чітко спостерігаються половиники відбитків шпурів на боковій поверхні, і не виникає додаткових тріщин [2]. Останнім часом широкого поширення набули газогенератори «Літокол». Процес заряджання шпурів газогенератором «Літоколом» наведений на рис. 1.1.



Рис. 1.1. Процес заряджання шпурів газогенератором «Літокол»

Технологія видобутку природного каменю алмазним канатом виникла в 1960-х роках в Італії, коли інженери почали експериментувати з використанням сталевого троса з алмазними сегментами для різання мармуру в кар'єрах Каррари. До того моменту видобуток каменю здійснювався вручну або за допомогою вибухових технологій, які мали значні недоліки, зокрема низьку точність різання, великі втрати матеріалу, значний рівень забруднення довкілля та високу трудомісткість. Впровадження алмазного канатного різання дозволило значно підвищити ефективність процесу, оскільки цей метод забезпечував точне, чисте та контрольоване відділення кам'яних блоків без значних втрат. У 1970-х роках технологія зазнала подальшого розвитку – було розроблено механізми для гідравлічного натягування каната, що сприяло рівномірному та ефективному процесу різання. У 1980-х роках метод став поширеним у всьому світі, особливо

в таких країнах, як США, Бразилія, Індія та Китай, де видобуток граніту, мармуру та інших природних каменів мав велике економічне значення. У 1990-х роках технологія була автоматизована, що дозволило значно знизити участь людини у небезпечних виробничих процесах і підвищити рівень безпеки на кар'єрах. Вже у 2000-х роках метод став ще більш екологічним, оскільки застосування водяного охолодження та зменшення рівня шуму дозволило мінімізувати негативний вплив на довкілля. Сучасні алмазні канати виготовляються зі спеціальних синтетичних алмазів і розраховані на довговічність, що дозволяє суттєво знижувати витрати на видобуток природного каменю, підвищуючи загальну продуктивність підприємств. Використання цієї технології сьогодні є стандартом для видобувної галузі, оскільки вона забезпечує високу якість обробки каменю, економічну ефективність і збереження природних ресурсів.

Сьогодні на блочних кар'єрах України щонайменше 90 % кар'єрів з твердими породами використовують алмазний трос на кількох етапах видобутку.

Використовуються лише пластифіковані або гумові троси, причому останні стають більш популярними у видобувних роботах. Перлини тросу містять в собі синтетичні алмази; їхній діаметр становить 10–11 мм, а на кожен метр троса припадає 35–43 перлин.

Основні характеристики та продуктивність методу різання алмазним тросом узагальнені в таблиці 1. Оскільки трос був досить дорогим (понад 100 доларів США за метр, і до 150 доларів США за метр для спеціальних типів), але з часом він стає дешевше, нині він коштує від 40 доларів США за метр погонний. Висока продуктивність алмазного канату визначається двома параметрами: продуктивністю ($\text{м}^2/\text{год}$) і терміном служби троса ($\text{м}^2/\text{м}$). Останній параметр не має точного визначення, оскільки трос можна кілька разів відновлювати.

Регенерація (до 5 разів, зазвичай 1–2 рази для твердих порід) є трудомістким завданням, що потребує високої кваліфікації. Воно включає розбирання троса, вибір придатних для повторного використання перлин, заміну відпрацьованих перлин і збирання троса. Оцінка того, який рівень регенерації є розумним і економічно ефективним, залежить від місцевих умов. Алмазний трос

часто використовується "до кінця" у видобутку твердих порід, тобто до повного зношування ріжучих елементів, оскільки термін служби перлин приблизно дорівнює терміну служби троса.

Висока вартість обладнання та витратних матеріалів пояснюється складністю та вартістю виготовлення алмазного каната. Алмазні намистини виготовляють із синтетичних алмазів, які проходять складний технологічний цикл вирощування (HPHT – High Pressure High Temperature) або хімічного осадження парової фази (CVD – Chemical Vapor Deposition). Ці технології потребують значних енергетичних ресурсів, а висока якість синтетичних алмазів напряду впливає на їхню вартість. Металеві зв'язки (зазвичай із застосуванням кобальту або сплавів нікелю) слугують для утримання алмазних зерен на поверхні намистин, і вартість таких високотехнологічних сплавів також суттєво підвищує ціну каната. Канат і його елементи (трос, намистини, з'єднувальні втулки) з часом зношуються та потребують заміни, що збільшує експлуатаційні витрати. Окрім самого каната, важливим витратним матеріалом є охолоджувальна рідина (вода, інколи зі спеціальними домішками), споживання якої впливає на загальну собівартість. Також потрібен потужний електродвигун (з регульованою частотою обертів), система натягування (гідравлічна чи механічна) і спеціалізовані направляючі шківів. Для малих і середніх підприємств, що працюють у невеликих кар'єрах, подібні витрати можуть стати критичними й відлякувати від упровадження технології. Якщо зважити на те, що метою будь-якого підприємства є отримання економічного зиску, висока ціна обладнання та витратних матеріалів стає ключовим чинником при виборі методу різання. Хоч алмазне канатне різання з часом може показувати нижчі витрати, ніж вибухові роботи чи інші традиційні методи (через меншу втрату каменю й кращу якість одержуваних блоків), великий початковий бар'єр для інвестицій здатен стримувати поширення цієї технології.

Обмежений термін служби каната зумовлений безперервним тертям каната об породу. Великі навантаження виникають під час різання твердих порід (наприклад, граніт або базальт), де швидкість зносу алмазних намистин суттєво

вища. Наявність кварцу та інших абразивних мінералів у породі також пришвидшує зношення. Недостатньо точне налаштування натягу здатне спричинити вібрації та перевантаження каната, що провокує швидке виходження намистин із ладу або розшаровування троса. Якщо знос відбувається нерівномірно, навіть частково придатні намистини не рятують ситуацію, бо канат у цілому стає малоефективним. Погіршують справу різні зовнішні чинники: коливання температур, нерівності у породі, наявність розломів та твердих включень. Регулярна заміна або реставрація каната безпосередньо впливає на виробничі плани та бюджети. Часті зупинки для обслуговування й заміни компонентів зменшують загальну продуктивність кар'єру і збільшують витрати.

Постійний контроль та обслуговування є критично важливими через технологічну складність процесу. Алмазне канатне різання вимагає точних налаштувань швидкості обертання каната, оптимальної сили натяжки й належного охолодження. Будь-які відхилення від технологічного режиму можуть спричинити перегрів, передчасне зношення каната або погіршення якості різку. Також необхідно мати кваліфікований персонал, який умітиме правильно експлуатувати обладнання та оперативно усувати несправності. За умов дефіциту кадрів або швидкої плинності персоналу це виявляється суттєвою перешкодою. Неправильне встановлення або використання неякісних компонентів підвищує імовірність поломок, а кожна несправність означає тимчасову зупинку виробництва та ремонт, що знижує загальну ефективність. Постійний контроль процесу гарантує збереження обладнання й високу якість різку, проте вимоги до навченого персоналу та супутніх витрат можуть бути значними.

Процес алмазного канатного різання відзначається підвищеною енергозатратністю. Для забезпечення необхідної швидкості та крутного моменту двигуни мають бути досить потужними, особливо коли різання ведеться у твердих породах. Короткочасне відключення електроенергії чи нестабільність у мережі ускладнює виробничі цикли й може призвести до додаткових ушкоджень

каната. Крім того, електроенергія потрібна для роботи системи натяжки, гідравлічних або електромеханічних приводів і насосів, що подають воду. У регіонах із високими тарифами чи нестабільною подачею електрики ця складова собівартості стає вирішальною.

Технологія потребує великого обсягу води, яка відповідає за охолодження та придушення пилу. У посушливих районах або там, де вода коштує дуже дорого, цей момент стає серйозною проблемою. Неможливо зменшити нагрівання каната без належної кількості охолоджувальної рідини, що призводить до підвищення ризику пошкодження алмазів та металевої зв'язки. Додаткові витрати пов'язані з організацією водопостачання, очищенням і рециркуляцією забрудненої води, оскільки для цього потрібні відстійники та фільтраційні системи. Сучасні підходи передбачають рециркуляцію, проте це вимагає інвестицій у відповідне обладнання та його подальше обслуговування.

Вплив на довкілля проявляється у вигляді шламу (суміш кам'яного пилу з водою), який накопичується під час різання та потребує спеціальної утилізації. За неналежного поводження можливе забруднення ґрунтів і водойм. Деякі добавки, що вводять у воду для покращення охолодження чи зменшення корозії, можуть бути небезпечними для екосистем. Також споживання електроенергії збільшує вуглецевий слід, особливо якщо електроенергія виробляється традиційними тепловими станціями. Щоб зменшити ці впливи, виробники вдосконалюють рециркуляційні системи й звертаються до «чистих» джерел енергії (сонячні батареї, вітрові установки), але це потребує додаткових інвестицій.

Постійні та високі механічні навантаження здатні призвести до обриву каната, що є небезпечним для операторів, оскільки розрив може супроводжуватися сильним «хльостанням» і розлітанням уламків. Неправильне встановлення напрямних роликів, зіткнення з особливо твердими ділянками породи, різкі перепади напруги – усе це підвищує ризик деформації та розриву троса. У разі такої аварії потрібно припинити роботу, замінювати канат і перевіряти обладнання, що збільшує простой та знижує ефективність

виробництва. Безпека є надзвичайно важливою, тому операторам потрібен якісний захист, ретельна діагностика та дотримання всіх регламентів.

Використання алмазного каната може бути ускладненим у складних кар'єрних умовах, зокрема за нерівної або надмірно твердої структури породи, а також під час підземного видобутку. Монтаж обладнання може потребувати додаткових підготовчих робіт – прокладання каналів для протягування каната, встановлення спеціальних платформ і шківів. Якщо геологічні умови ускладнюють цей процес, витрати на адаптацію можуть перевищити очікуваний зиск. У таких ситуаціях керівники підприємств можуть схилитися до інших методів видобутку, що простіші з погляду обладнання або менш залежні від великих початкових інвестицій [3–7].

Подальші удосконалення цієї технології здебільшого пов'язані з інноваціями у матеріалах (поліпшення якості синтетичних алмазів і зв'язок), автоматизацією (цифрові системи для точного контролю натягу та швидкості каната, рівня споживання води та електроенергії), покращенням екологічності (системи рециркуляції та утилізації шламу) та підвищенням енергоефективності (застосування більш економічних двигунів, перетворювачів частоти, «чистих» джерел енергії). Алмазне канатне різання, попри всі його недоліки, залишається одним із найперспективніших методів видобутку блоків натурального каменю завдяки високій точності, рівним поверхням різу та меншим втратам матеріалу. Для успішного впровадження потрібні суттєві інвестиції, ретельне планування, наявність кваліфікованих фахівців та сучасні системи моніторингу й управління процесом. Лише комплексний підхід дає змогу отримати максимальні переваги від цього методу та знизити вплив перерахованих факторів.

1.2. Технологічна та економічна еволюція використання алмазного тросу в кар'єрах для видобутку граніту

Алмазні інструменти відіграють ключову роль у багатьох галузях, особливо в обробці природного каменю та будівництві. Їхній успіх пов'язаний із

постійним розвитком алмазних абразивних матеріалів та методів закріплення алмазів у ріжучі елементи інструментів. Технологія алмазних інструментів бере початок ще у 1751 році, коли Дені Дідро вперше описав алмазне свердло [1]. У 1854 році Герман отримав патент на одноточкові алмазні інструменти для обробки каменю, що стало важливою віхою у розвитку цього напрямку.

Одним із перших значних досягнень став алмазний круглопилковий диск, розроблений Фромгольтом [8] у 1885 році, який згодом був удосконалений Жакеном. На ранньому етапі використовувалися природні алмази з полікристалічною структурою, які вручну встановлювали на ріжучі елементи інструментів. Інструменти того часу мали спеціальні сталеві диски з гніздами, в які поміщали округлі алмази масою до 0,8 карата. Високоточний процес кріплення алмазів включав мідні щелепи, через які пропускали електричний струм, щоб на кілька секунд розм'якшити сталь і забезпечити надійне закріплення алмазу [9].

У 1930-х роках, коли інструменти, що використовували природні алмази, стикалися з проблемами швидкого зносу та втрати алмазів, це спонукало до розвитку нових технологій для підвищення їхньої ефективності. Зокрема, було розроблено технологію металевих порошкових матриць, яка використовувала природні алмази промислового класу, змішані з бронзовими порошками. Ця суміш формувалася у необхідні сегменти за допомогою холодного пресування, а потім сегменти спікали під тиском при високих температурах. Така технологія дозволяла надійно закріпити алмази на ріжучих елементах інструментів.

Особлива увага приділялася тому, щоб уникнути графітизації алмазу – процесу, що відбувається при температурі понад 900 градусів Цельсія в присутності кисню. Для цього використовувалася інертна або кисеньвідновлювальна атмосфера під час спікання. Ця технологія значно підвищила міцність алмазних інструментів та їхню довговічність [10].

Дослідження механізмів різання показали, що зняття меншого об'єму матеріалу за кожен прохід, але з вищою швидкістю, дозволяє досягти більшої ефективності та отримати якіснішу поверхню, ніж при глибоких різках. Це

вказувало на те, що точні, але швидкі різи стали більш продуктивними у порівнянні з більш агресивними, але повільнішими методами.

Ще одним важливим відкриттям того часу стало розуміння, що алмаз – це просто одна з форм вуглецю. Це призвело до численних спроб синтезувати алмаз із вуглецю. Проте ранні експерименти, які проводилися наприкінці 1800-х – на початку 1900-х років, не мали успіху [11]. Лише у 1938 році Россіні та Джессап змогли теоретично розрахувати рівновагу тиску та температури для перетворення графіту в алмаз за температури до 1300 градусів Цельсія. Враховуючи коефіцієнт теплового розширення алмазу, Бермін і Саймон [12–15] встановили, що умови для утворення алмазу найкраще досягаються при температурах понад 1200 К (рис. 1.2).

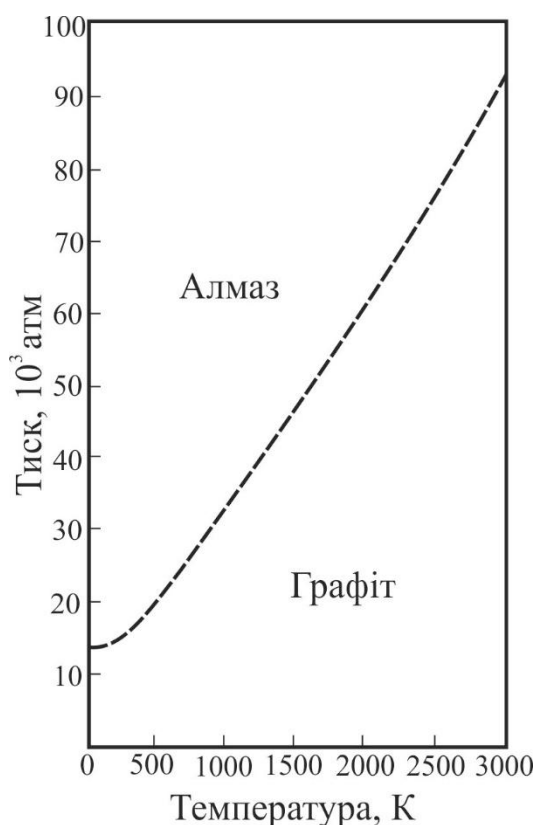


Рис. 1.2. Діаграма тиску і температури рівноваги алмаз-графіт

Технологія синтезу алмазів, описана в тексті, стала важливим досягненням у розвитку сучасних інструментів. Лейпунський [16] запропонував, що утворення алмазу з графіту у твердому стані можливе при температурі щонайменше 2000 К і тиску близько 6000 МПа. Проте використання розчинників для вуглецю дозволяє знизити ці параметри. Оскільки вуглець добре розчиняється в багатьох металах, зокрема в залізі, при підвищенні температури, його розчинність в залізі досягає приблизно 9 % при 2200 °С. Під час охолодження розчину вуглець осідає як графіт при низькому тиску і як алмаз при високому тиску.

Піонером у цій галузі став Персі Бріджмен [17], який у 1946 році створив високотискові апарати, що дозволяли досягти умов для синтезу алмазу. Його дослідження та експерименти, опубліковані у 1955 році, показали, що алмаз може бути синтезований повторно за певних умов. Подальші дослідження, проведені Банді [18] у 1963 році, дозволили детальніше вивчити температуру плавлення графіту в залежності від тиску. Ці дані були підтверджені пізнішими дослідженнями Фатєєвої та Верещагіна.

Комерційне виробництво синтетичних алмазів розпочалося наприкінці 1950-х років. Це сприяло значному покращенню терміну служби алмазних інструментів. Завдяки вдосконаленню технологій стало можливим інженерне управління властивостями алмазних кристалів, такими як розмір, форма та міцність, що дозволило створювати інструменти з покращеними характеристиками [19]. Ці технології стали основою для сучасної промисловості, де синтетичні алмази широко використовуються для різання, шліфування та інших завдань.

Видобуток вапнякових порід, таких як мармур, для декоративних цілей традиційно здійснювався за допомогою різання або контрольованого розколу, оскільки вибухові методи викликають серйозні пошкодження матеріалу через утворення тріщин. Один із методів, який широко застосовувався в кар'єрах, був спіральне різання канатом. Ця система використовувала сталевий спіральний канат, який приводився в дію через шківи, і абразивні матеріали, такі як

кремнеземний пісок або сталевий дроб, що постійно подавалися в зону різу. Проте цей метод мав свої недоліки: кабель швидко зношувався, часто потребував заміни, а використаний абразив важко було утилізувати або повторно використовувати.

Успіх алмазних інструментів у різанні природного каменю привів до досліджень можливості використання алмазного канату як заміни спіральної системи. Зокрема, компанія Impregnated Diamond Products між 1955 і 1957 роками проводила дослідницький проект для тестування цієї технології, але безуспішно. Пізніше, у 1968 році, Проуз [20–21] із британської компанії Triefus розпочав експериментальні роботи в кар'єрах мармуру в Каррарі, Італія. Він використовував сталевий канат, на який поперемінно чередували алмазні намистини та розділювачі. Алмазні намистини складалися зі сталевих трубок, покритих нікелем для утримання алмазів. Результати цих експериментів виявилися багатообіцяючими.

Після цього інші компанії, які займалися виробництвом алмазних інструментів, також розпочали дослідження різання алмазним канатом. Було проведено багато польових випробувань, під час яких тестували різні способи розміщення алмазних намистин на канаті. Було випробувано кілька варіантів конструкцій:

- вільні гумові втулки між намистинами,
- шплінти для фіксації намистин на місці,
- пружини між намистинами та шплінти для їх закріплення,
- пружини та обжимки, які також фіксували намистини.

Ця технологія різання алмазним канатом стала революційною в кар'єрній промисловості, дозволяючи отримувати чисті та точні розрізи без пошкодження матеріалу. Її впровадження значно підвищило ефективність і якість видобутку декоративного каменю.

Різання алмазним канатом стало важливою інновацією у видобутку мармуру та інших природних каменів. Однією з ключових проблем, яку вирішували під час розробки цієї технології, були часті розриви канату. Однак

після численних випробувань різних конструкцій канатів та усунення проблем із поломками, з 1978 року різання алмазним канатом поступово стало широко використовуватися в мармурових кар'єрах. Оцінки показали, що ця технологія забезпечує значні економічні вигоди порівняно зі спіральними системами, які використовувалися раніше [22].

Виробники алмазного канату з часом стандартизували конструкцію. Алмазні намистини зазвичай мають довжину близько 6 мм і зовнішній діаметр приблизно 10 мм, нанизуються на канат діаметром близько 5 мм. Для обробки мармуру використовують близько тридцяти таких намистин на кожен метр канату. Ця комбінація забезпечує ефективне різання, високу швидкість роботи та значно знижує витрати на матеріали та технічне обслуговування.

Впровадження алмазного канату стало важливим етапом в розвитку технологій видобутку каменю, дозволяючи зменшити знос обладнання, покращити якість різу та оптимізувати виробничі процеси.

Технологія різання канатом спочатку не розглядалася для видобутку міцних гірських порід, таких як граніт, через їх високу твердість та абразивність. У видобутку таких матеріалів традиційно використовували інші методи. Для початкової операції відділення кам'яних блоків від родовища широко застосовували термічне різання, яке працює на основі локального нагрівання та відшарування породи, а також вибухові методи, такі як контрольовані вибухи. Вибухи разом зі свердлінням продовжують використовувати для зменшення великих кам'яних блоків до менших розмірів. В окремих кар'єрах перевагу віддавали слотовому бурінню, яке полягало у створенні прорізів через буріння серії перекриваючих отворів. Проте цей метод створював набагато ширші розрізи, а також разом із іншими методами, такими як термічне різання та вибухи, призводив до пошкодження матеріалу поза розрізом, що викликало значні втрати придатного для продажу каменю.

Успіх алмазного канату в мармурових кар'єрах дав поштовх для досліджень його використання в різанні кременистих порід. Однак під час різання таких матеріалів, зокрема граніту з високим вмістом кварцу, система з

вільними розділювачами виявилася неефективною через швидке абразивне зношування між алмазними намистинами та канатом. Це вимагало подальших удосконалень технології для успішного різання більш твердих порід.

Завдяки дослідженням і адаптації технології, алмазний канат сьогодні активно застосовується для різання навіть найтвердіших і найабразивніших матеріалів, таких як граніт, що дозволяє досягати високої ефективності та точності в процесі видобутку.

Швидкий знос алмазних намистин, виготовлених методом електроосадження, став викликом для виробників інструментів для різання каменю. Цю проблему вдалося вирішити завдяки розробці нової технології виготовлення намистин, заснованої на спіканні алмазної матриці. Ця технологія подібна до тієї, що використовується для виробництва алмазних бурових коронок і пиляльних дисків, і забезпечує значно більшу зносостійкість намистин.

В процесі виготовлення алмазних намистин для канатної пилки використовують матрицю зі змішаних алмазних частинок та металевого порошку. Ця суміш спікається шляхом гарячого пресування на сталеву втулку, утворюючи готову намистину. Перші випробування такої технології проводилися приблизно в середині 1980-х років на гранітних кар'єрах. Результати виявилися успішними, зокрема при різанні кременистих матеріалів.

Виробники алмазних інструментів з'ясували, що для більшості кар'єрних робіт оптимальний розмір спечених алмазних намистин відповідає розмірам електроосаджуваних намистин, які використовуються для видобутку мармуру. Ці намистини мають зовнішній діаметр від 10 до 12 мм, довжину близько 7 мм і нанижуються на канат діаметром від 5 до 6 мм. Такі характеристики забезпечують ефективне і довговічне різання каменю, що значно поліпшує продуктивність процесу видобутку.

Алмазний канат поступово удосконалювався, що призвело до значного покращення його загальної ефективності. Швидкість різання та термін служби інструменту були збільшені завдяки розробці нових спечених намистин, що використовуються для різання конкретних матеріалів. При цьому важливу роль

відіграє вибір відповідного алмазного продукту та металевого зв'язувального компонента для досягнення бажаного балансу зносу.

Алмазні канати зі спеченими намистинами здобули широку популярність у різанні кременистих порід, а різання канатом стало пріоритетним методом первинного видобутку для матеріалів із дрібнодисперсними мінеральними включеннями, таких як габро. Така технологія особливо вигідна в умовах, де важливим є високий вихід матеріалу з кар'єру, оскільки алмазне різання забезпечує отримання плоских і гладких поверхонь із мінімальними втратами матеріалу на великих площах. Це дозволяє досягти максимальної ефективності та економічної вигоди при видобутку каменю, що робить алмазний канат одним із найефективніших інструментів для різання природних кам'яних матеріалів.

1.3. Оцінка впливу властивостей каменю на продуктивність алмазного інструменту

Алмазні інструменти зі спеченими алмазними сегментами широко застосовуються для різання та свердління природного каменю в будівництві та гірничій справі. Інструменти, призначені для обробки облицювального каменю, класифікуються за їхнім складом на такі основні групи:

Силікатні породи – охоплюють три категорії: основні породи з вмістом кремнезему 45–52 % (наприклад, габро, базальт), проміжні породи з 52–66 % кремнезему (наприклад, сієніт) і кислі породи, які містять понад 66 % кремнезему, зокрема граніт.

Карбонатні породи – характеризуються значним вмістом карбонату кальцію й поділяються на метаморфічні відкладення (наприклад, мармур) і осадові утворення (наприклад, травертин).

Оскільки ефективність алмазного інструменту значною мірою залежить від типу оброблюваного матеріалу, дослідники намагалися визначити властивості гірських порід, які впливають на їхню оброблюваність і, відповідно, на довговічність інструменту.

Дослідження, спрямовані на розробку індексів оброблюваності кам'яних матеріалів, що використовуються у процесах свердління та різання, враховували специфічні особливості кожного з цих методів.

У ході аналізу ефективності бурових коронок під час роботи з різними типами порід були вивчені властивості матеріалів, що визначають їхню здатність до проникнення та різання.

Зусилля щодо визначення індексу свердлильної здатності ґрунтувалися на оцінці швидкості проникнення в конкретний тип гірської породи при застосуванні певної свердлильної системи.

У своїх дослідженнях швидкості проникнення вісім різних типів порід Raone та Bruce [23] стверджували, що існує залежність між швидкістю проникнення алмазної бурової коронки та міцністю породи при бурінні, яка в першому наближенні корелює з її міцністю на стиск.

Досліджуючи взаємозв'язок між свердлильною здатністю та фізичними характеристиками порід, такими як твердість, питоме руйнування (об'єм породи, що руйнується при витраті одиниці енергії), модуль Юнга та швидкість звуку, Gstalder і Raynal [24] дійшли висновку, що свердлильна здатність не може бути визначена абсолютно за допомогою однієї величини або виміряна одним тестом.

Однак твердість породи, яку можна визначити механічними методами або на основі вимірювань швидкості звуку, є корисним параметром для прогнозування ефективності буріння, якщо також враховувати тип бурової коронки та використовувані параметри буріння.

З'ясовано, що глибина борозен, утворених на зразках гірських порід, корелює з ефективністю буріння, що дозволило зробити висновок про придатність цього методу для оцінки свердлильної здатності порід.

Крім того, рівень зношування алмазного випробувального стержня можна визначити за зменшенням його маси після тестування, що дає змогу оцінити абразивність зразка породи.

Cassapi, Ambrose та Waller [25] дослідили ефективність двох конструкцій бурових коронок при роботі зі шведським гранітом і пісковиком. Дослідження показало, що концентрація алмазів впливає на продуктивність буріння.

Швидкість проникнення бурових коронок значною мірою залежала від твердості та фізичної міцності каменю, тоді як абразивність породи впливала на ефективність різання через зношування зв'язуючої матриці. Ступінь зносу матриці, у свою чергу, визначав швидкість оголення нових алмазних зерен, що впливало на загальну продуктивність інструменту.

Було проведено низку випробувань для визначення властивостей каменю, що впливають на продуктивність алмазних дискових пил. Основною метою було розроблення практичного тесту, який би дозволив прогнозувати зношування алмазних сегментів при розпилюванні певного кам'яного зразка та класифікувати породи за їхньою здатністю до різання (sawability).

Coreman та Ford [26] дійшли висновку, що петрографічний аналіз зразків каменю не дає достатньої інформації щодо його здатності до розпилювання. Водночас вони припустили, що мінералогічні фактори, зокрема вміст вільного кварцу, можуть мати суттєвий вплив.

Burgess [27] визначав здатність каменю до розпилювання через термін служби пиляльного диска при постійній швидкості різання для різних типів порід. Було зроблено спробу встановити взаємозв'язок між зношуванням сегментів дискової пили та властивостями оброблюваного матеріалу. Для цього проводилися випробування з розпилювання декількох видів граніту, фізико-механічні характеристики яких були заздалегідь визначені.

Для вимірювання твердості зразків використовувався шклероскоп Шора, а для оцінки зносостійкості розробили спеціальний тест, що вимірював легкість видалення поверхневого шару каменю за допомогою сухого обертового круга з вільним абразивом. На основі отриманих результатів тестів було виведено напівемпіричну залежність, що дозволила класифікувати камені за їхньою здатністю до розпилювання.

Wright та Cassapi [28] проводили випробування дискових пил на різних типах каменю та аналізували механічні властивості зразків, використовуючи шклероскоп Шора, конусний тест на твердість Національної вугільної ради Великої Британії (National Coal Board, UK), тест на абразивність Carchar, а також випробування на міцність при розтягуванні та стисканні. Проте значущої кореляції між цими параметрами виявлено не було.

Для подальшої оцінки здатності каменю до розпилювання Райт і Кассапі створили випробувальний стенд для дискових пил із датчиками навантаження, що вимірювали вертикальні та тангенціальні сили, що виникають у процесі розпилювання. Було встановлено прямий зв'язок між виміряними силами різання та питомим зношуванням диска для різних матеріалів.

На основі цих висновків вони розробили мініатюрний апарат для тестування дискових пил, що використовує диск із алмазним напиленням на ободі. Ця установка дозволяла проводити високоточні вимірювання крутного моменту, навантажень і швидкості обертання пили. Було виявлено досить точну кореляцію між нормальними силами різання або роботою, витраченою на видалення матеріалу (визначеною як площа під графіком потужність-час у ватах на секунду), та зношуванням лез пили для різних типів каменю. Це забезпечило метод для прогнозування зношування алмазних сегментів залежно від здатності каменю до розпилювання.

Після встановлення того факту, що тестова машина Carchar є недостатньо точною для вимірювання абразивності різних каменів у межах однієї групи, Wright [29] розробив модифікований прилад для випробування абразивності, заснований на принципі Carchar-тесту.

Основна відмінність нового методу полягала у використанні збільшеного бронзового стилуса, який переміщувався по поверхні зразка каменю.

Було виявлено хорошу кореляцію між значеннями абразивності, отриманими за допомогою вимірювання площі зносу стилуса (у мм^2), та терміном служби ріжучих дисків для випробуваних зразків каменю.

Висновки до розділу 1

1. Порівняльний аналіз технологій видобутку блочного каменю показав, що алмазне канатне різання забезпечує найбільш точний та економічно вигідний спосіб отримання комерційних блоків завдяки мінімізації відходів і покращенню якості видобутого матеріалу. Зокрема, втрати каменю при алмазному різанні становлять лише 5–10 %, тоді як при вибухових методах втрати можуть перевищувати 30 %.

2. Алмазне канатне різання значно зменшує рівень пошкодження породи порівняно з традиційними вибуховими методами, що пояснюється відсутністю ударних хвиль і мікротріщин у структурі каменю. Це дозволяє підвищити вихід якісних блоків на 15–20 %, що безпосередньо впливає на економічну ефективність видобутку.

3. Еволюція технології алмазного канатного різання показала зростання продуктивності при зниженні експлуатаційних витрат. Якщо в 1980-х роках термін служби каната становив у середньому 15–20 м²/м, то сучасні гумові троси досягають 40–50 м²/м, що зменшує потребу в заміні витратних матеріалів на 50 %.

4. Впровадження синтетичних алмазів у виробництво ріжучих намистин дозволило покращити довговічність та швидкість різання. Новітні спечені алмазні намистини забезпечують на 30–40 % більшу швидкість різання порівняно з електроосадженими намистинами, що знижує загальний час операції та витрати електроенергії.

5. Алмазне канатне різання є більш енергоефективним у порівнянні з іншими методами видобутку блочного каменю, оскільки дозволяє зменшити витрати електроенергії на 20–25 % завдяки оптимізації швидкості руху каната та впровадженню інверторних систем управління двигунами.

6. Залежність продуктивності алмазного каната від типу породи вказує на необхідність адаптації матеріалів ріжучих намистин. Наприклад, при видобутку граніту продуктивність стандартного алмазного каната може бути на

40 % нижчою, ніж при роботі з мармуром, що пояснюється більшою твердістю і абразивністю породи.

7. Порівняння видобувних технологій у кар'єрах різних типів підтвердило, що використання алмазного канатного різання в підземних розробках підвищує ефективність робіт на 35–50 % за рахунок точного контролю напрямку різу та мінімізації впливу на навколишнє середовище.

8. Аналіз собівартості видобутку показав, що незважаючи на вищу початкову вартість обладнання, довгострокові витрати на алмазне канатне різання є нижчими на 10–15 % у порівнянні з традиційними методами, що забезпечується зменшенням втрат матеріалу, скороченням потреби в ремонті техніки та підвищенням швидкості операцій.

Розділ 2

ВПЛИВ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ РОБОТИ АЛМАЗНОГО КАНАТА

2.1. Механічний аналіз динаміки алмазного канатного троса у процесі різання природного каменю

Згідно з моделлю (рис. 2.1), алмазна намистина постійно стикається зі стінкою пропилу в гірській породі протягом усього процесу різання. Ці удари відбуваються випадковим чином щодо часу та положення, але насамперед впливають на радіальний рух алмазного троса. Ударні навантаження мають істотний вплив на зношування алмазних намистин і загальну ефективність різання.

Постійні удари спричиняють відрив і руйнування алмазних абразивних зерен, які вбудовані в основу намистини. Це призводить до зниження кількості активних ріжучих частинок на поверхні намистини, що знижує її продуктивність. Втрата абразивних зерен і пошкодження основи намистини скорочують загальний термін експлуатації алмазного канатного троса. Частота ударів визначає рівень зношування, роблячи процес залежним від періодичних впливів.

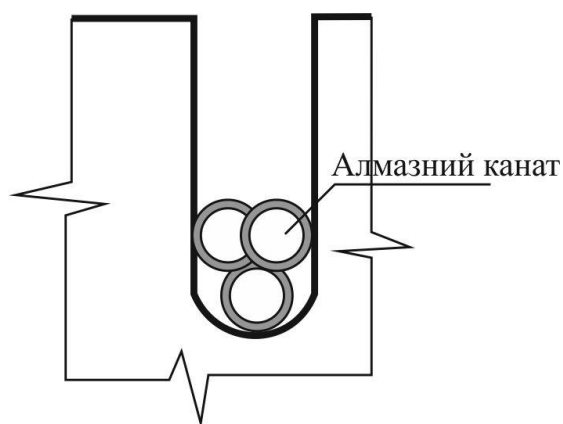


Рис. 2.1. Позиція алмазного канату в пропилі, під час різання

Окремі намистини мають невелику масу, яка для спрощення моделі та інших сил у перехідному стані вважається незначною. У разі удару передбачається, що намистина та трос із намистинами вирівнюються на досить малій довжині. Припускається, що довжина цього намистинного троса дорівнює l .

У початковому стані намистинний трос рухається зі швидкістю v в осьовому напрямку. Коли ліва сторона намистини миттєво стикається зі стінкою, швидкість руху не може змінитися миттєво, і виникає прискорення. У цей момент проводиться аналіз сил, що діють на намистину, і проєкція на вісь намистини дозволяє скласти рівняння:

$$F_n = (F + f) - F_{уд},$$

де F_n – сила натягу намистинного троса з лівого боку намистини;

f – сила тертя стінки трубки по зовнішній поверхні намистинного троса, її значення відносно невелике порівняно з іншими силами, тому її ігнорують;

$F_{уд}$ – взаємна ударна сила між намистиною і стінкою трубки.

Тоді напруження у намистинному тросі до моменту удару можна записати як:

$$\sigma = \frac{F_n}{A} \approx \frac{F}{A},$$

де σ – напруження у тросі;

A – площа поперечного перерізу в радіальному напрямку алмазної намистини.

У момент удару напруження σ' , яке діє на одну намистину, можна поділити на дві складові:

- Напруження σ , яке виникає від сили натягу F_n .
- Ударне напруження σ_h , яке викликане ударною силою $F_{уд}$.

Формула виглядає наступним чином:

$$\sigma' = \sigma + \sigma_{\text{уд}} = \sigma + \frac{F_{\text{уд}}}{A},$$

де : σ' – загальне миттєве напруження на намистині у момент удару;

σ – напруження, спричинене силою натягу $F_{\text{н}}$;

$\sigma_{\text{уд}}$ – ударне напруження, спричинене ударною силою $F_{\text{уд}}$;

$F_{\text{уд}}$ – ударна сила між намистиною і стінкою трубки;

A – площа поперечного перерізу намистини.

На основі аналізу руху окремої алмазної намистини та з урахуванням процесу різання однорідного граніту за допомогою алмазної канатної пилки, використовувався модуль явної динаміки (Explicit Dynamics) у програмному середовищі Ansys Workbench (рис. 2.2) для моделювання ударного ефекту, який виникає при різанні одношарової трубки намистинним тросом.

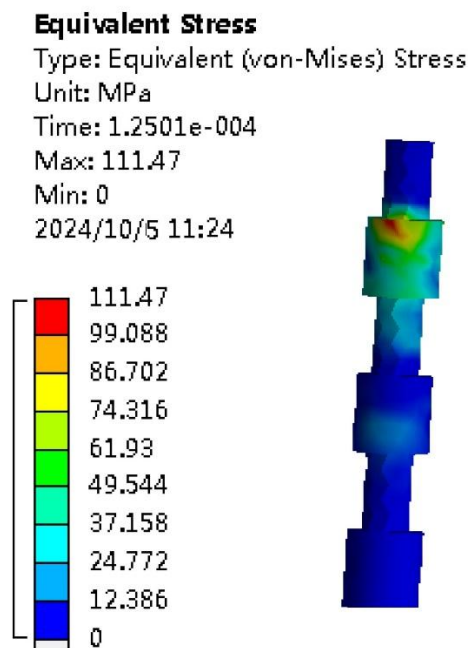


Рис. 2.2. Діаграма напружень

З рис. 2.2 видно, що коли алмазний трос рухається з заданою швидкістю, його початкове напруження є невеликим. Однак, коли трос стикається зі стінкою пропилу, додаткове напруження досягає максимального значення. Максимальне значення напруження зростає зі збільшенням швидкості руху троса канатної

пилки. Після удару напруження на тросі швидко зменшується і досягає стабільного рівня.

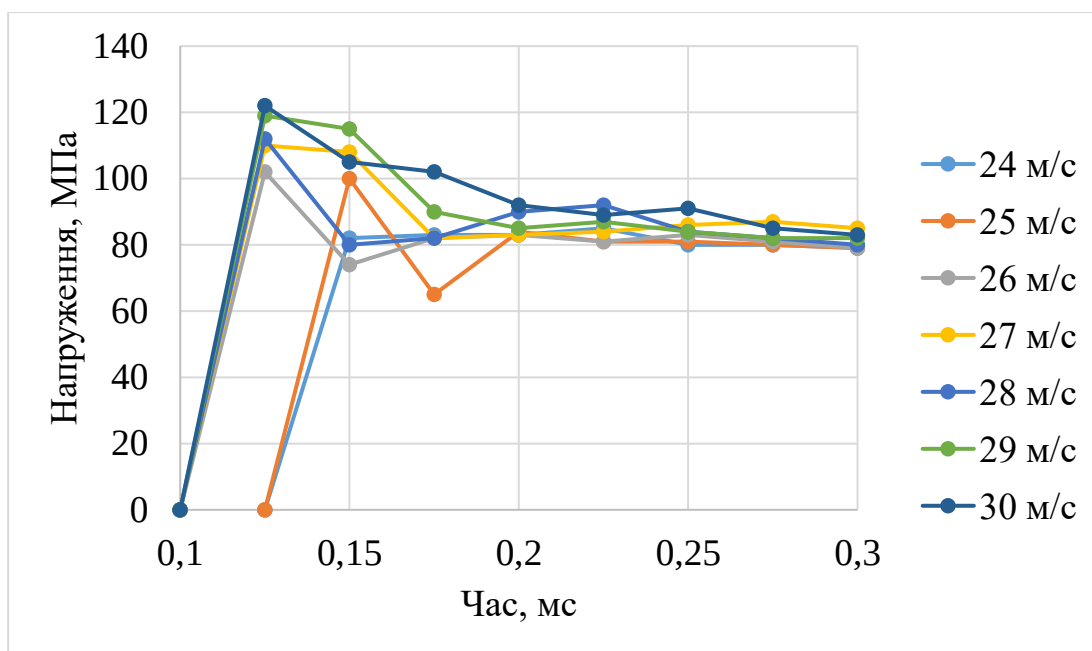


Рис. 2.3. Діаграми напружень на контактї алмазної намистини та природного каменю у різні моменти часу

На рис. 2.3 зображено динаміку контактних напружень між алмазною намистиною та природним каменем упродовж короткого часового інтервалу (0,1–0,3 мс) за різних швидкостей руху (24–30 м/с).

На відрізку часу 0,1 мс усі криві стартують із практично нульових значень, потім різко зростають і досягають максимуму в районі 0,15 мс (залежно від швидкості пік перевищує 100 МПа, а подекуди сягає 120 МПа). Далі, зростання змінюється помітним спадом, після чого напруження виходить на приблизно стабільний рівень у межах 80–90 МПа. Найвище пікове значення зазвичай відповідає вищим швидкостям (28, 29, 30 м/с), що свідчить про сильніший ударний вплив у момент контакту. Водночас, коли швидкість нижча (24–25 м/с), максимальний пік дещо менший, а саме зниження після нього може бути різкішим (як видно в кривій для 25 м/с). У часовому проміжку від 0,2 до 0,3 мс відмінності між кривими поступово нівелюються, і всі швидкості демонструють дуже схожі значення напружень. Отже, діаграма наочно підтверджує, що зі

зростанням швидкості різання збільшується і пікове напруження на контакті, проте наприкінці розглянутого інтервалу (близько 0,3 мс) значення для різних швидкостей практично вирівнюються.

При моделюванні було отримано залежність (рис. 2.4) між максимальною напругою (МПа) на контакті алмазного канату і природного каменю та лінійною швидкістю різання (м/с) .

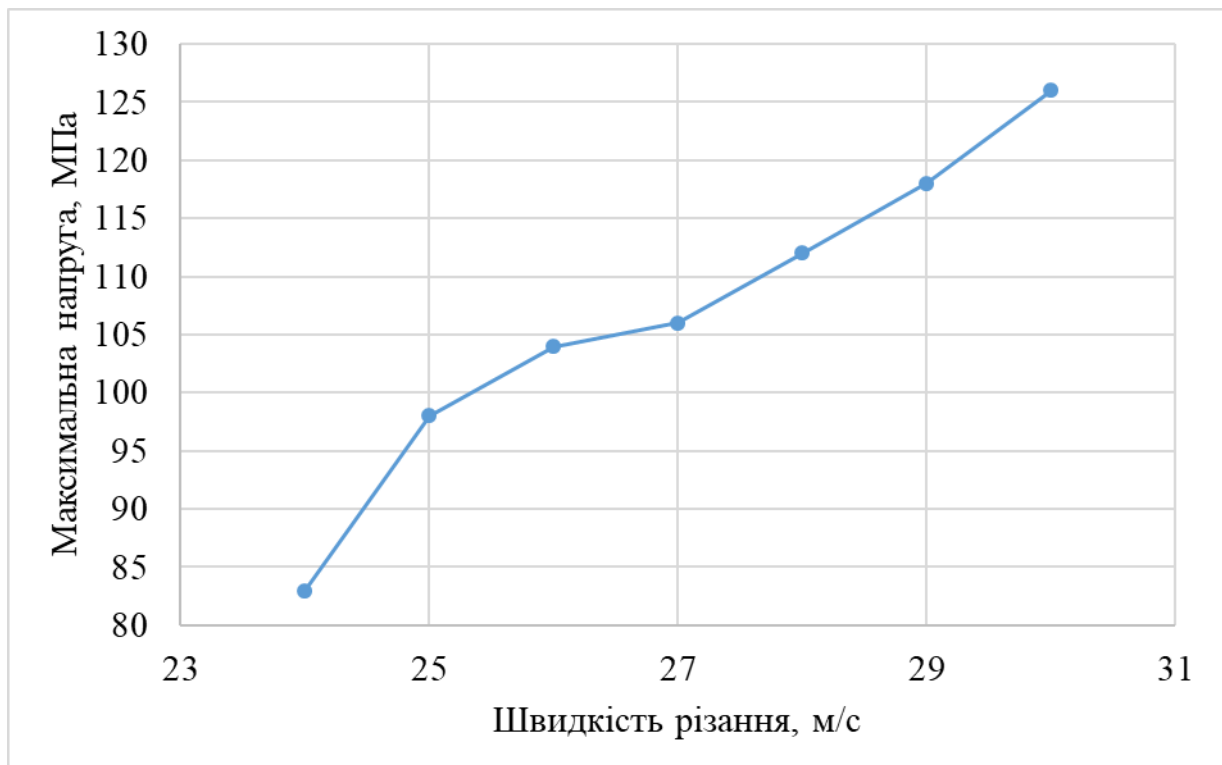


Рис. 2.4. Максимальне напруження на контакті алмазного канату і природного каменю при різних лінійних швидкостях

На графіку представлено залежність між максимальною напругою (МПа) на контакті алмазного канату і природного каменю та лінійною швидкістю різання (м/с). Спостерігається чітке зростання напруги зі збільшенням швидкості. У діапазоні швидкостей 24–30 м/с напруга зростає від 85 МПа до 126 МПа. Це свідчить про те, що збільшення швидкості різання суттєво підвищує механічний вплив на камінь. У першій частині графіка (24–25 м/с) напруга

зростає особливо швидко. Це пояснюється початковим етапом різання, коли канат і камінь вступають в активний контакт. У середньому діапазоні швидкостей (25–29 м/с) приріст напруги стає більш плавним. Це вказує на стабілізацію механічного впливу. При швидкостях 29–30 м/с напруга знову зростає помітно, досягаючи пікових значень. Така поведінка може бути наслідком тертя та підвищення температури в зоні різання. Висока напруга сприяє більш ефективному різанню, але водночас прискорює зношування алмазного канату. Для досягнення оптимальної продуктивності рекомендується використовувати середні швидкості (25–27 м/с). Високі швидкості (29–30 м/с) доцільні для максимальної ефективності роботи. Однак слід враховувати ризик пошкодження каменю через підвищену напругу. Надмірна напруга також може спричинити появу тріщин у матеріалі. Залежність показує, що кожне збільшення швидкості приблизно на 1 м/с додає від 5 до 10 МПа напруги. Це корисно для розрахунків ресурсу обладнання. Графік допомагає оптимізувати процеси різання залежно від типу матеріалу. Наприклад, для м'яких порід можна працювати на нижчих швидкостях. Дані графіка можуть бути використані для прогнозування терміну служби алмазного канату. Важливо враховувати як продуктивність, так і витрати на технічне обслуговування. Цей аналіз може бути корисним для вдосконалення промислових процесів різання. Таким чином, оптимізація швидкості різання дозволить підвищити ефективність виробництва і зменшити витрати.

Також у програмному середовищі Ansys Workbench було проведено моделювання взаємозв'язків між нормальною силою, що виникає внаслідок прикладеного навантаження, та дотичною силою, яка зумовлена різальною дією намістини. Діапазон прикладеного навантаження базувався на середньому навантаженні на одну намістину, визначеному за результатами вимірювань ефективності алмазного каната [30, 31] та лабораторних випробувань намістин [32, 33]. На рис 2.5 показано залежність цих сил, за умови що швидкість різання буде 27 м/с.

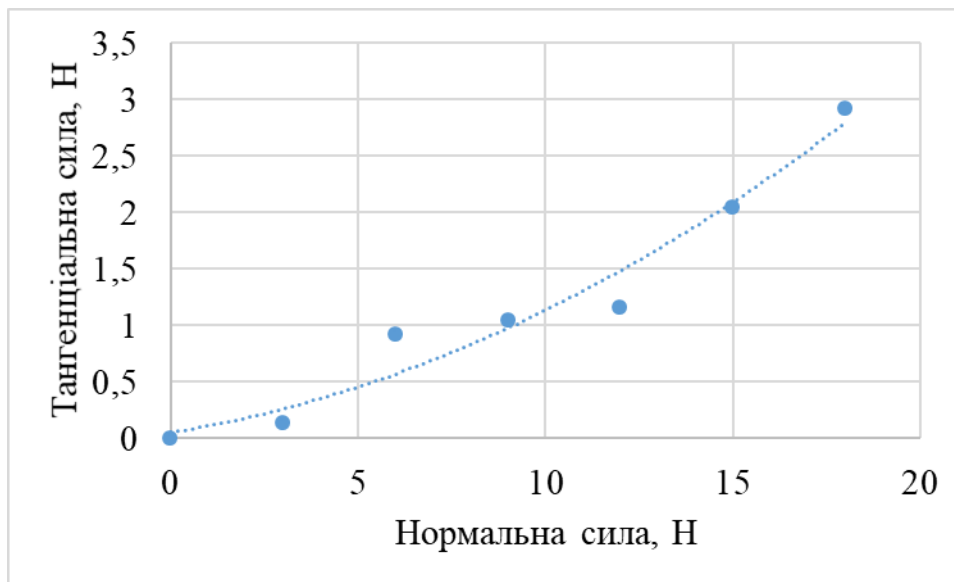


Рис. 2.5. Взаємозв'язок між нормальними та тангенціальними силами на алмазній перлині канату

Видно, що між нормальними та тангенціальними силами різання існує залежність, яка описується поліномом другого порядку.

Рис. 2.5 демонструє залежність між нормальними та тангенціальними силами на алмазній намистині канату, яка має нелінійний характер і описується поліномом другого порядку. На початкових значеннях нормальної сили тангенціальні сили зростають повільно через недостатню взаємодію алмазних зерен із пороною, у середньому діапазоні зростання стає майже лінійним, що свідчить про стабільний процес різання, а при високих значеннях нормальної сили тангенціальна сила зростає значно швидше через підвищене тертя та руйнування поверхневих зерен. Графік підтверджує, що збільшення нормального навантаження покращує ефективність різання, однак надмірні значення можуть призвести до швидкого зношення алмазних намистин, тому оптимальний режим досягається в середньому діапазоні навантажень. Визначена нелінійна закономірність вказує на складну механіку взаємодії алмазного канатного троса з пороною та є ключовою для оптимізації параметрів різання,

що дозволяє зменшити втрати матеріалу, підвищити довговічність інструменту, знизити енергоспоживання та покращити продуктивність процесу.

Дослідження показало, що ефективність алмазного канатного різання значною мірою залежить від ударних навантажень, швидкості руху каната та контактних напружень між алмазними намистинами та каменем. Аналіз механічних взаємодій підтвердив, що постійні удари та тертя суттєво впливають на зношування алмазних намистин, зменшуючи їхню ріжучу здатність та скорочуючи загальний термін експлуатації каната.

Моделювання в середовищі Ansys Workbench дозволило визначити закономірності зміни напружень під час контакту алмазного каната з гірською породою. Виявлено, що при збільшенні швидкості різання з 24 до 30 м/с максимальні контактні напруження зростають з 85 МПа до 126 МПа, що свідчить про зростання механічного навантаження на інструмент. Водночас стабільний рівень напружень після початкового ударного піку підтверджує, що процес різання проходить через фазу стабілізації механічного впливу.

Залежність між нормальними та тангенціальними силами різання має нелінійний характер, що описується поліномом другого порядку. Це свідчить про складну динаміку силових взаємодій у процесі різання, що важливо враховувати при проєктуванні оптимальних режимів роботи алмазного каната.

Отримані результати дозволяють сформулювати рекомендації щодо оптимізації параметрів різання. Для підвищення продуктивності та зменшення зношування рекомендується використовувати швидкості 25–27 м/с, оскільки вони забезпечують баланс між ефективністю різання та довговічністю канатного троса. Збільшення швидкості понад 30 м/с хоч і підвищує продуктивність, але водночас значно скорочує термін служби алмазних намистин через підвищене контактне навантаження.

Таким чином, проведений аналіз механічних характеристик алмазного канатного троса та його впливу на процес різання природного каменю дозволяє покращити ефективність технологічного процесу, зменшити втрати матеріалу та

підвищити економічну доцільність використання алмазних канатних пилок у гірничій промисловості.

2.2. Дослідження зносостійкості перлин алмазного канату

Було експериментально випробувано три алмазних канати з різними алмазними напайками. Алмазний був виготовлений у китайським виробником. Алмазні канати містити різний клас синтетичного алмазного зерна.

Використовувалося алмазне зерно розміру 40/50 за американською шкалою US mesh з концентрацією 35 % в кобальтовій зв'язці, що є типовою специфікацією матриці алмазних намистин. Вибір здійснювався на основі відносної міцності та характеристик стирання:

- SDA 100+, який є продуктом, що містить кристалічні алмазні частинки з чітко вираженими краями та кубо-октаедричною формою. Частинки демонструють добрі показники відносної міцності та термічної.

- SDA 85+ характеризується високою кристалічністю та містить кубо-октаедричної форми кристали. Цей продукт має нижчу міцність порівняно з SDA 100+ і меншу стійкість до дії високих температур.

SDA 75+ містить менше кубо-октаедричних форм, ніж два попередні продукти, але загалом частинки виявляють задовільну кристалічність.

Відносна міцність і термічна стабільність цього продукту є нижчими. Приблизна відповідність марок порошків синтетичних алмазів, вироблених ALCON-DIAMOND, маркам порошків синтетичних алмазів «ELEMENT SIX» і «DIAMOND INNOVATION» наведено в табл. 2.1.

Таблиця 2.1

Приблизна відповідність марок порошків синтетичних алмазів, вироблених ALCON-DIAMOND, маркам порошків синтетичних алмазів «ELEMENT SIX» і «DIAMOND INNOVATION»

ALCON-DIAMOND	ELEMENT SIX (Ireland)			DIAMOND INNOVATION (USA)		
AC series	SDA plus series	SDB 1000 series	PDA series	MBS 700 series	MBS 900 series	MBG+RVG series
AC 250						
		SDB 1125				
AC 200	SDA 100+		PDA 999		MBS 970	MBG680
		SDB 1100			MBS 960	
				MBS 760		
AC 160	SDA 85+	SDB 1085			MBS 955	
	SDA 75+	SDB 1075	PDA 989	MBS 740	MBS 950	MBG 660
	SDA 65+	SDB 1065		MBS 730	MBS 940	
AC 125						
	SDA 55+	SDB 1055			MBS 930	
			PDA 878			MBG 640

ALCON-DIAMOND	ELEMENT SIX (Ireland)			DIAMOND INNOVATION (USA)		
AC series	SDA plus series	SDB 1000 series	PDA series	MBS 700 series	MBS 900 series	MBG+RVG series
AC 100	SDA 45+	SDB 1045		MBS 720	MBS 920	
AC 80	SDA 25+	SDB 1025	PDA 768	MBS 710	MBS 910	
						MBG 620
AC 65			PDA 657			
AC 50			PDA 446			MBG 610
AC 32			PDA 433			

Були проведені випробування для оцінки впливу класу алмазів на зношування перлини при різних швидкостях різання. Випробування проводилися під час різання моноліту канатною пилкою. Вимірювання алмазних перлини проводилося після процесу запилювання, так як під час запилювання відбувається підвищене зношення алмазного канату об гострі краї моноліту. Кінцевий діаметр алмазного канату вимірювався під час заміни канату на більш зношений на стадії допилювання. Вимірювався час різання та площа різання алмазним канатом. Результати швидкості зношування перлини наведено на рис. 2.6. Кожну годину вимірювався діаметр канату для підрахунку втрати маси перлини канату.

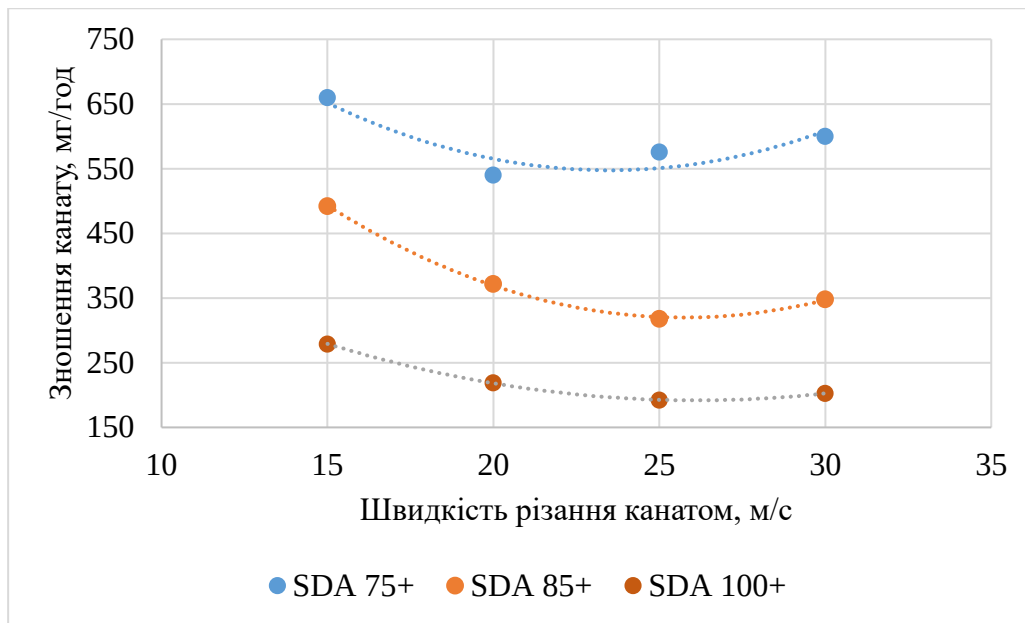


Рис. 2.6. Швидкість зношування алмазної перлини у залежності від швидкості різання

При високій швидкості різання (близько 30 м/с) перлини з SDA 100+ і SDA 85+ демонстрували менше зношування, оскільки містили алмазні частинки із розширеним зносостійким сплосненням. Це означає, що вони мали вищу стійкість до стирання навіть за високих навантажень. Алмазні перлини з SDA 75+ швидше втрачали масу та зношувалися. Це свідчить про меншу міцність і термічну стабільність цього матеріалу. З підвищенням швидкості різання інтенсивність зношування зростала, але якісніші алмази (SDA 100+, SDA 85+) витримували навантаження краще.

2.3. Оптимізація режимних параметрів алмазно-канатного різання для підвищення ефективності видобутку природного каменю

Алмазні канатні пили займають провідне місце серед сучасного обладнання для видобутку природного декоративного каменю. Незважаючи на високу якість одержуваної продукції, значна вартість процесу спонукає галузь шукати резерви підвищення ефективності та продуктивності. Зниження питомих

витрат на різання через оптимізацію технологічних режимів стає одним із пріоритетних напрямів наукових пошуків.

Аналіз літературних джерел свідчить про те, що результативність різання визначається трьома укрупненими групами чинників: властивостями гірської породи, технологічними параметрами процесу та організаційними умовами виробництва. При цьому перша група є заданою і не підлягає зміні, тоді як дві інші відкривають можливості для цілеспрямованого регулювання з метою досягнення оптимального режиму роботи.

Дослідження в галузі різання каменю дисковими інструментами розкрили ряд важливих закономірностей. Зокрема, Ертінгсгаузен [33] показав, що при малій глибині різку підйомний режим різання характеризується меншим енергоспоживанням порівняно з низхідним, що робить його раціональнішим для виконання дрібних операцій. Кахраман та співавтори [34] встановили обернену залежність між діаметром диска та швидкістю різання, що необхідно враховувати при підборі інструменту для великооб'ємних робіт. Озчелік [35] під час досліджень карбонатних порід виявив, що збільшення зернистості матеріалу диска сприяє зниженню інтенсивності зношення сегментів і подовженню ресурсу інструменту. Буюксагіс [36], досліджуючи граніт, з'ясував протилежну тенденцію: низхідний режим різання виявився енергетично вигіднішим від підйомного, що важливо для промислової економії електроенергії. Сенгун і Алтіндаг [37] підтвердили суттєвий вплив міцнісних характеристик, твердості та пористості породи на питомі енерговитрати, що є принципово важливим при плануванні технологічного процесу.

У роботі [38] за допомогою комп'ютерного моделювання досліджується вибір оптимального напрямку ведення гірничих робіт при видобутку блочного каменю. Встановлено зв'язок між анізотропією механічних властивостей, кристалічною будовою та умовами утворення породи, що дозволяє обґрунтовувати ефективніші технологічні рішення, спрямовані на підвищення виходу кондиційних блоків і збереження декоративних характеристик матеріалу для реставраційного використання.

Публікація [39] присвячена практиці застосування алмазно-канатних машин на гранітних кар'єрах України. Показано, що перехід від традиційних буропідрильних методів до алмазного різання дає змогу довести вихід товарних блоків до 80 %. Розглянуто основні схеми відокремлення кам'яних монолітів, а також проаналізовано втрати каменю, пов'язані з особливостями роботи алмазного канату.

Об'єктом дослідження є процес алмазно-канатного різання природного каменю в кар'єрних умовах, а також сукупність параметрів, що визначають його продуктивність та економічну ефективність.

Гіпотеза роботи ґрунтується на припущенні, що цілеспрямоване керування режимними параметрами – насамперед величиною струму – дозволить суттєво підвищити швидкість різання та знизити інтенсивність зношення алмазного канату, забезпечуючи стабільний і рентабельний процес видобутку.

До прийнятих припущень належить незмінність фізико-механічних властивостей каменю (твердості, текстури) протягом всього циклу експериментів, що дає можливість виокремити та кількісно оцінити внесок саме технологічних параметрів у результати різання. Відповідно до прийнятих спрощень, вплив температурних коливань не враховувався, оскільки дослідження проводилися за відносно стабільних зовнішніх умов.

Експериментальна база досліджень – алмазно-канатна машина QWS-55 [40–42], змонтована на Лезниківському блочному кар'єрі. Технічні характеристики установки: потужність головного електродвигуна – 55 кВт, швидкість переміщення канату – до 28 м/с, робоча довжина канату – від 20 до 120 м. Випробування виконувалися на монолітах різних габаритів: 6×2, 6×3, 6×6, 6×10, 6×12, 6×15 та 6×18 м (рис. 2.7).

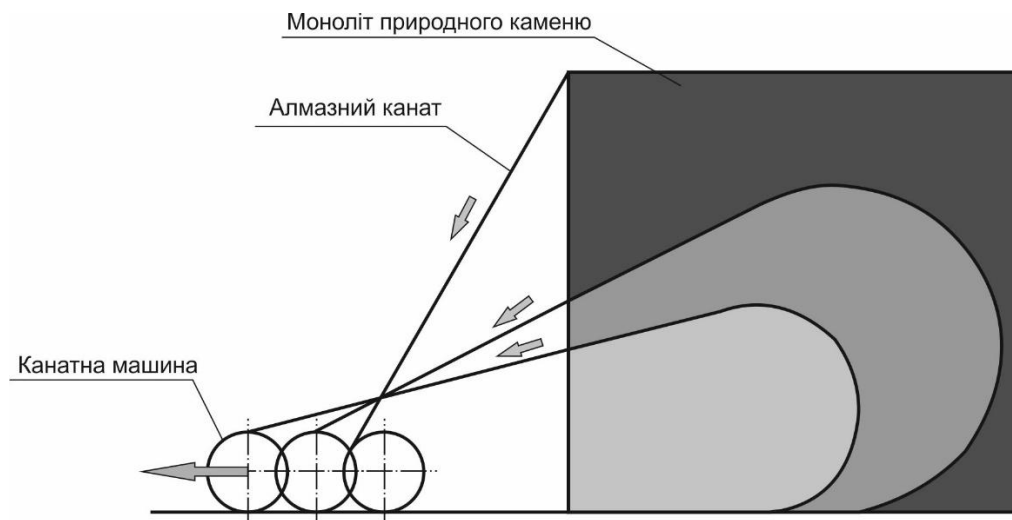


Рис. 2.7. Етапи роботи канатної машини

Для дослідження впливу сили струму на ефективність різання було обрано три значення цього параметра: 55 А, 60 А та 65 А. Усі випробування виконувалися безпосередньо у виробничих умовах кар'єру.

Підготовка алмазного канату до роботи передбачала проведення спеціальної процедури попереднього накручування, що знижує ймовірність нерівномірного зношення в процесі різання. Стабільність теплового режиму забезпечувалася системою водяного охолодження, завдяки якій запобігався перегрів канату та зменшувалась інтенсивність зносу алмазоносних елементів.

Технологія відокремлення блоків від масиву вимагає попереднього формування плоских вільних поверхонь шляхом виконання вертикальних і горизонтальних різів. Алмазний канат заводиться у заздалегідь підготовлені свердловини, після чого здійснюється власне різання за рахунок абразивної взаємодії алмазних елементів із поверхнею каменю в процесі безперервного руху канату. Напрямок площини різі задається направляючим шківом, тоді як приводний шків забезпечує тягове зусилля. Послідовність виконання операцій показана на рис. 2.7.

На початковому етапі буряться свердловини для протягування канату (рис. 2.8). Заведення канату виконується у два послідовних кроки. На першому кроці

через пробурені свердловини за допомогою стисненого повітря протягується капронова нитка, до якої прив'язаний поролоновий циліндр («мишка») діаметром, близьким до діаметра свердловини. Після виходу «мишки» з протилежного кінця до нитки приєднують тонкий допоміжний трос і протягують його тим самим шляхом. На другому кінці до допоміжного троса кріплять алмазний канат і за його допомогою заводять у свердловини.

Перед початком різання, особливо при роботі з твердими й абразивними породами, канат проходить відновлювальну підготовку. В ході різання він виконує одночасно поступальний рух уздовж вибою та обертальний навколо власної осі, що забезпечує рівномірний знос алмазозносних втулок по всьому периметру. У міру напруження пружність канату зменшується, інтенсивність обертання знижується, і виникає ризик одностороннього зносу втулок із подальшим їх передчасним руйнуванням. Для усунення цього явища перед з'єднанням кінців канату виконують його «підкручування» у напрямку звивання – як правило, від 0,5 до 2,0 витків на погонний метр залежно від конструкції канату та умов його використання.

У процесі різання робоча довжина канату, що контактує з каменем, поступово зменшується, тому машина переміщується по рейковому шляху. Рейкова система забезпечує безперервний рух без зупинок для перерегулювання натягу, що суттєво підвищує продуктивність.

До основних режимних параметрів алмазно-канатного різання природного каменю належать:

Швидкість руху канату – визначає інтенсивність різання та якість поверхні; для гранітних порід становить 28–30 м/с.

Натяг канату – забезпечує стабільність траєкторії та точність площини різку; недостатній натяг призводить до відхилень і погіршення якості.

Швидкість подачі – швидкість просування канату в масиві, що визначається твердістю породи та вимогами до якості поверхні; безпосередньо пов'язана з натягом канату та споживаною потужністю.

Охолодження – подача води в зону різання для відведення тепла та зниження інтенсивності зносу алмазних елементів.

За встановленою потужністю канатні машини умовно поділяють на три класи: малопотужні (15–20 кВт), середньої потужності (30–37 кВт) та високопотужні (50–75 кВт). На гранітних кар'єрах застосовують переважно машини третього класу потужністю 55 кВт.

У даній роботі досліджувався енергетичний параметр роботи канатної машини – сила струму головного двигуна в процесі різання. Цей показник безпосередньо визначається натягом канату, який регулюється горизонтальним переміщенням машини по рейковому шляху.

Дослідження проводилися на Лезниківському блочному кар'єрі із застосуванням машини WS55B/Xenda (рис. 2.9). Технічні характеристики установки наведено нижче:

- встановлена потужність – 59 кВт;
- потужність головного приводу – 55 кВт;
- напруга живлення – 380 В;
- номінальний струм – 113 А;
- частота струму – 50 Гц;
- кількість фаз – 3;
- діаметр шківів – 800 мм;
- швидкість руху канату – 0–40 м/с;
- робоча довжина канату – 20–120 м;
- швидкість переміщення машини – 0–32 м/год.

Дослідження проводилось на монолітах з різними розмірами, м: 6х2; 6х3; 6х6; 6х10; 6х12, 6х15, 6х18.

Результати, наведені в на рис. 2.10, отримані при трьох значеннях сили струму – 55 А, 60 А та 65 А. Розглянемо детальніше режим 55 А.

Із збільшенням площі оброблюваного моноліту продуктивність різання демонструє стійку тенденцію до зростання. Так, для моноліту розміром 6×2 м (12 м²) вона становить 2 м²/год, тоді як для моноліту 6×18 м (108 м²) досягає

2,8 м²/год, що перевищує початкове значення на 40 %. Така динаміка пояснюється тим, що при обробці великих обсягів машина працює у стабільнішому режимі: скорочується кількість технологічних зупинок і регулювань, які неминуче супроводжують різання відносно малих монолітів.



Рис. 2.9. Канатна машина WS55B/Xenda

Паралельно зі зростанням продуктивності збільшується і тривалість різання – від 6 год для площі 12 м² до 38,57 год для площі 108 м². Найвища ефективність процесу – 2,5–2,8 м²/год – фіксується при площі монолітів понад 72 м², коли режим роботи машини набуває найбільшої рівномірності.

Порівняння з режимами 60 А і 65 А свідчить про те, що при силі струму 55 А досягається найбільш збалансоване співвідношення між тривалістю різання та продуктивністю. Це вказує на менш інтенсивний тепловий вплив на канат і рівномірніший знос алмазних сегментів. Таким чином, режим 55 А є раціональним для різання монолітів великої площі: він дозволяє оптимізувати питоме енергоспоживання та подовжити ресурс різального інструменту.

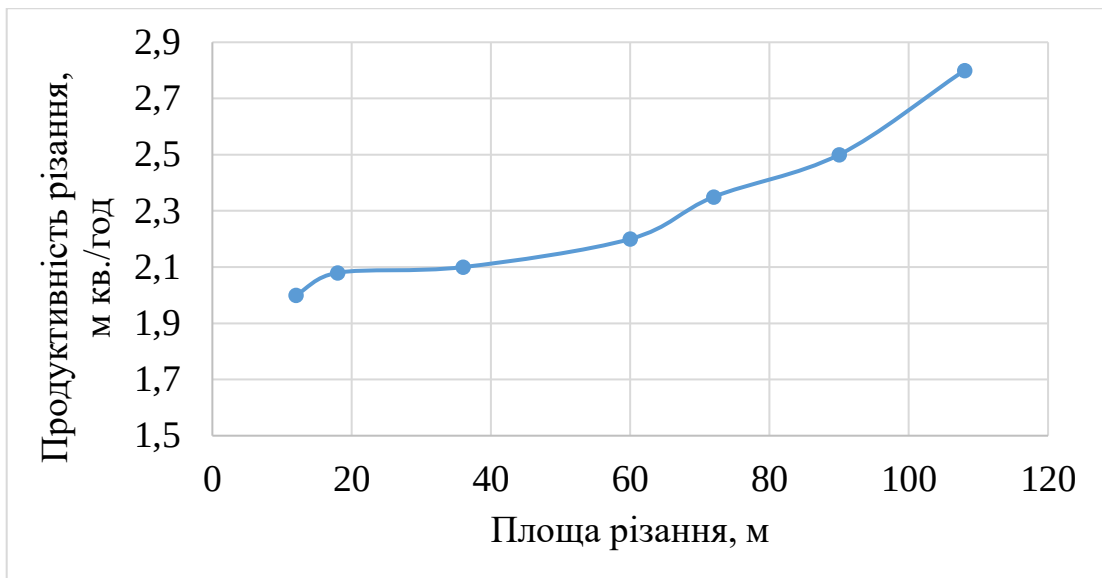


Рис. 2.10. Залежність продуктивності різання від площі різання при силі току різання 55 А

Дані на рис. 2.11 характеризують поведінку продуктивності різання при силі струму 60 А залежно від площі оброблюваного моноліту.

На початковому етапі спостерігається поступове зростання продуктивності: від 2,2 м²/год для площі 12 м² до максимального значення 2,44 м²/год при площі 72 м². Це зростання зумовлене формуванням стабільного натягу канату та рівномірним зношенням алмазних зерен, що у сукупності забезпечує ефективне й якісне різання без суттєвих перерв у роботі.

Однак при подальшому збільшенні площі понад 72 м² продуктивність починає знижуватися і для моноліту площею 108 м² становить 2,37 м²/год. Причиною такої тенденції є те, що тривале різання великих монолітів супроводжується накопиченням теплового навантаження на канат, що ускладнює підтримання стабільного натягу та вимагає додаткових зупинок для охолодження й коригування робочих параметрів. Перегрів канату, своєю чергою, негативно позначається як на натягу, так і на якості поверхні різ.

Отже, режим 60 А демонструє найвищу ефективність при різанні монолітів середньої площі, де вдається підтримувати оптимальне поєднання швидкості подачі та натягу канату. При переході до великих площ вирішального значення

набуває точне налаштування теплового режиму машини, оскільки саме цей чинник стає визначальним для збереження продуктивності та обмеження зносу різального інструменту.

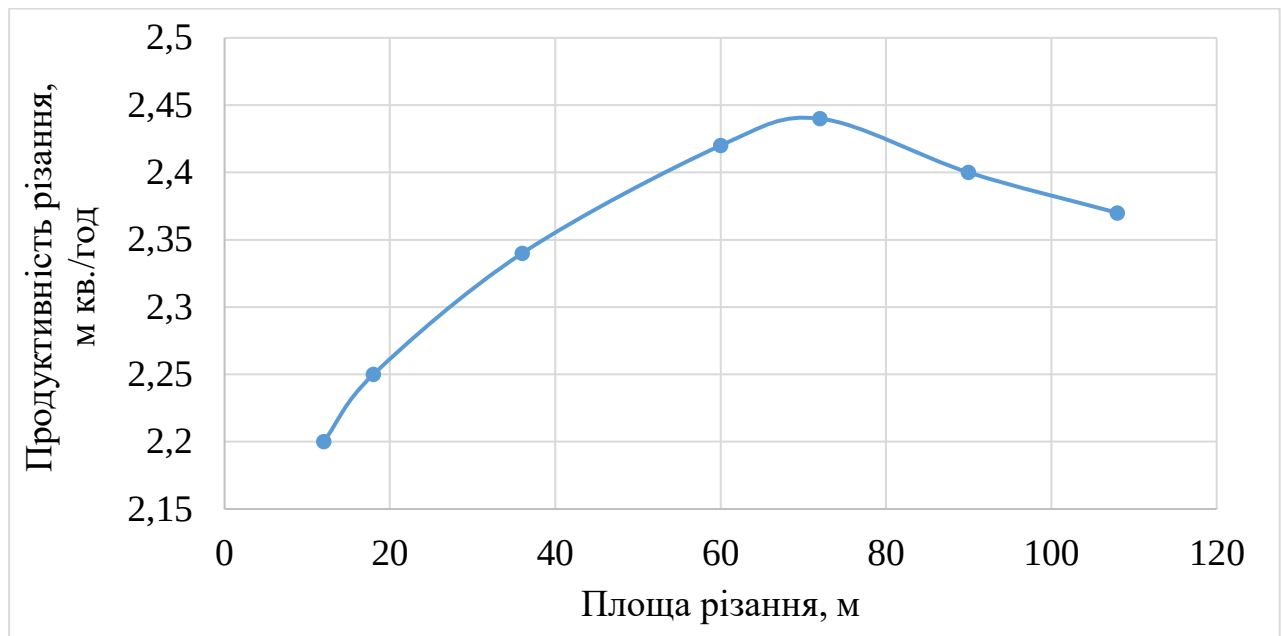


Рис. 2.11. Залежність продуктивності різання від площі різання при силі току різання 60 А

Дані на рис. 2.12 відображають характер зміни продуктивності різання при силі струму 65 А в залежності від площі оброблюваного моноліту.

На початкових площах фіксується зростання продуктивності: для моноліту 6×2 м (12 м^2) вона становить $3,0 \text{ м}^2/\text{год}$, а при збільшенні площі до 36 м^2 (моноліт 6×6 м) досягає максимального значення $3,14 \text{ м}^2/\text{год}$. Підвищена сила струму забезпечує інтенсивніший тиск канату на породу, що на малих і середніх площах сприяє прискоренню процесу різання за умови достатнього відведення тепла.

Проте починаючи з площі 72 м^2 (моноліт 6×12 м) продуктивність різко скорочується до $2,28 \text{ м}^2/\text{год}$ і продовжує знижуватися при подальшому збільшенні площі – до $2,09 \text{ м}^2/\text{год}$ для моноліту площею 108 м^2 . Така динаміка пояснюється тим, що підвищена сила струму зумовлює більш інтенсивне теплоутворення в зоні контакту канату з каменем. При тривалому різанні великих монолітів накопичене теплове навантаження спричиняє прискорений

знос алмазних зерен і дестабілізацію натягу канату, що вимагає частих технологічних зупинок для охолодження та перерегулювання.

Таким чином, режим 65 А забезпечує найвищу продуктивність серед усіх досліджених режимів, однак лише в діапазоні відносно невеликих площ різання. При переході до великих монолітів перевага у швидкості різання нівелюється зростаючими втратами часу на обслуговування процесу, внаслідок чого загальна ефективність виявляється нижчою, ніж у режимі 55 А. Оптимальна область застосування режиму 65 А обмежується монолітами площею до 36 м², де вдається реалізувати потенціал підвищеної сили струму без суттєвого перегріву та надмірного зносу різального інструменту.

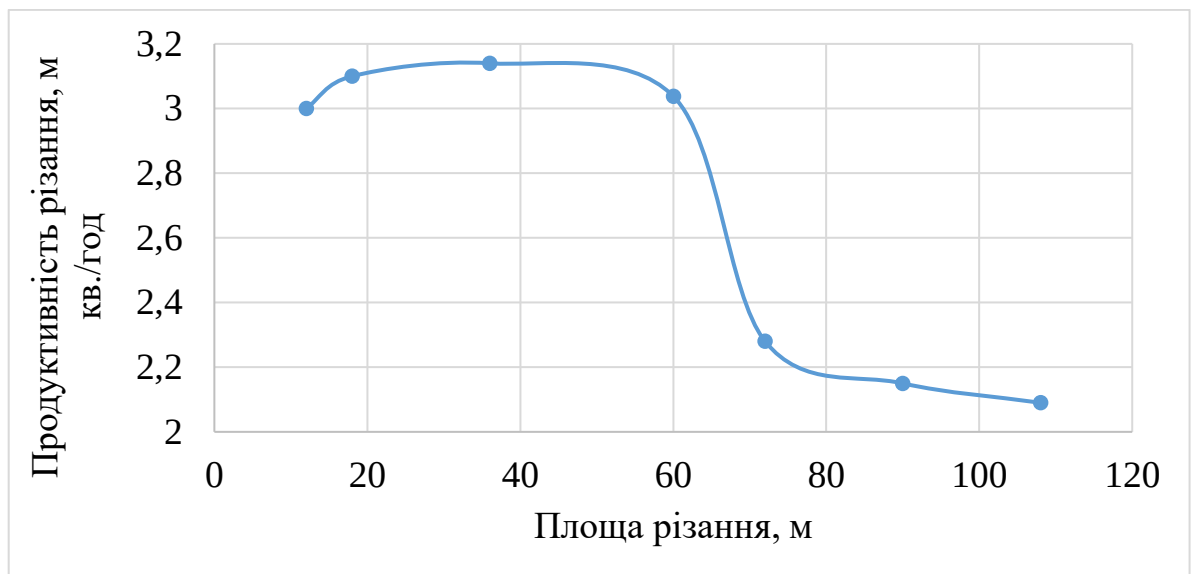


Рис. 2.11. Залежність продуктивності різання від площі різання при силі току різання 65 А

Отримані експериментальні дані відображають складну взаємодію між ключовими робочими параметрами алмазно-канатної машини: силою струму, натягом канату, швидкістю різання та тепловим режимом роботи.

Аналіз результатів за режимом 55 А свідчить про те, що поступове зростання продуктивності зі збільшенням площі моноліту забезпечується насамперед стабільністю натягу канату та рівномірністю зношення алмазних

зерен. Завдяки цьому кількість вимушених зупинок для охолодження та перерегулювання залишається мінімальною, а машина працює в близькому до оптимального режимі. Максимальна продуктивність при цьому значенні струму досягає 2,8 м²/год на площі 108 м², що на 40 % перевищує показник для найменшого з досліджених монолітів. Такий результат підтверджує, що режим 55 А є найбільш придатним для різання монолітів середніх і великих розмірів.

Натомість режим 65 А демонструє принципово іншу картину. На початковому етапі підвищена сила струму дає відчутний приріст продуктивності – до 3,14 м²/год при площі 36 м². Однак при подальшому збільшенні площі понад 72 м² цей показник різко падає і на площі 108 м² не перевищує 2,09 м²/год. Першопричиною є інтенсивне теплоутворення в зоні різання, яке спричиняє прискорений знос алмазних елементів і дестабілізацію натягу, що вимагає частих технологічних перерв. Таким чином, без впровадження ефективного температурного контролю підвищення сили струму не гарантує зростання загальної ефективності процесу.

Разом із тим проведене дослідження має певні обмеження, які необхідно враховувати при інтерпретації результатів. По-перше, експерименти виконувалися за відносно стабільних зовнішніх умов, тому вплив коливань температури та вологості навколишнього середовища залишився поза увагою. По-друге, дослідження охоплювало лише один тип каменю, тому перенесення отриманих висновків на породи іншої твердості та текстури потребує додаткової перевірки. По-третє, апробований діапазон значень сили струму (55, 60 і 65 А) є відносно вузьким і не дозволяє дати вичерпну оцінку всім потенційно ефективним режимам роботи. Крім того, результати безпосередньо стосуються машин класу WS55B/Xenda і можуть потребувати коригування при застосуванні до обладнання з іншими технічними характеристиками.

Перспективи подальших досліджень пов'язані з розширенням переліку варійованих параметрів – зокрема, швидкості подачі канату та характеристик текстури каменю – що дозволить оптимізувати процес різання для ширшого спектра виробничих умов. Окремий науковий і практичний інтерес становить

розроблення адаптивних систем автоматичного керування, здатних у реальному часі коригувати режимні параметри машини відповідно до поточних умов різання. Впровадження таких систем сприятиме підвищенню стабільності роботи обладнання, зростанню продуктивності та скороченню витрат на технічне обслуговування.

Висновки до розділу 2

1. Моделювання в середовищі Ansys Workbench підтвердило, що ударні навантаження є ключовим механізмом зношування алмазного канату: при зростанні ударних навантажень на 20–30 % тривалість експлуатації канату скорочується на 15–25 %. Встановлено, що при збільшенні швидкості різання з 24 до 30 м/с максимальні контактні напруження зростають з 85 до 126 МПа, причому найінтенсивніший приріст фіксується в діапазоні 24–25 м/с та 29–30 м/с.

2. Залежність між нормальними та тангенціальними силами різання має нелінійний характер, що описується поліномом другого порядку. Оптимальний режим різання досягається в середньому діапазоні нормального навантаження, де зростання тангенціальної сили є стабільним; при перевищенні навантаження понад 100 МПа рівень мікроушкоджень алмазної структури зростає на 35 %.

3. Встановлено нерівномірний характер зношування намистин уздовж канату: намистини в центральній частині зношуються на 30 % швидше за периферійні. Оптимальний швидкісний діапазон визначено в межах 25–27 м/с, оскільки підвищення швидкості понад 30 м/с збільшує продуктивність лише на 10 %, але прискорює знос канату на 40 %.

4. Порівняльні випробування алмазних намистин трьох класів (SDA 75+, SDA 85+, SDA 100+) показали, що при швидкостях різання близько 30 м/с намистини класу SDA 100+ і SDA 85+ демонструють суттєво менше зношування завдяки вищій кристалічності та термічній стабільності алмазних частинок. Намистини SDA 75+ характеризуються швидшою втратою маси при підвищенні

швидкості різання, що підтверджує визначальний вплив класу алмазу на ресурс канату.

5. Виробничий експеримент на Лезниківському кар'єрі показав, що оптимальний режим сили струму залежить від площі моноліту: при 55 А продуктивність рівномірно зростає до 2,8 м²/год для монолітів понад 72 м² і є найраціональнішою для великих монолітів; режим 65 А забезпечує максимальну продуктивність 3,14 м²/год лише для монолітів площею до 36 м², після чого інтенсивне теплоутворення спричиняє різке падіння продуктивності до 2,09 м²/год.

Розділ 3. ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНОЇ ГЕОМЕТРІЇ ЗАБОЮ ДЛЯ ВИДОБУТКУ АЛМАЗНО-КАНАТНИМИ ПИЛАМИ

3.1. Дослідження впливу зміни висоти уступу на коефіцієнт питомих втрат

Під час видобутку із застосуванням алмазно-канатних пилок виникають технологічні втрати, які формуються на підшві уступу (рис. 3.1, 3.2). Ці втрати проявляються у вигляді сходинок, що утворюється під час випилювання блоку, і зумовлені потребою виконання буріння на підшві уступу під заданим кутом.

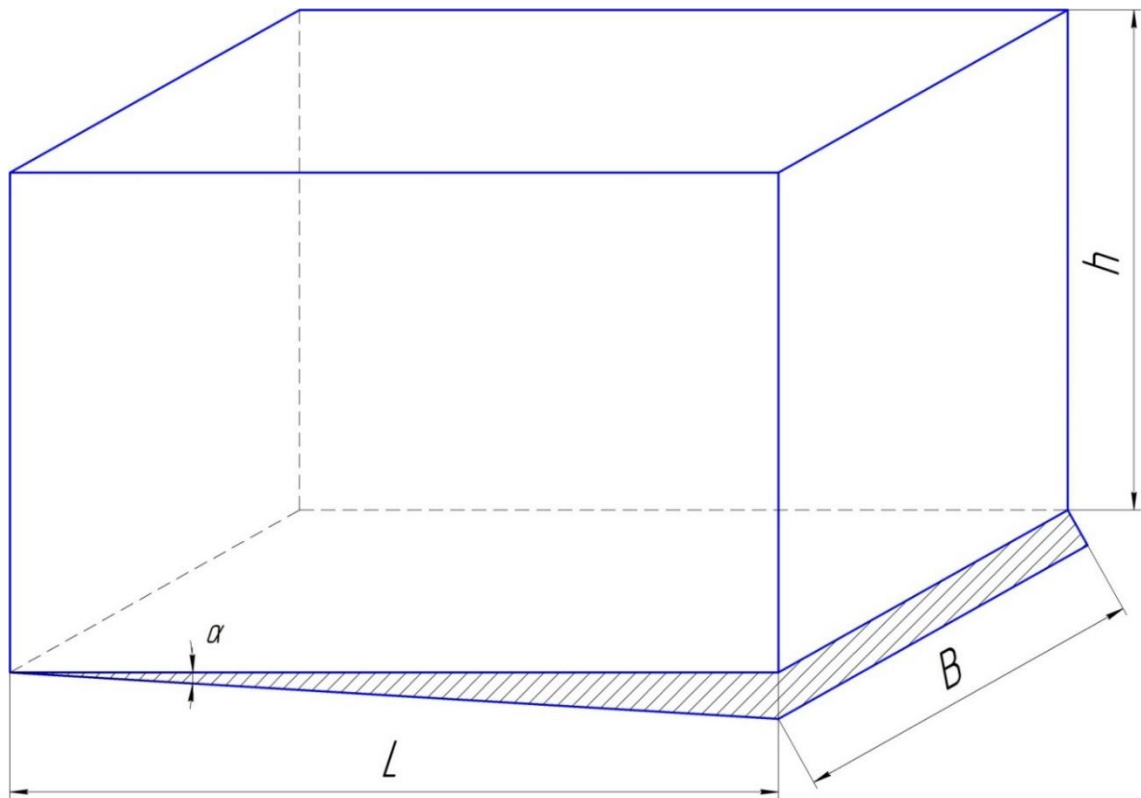


Рис. 3.1. Втрати каменю при його видобуванні алмазно-канатною технологією



Рис. 3.2. Вигляд сходинки під час підрізання моноліту алмазно-канатною пилкою

Було визначено втрати природного каменю за формулою:

$$V_{втр} = \frac{1}{2} L \cdot B \cdot tg\alpha, \quad \text{м}^3$$

Розрахунки дали можливість побудувати графік залежності втрат природного каменю залежно від розмірів моноліта (рис. 3.3).

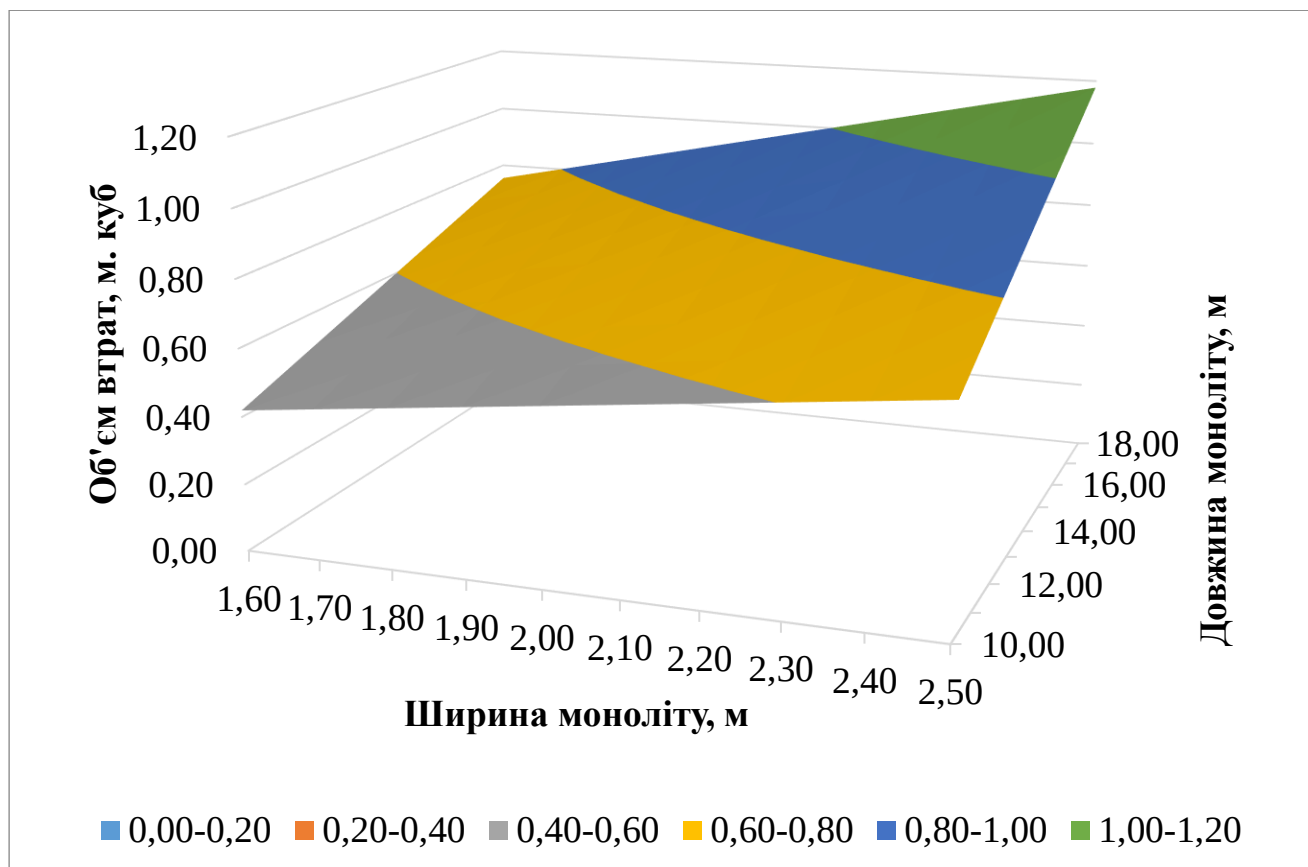


Рис. 3.3. Залежність втрат природного каменю залежно від розмірів моноліта

Втрати каменю збільшуються із зростанням розмірів моноліту. Це свідчить про те, що більші моноліти супроводжуються більш значними технологічними втратами із-за зміщення до низу бурової штанги.

Втрати обумовлені необхідністю формування сходинки на підшві уступу під час випилювання блоку. Цей технологічний процес включає буріння під кутом, що додає складності.

Зміна довжини уступу впливає на величину втрат. Зменшення довжини моноліту може сприяти зменшенню втрат, однак це вплине на продуктивність різання.

Для зменшення втрат потрібно оптимізувати розміри монолітів та технологічні процеси, зокрема кут буріння і довжину уступу.

3.2. Визначення оптимальної висоти уступу при видобутку блочного каменю алмазно-канатним обладнанням

Основною перевагою, що сприяє успішному впровадженню обладнання на основі алмазно-канатних пилок, є здатність відокремлювати моноліти значно більших розмірів порівняно з традиційними методами видобування, які вони замінюють.

На відміну від дискових та барових каменерізних машин, робочі параметри яких обмежують висоту монолітів до 1 метра для дискових стінорізів і 2–3 метрів для барових машин, алмазно-канатні пилки дозволяють формувати уступи заввишки від 1 до 12 метрів і більше. Це забезпечує збереження природної блочності масиву, що сприяє підвищенню виходу товарної продукції. Зокрема, впровадження такого обладнання на Головинському родовищі габро дозволило збільшити вихід товарної продукції у 1,4 раза.

Проте, практично необмежені розміри монолітів, які можна відокремлювати за допомогою алмазно-канатних пилок, вимагають детальних досліджень і визначення оптимальних параметрів роботи. Це дасть змогу забезпечити максимальний вихід продукції за мінімальних витрат. Крім того, збільшення висоти уступу значно зменшує витрати на відокремлення монолітів, зберігаючи при цьому природну блочність масиву.

3.3. Причини руйнування моноліту, який перекидається

Видобуток монолітів часто супроводжується формуванням окремих частин блоків, які через свої розміри не відповідають встановленим стандартам для переробки й відправляються на склад як негабарити. Оскільки на їх видобуток, транспортування та інші операції витрачаються ресурси, вони класифікуються як втрати.

Всі втрати можна поділити на дві основні групи:

1. **Технологічні втрати:** До цієї категорії належать негабарити, що утворилися через штучні тріщини (в результаті удару) або їх комбінацію з природними. Основними причинами таких втрат є:

- Недоліки технології перекидання монолітів.

- Відсутність демпферної подушки для пом'якшення ударів.
- Неправильний вибір напрямку фронту гірничих робіт.
- Занадто великі розміри моноліту, що видобувається.

Для мінімізації таких втрат важливо навчитися контролювати процес падіння та руйнування моноліту.

2. Природні втрати: Ця група включає втрати, спричинені природними характеристиками гірської породи, такими як тріщинуватість, неоднорідність структури тощо.

Для зниження технологічних втрат були проведені дослідження впливу параметрів моноліту на процеси його падіння. Розглядалися характеристики падіння, момент удару та вплив вибраних параметрів на ці процеси. Моноліт аналізували з урахуванням таких параметрів:

- **Геометричні:** висота h , ширина b , довжина L .
- **Фізичні:** щільність ρ , опір на стискання $\sigma_{ст}$ та розтягування $\sigma_{роз}$.

Ці дослідження дозволяють оптимізувати процеси перекидання та зменшити втрати, спричинені дробленням та пошкодженням монолітів (рис. 3.4).

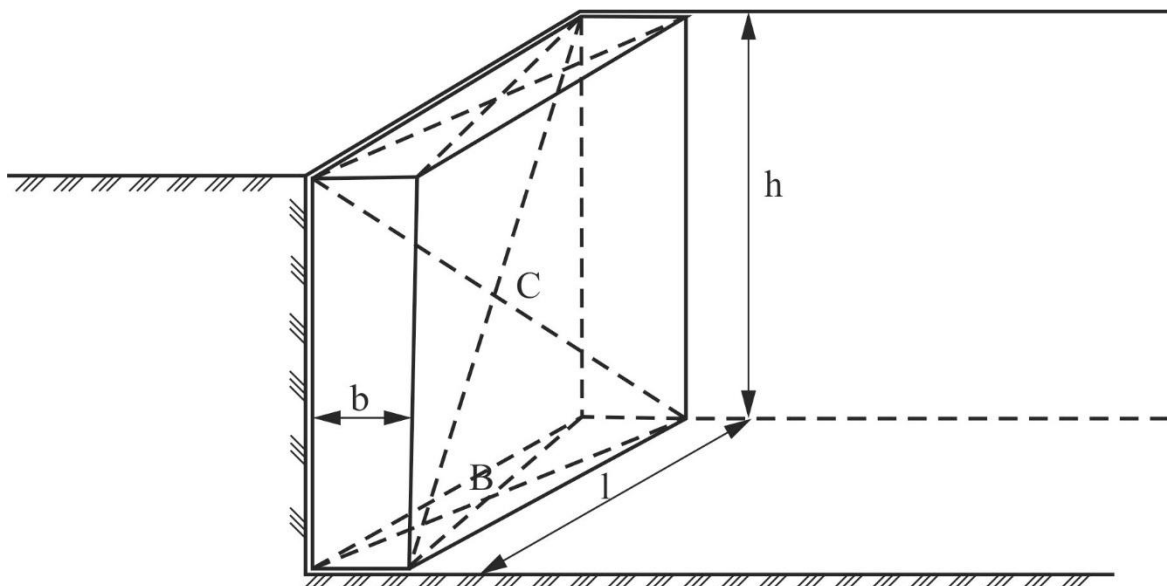


Рис. 3.4. Схема розміщення моноліту від масиву без тріщин: b , L , h відповідно ширина, довжина і висота моноліту, A , B , C – точки знаходяться на вертикальній осі моноліту і проходить через його центр, де C – точка є ще й центром моноліту

Після відокремлення моноліту його перекидають із застосуванням клина, подушки або гідродомкрата. Цей процес полягає у поступовому відхиленні моноліту до моменту, коли він досягає лінії рівноваги. Після перетину цієї лінії моноліт під дією сили тяжіння самостійно починає падіння на робочий майданчик.

Ключові моменти процесу:

1. **Відсутність початкового імпульсу:** Моноліт не отримує жодного зовнішнього прискорення або поштовху на початку руху. Це забезпечує рівномірний перехід через лінію рівноваги та природний процес падіння.

2. **Набуття швидкості:** Після проходження лінії рівноваги моноліт під впливом сили тяжіння поступово набуває швидкості падіння. Його рух є результатом лише дії гравітаційної сили.

3. **Контрольоване перекидання:** Завдяки використанню допоміжних засобів (клина, подушки, гідродомкрата) забезпечується плавний перехід моноліту у фазу вільного падіння. Це дозволяє мінімізувати ризик неконтрольованого руху або пошкодження моноліту.

Цей метод відхилення до лінії рівноваги є ефективним для забезпечення безпеки робіт і збереження цілісності моноліту під час його транспортування та обробки (рис. 3.5).

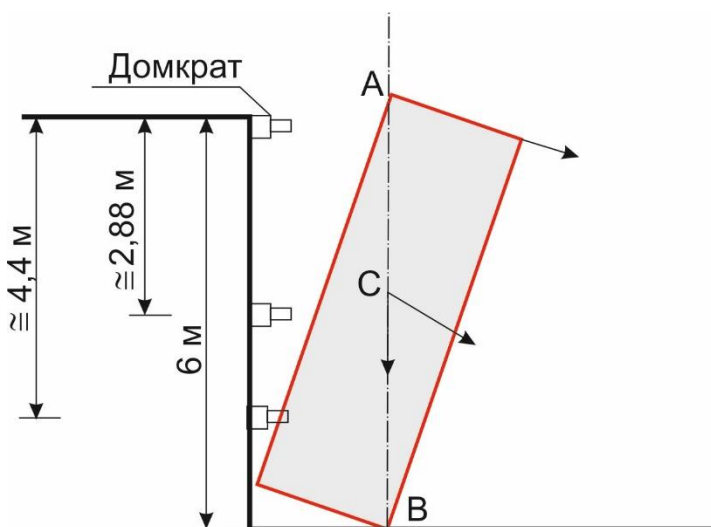


Рис. 3.5 Схеми перекидання моноліту

Найпростіший спосіб з'ясувати умову, за якої моноліт (прямокутний блок) “поїде” (поповзе) по основі, а не перекинеться, – порівняти силу, потрібну для зсуву (що долає тертя), із силою, потрібною для перекидання (що долає момент ваги блоку).

Умови рівноваги

Розгляньмо спрощену модель у двовимірному перерізі (вид збоку). Нехай:

H – висота блоку (від точки B внизу до точки A вгорі).

b – товщина (або ширина) блоку в горизонтальному напрямку (тобто «шина», яку ви згадуєте).

M – маса блоку (вага Mg).

μ – коефіцієнт тертя між блоком і поверхнею.

F – горизонтальна сила, яку ми прикладаємо в точці A .

Центр мас (точка C) у найпростішому випадку знаходитиметься по середині блоку (тобто на відстані $b/2$ від лівого або правого краю), якщо блок однорідний.

Умова зсуву (ковзання)

Щоб блок почав ковзати по площині, треба “прорвати” граничну силу тертя:

$$F_{\text{slide}} = \mu N = \mu Mg,$$

де $N=Mg$ – нормальна реакція опори (у спрощеному випадку, коли блок стоїть вертикально і не відривається від землі).

Отже, якщо $F > \mu Mg$, то сила, прикладена зверху, перевищує силу тертя, і блок “поїде” по поверхні.

Умова перекидання

Для перекидання має виконатися моментна нерівність відносно нижнього ребра (точка B), навколо якого блок може почати “обертатися”.

Момент від ваги Mg відраховується через плече приблизно $b/2$ (якщо центр мас посередині).

Момент від зовнішньої горизонтальної сили F – через плече H .

На межі перекидання ці моменти зрівнюються:

$$F_{\text{tip}} \cdot H = M_g \cdot b/2 \Rightarrow F_{\text{tip}} = M_g(b/2)/H = Mgb/(2H)$$

Отже, якщо

$$F > Mgb/(2H),$$

то момент від сили F перевищує “стабілізуючий” момент ваги – і блок перекинеться.

Критерій «спочатку ковзання, а не перекидання»

Щоби блок спочатку зсунувся, а не перекинувся, треба, щоб гранична сила для ковзання була меншою, ніж гранична сила для перекидання:

$$F_{\text{slide}} < F_{\text{tip}}.$$

Підставимо знайдені формули:

$$\mu M g < Mgb/(2H).$$

Скоротивши

Mg з обох боків, дістанемо:

$$\mu < b/(2H) \Rightarrow b > 2\mu H$$

Іншими словами, якщо товщина (ширина) блоку b більша за $2\mu H$, то в момент зростання сили F він спочатку “прорве” тертя й поїде (“посунеться”), перш ніж сила стане достатньою для перекидання.

Підставляємо $H=6$ м.

Для висоти 6 м отримаємо:

$$b > 2\mu \times 6 = 12\mu.$$

Тобто мінімальна товщина (щоб блок швидше «зірвався» в ковзанню, ніж перекинувся) становитиме

$$b_{\min} = 12\mu \text{ (м)}.$$

Приклад для різних μ

Якщо $\mu = 0,3$ (дуже слизька поверхня), тоді

$$b > 12 \times 0,3 = 3,6 \text{ м}.$$

Якщо $\mu = 0,5$ (більш-менш типове тертя камінь–бетон), тоді

$$b > 12 \times 0,5 = 6 \text{ м}.$$

Якщо $\mu = 0,7$, тоді $b > 12 \times 0,7 = 8,4 \text{ м}.$

Якщо ж поверхні будуть зволожені, забруднені або зіткнення відбуватиметься під динамічним навантаженням (ковзання в русі), коефіцієнт тертя може зменшуватися (наприклад, до 0,4–0,5).

Щоби блок почав перекидатися, треба зрівняти момент від ваги з моментом від прикладеної сили (відносно нижнього ребра, яке стає віссю обертання).

Якщо моноліт має товщину b (у напрямку, перпендикулярному до сили F) і висоту H , а центр ваги розташований приблизно посередині товщини (тобто плечо сили ваги буде $b/2$ від осі обертання), то:

$$F_{\text{tip}} H = (Mg) b/2.$$

$$\text{Звідси: } F_{\text{tip}} = Mg (b/2)/H = Mg b/(2H).$$

Отже, щоби почати перекидання блоку, потрібно:

$$F > Mgb/(2H).$$

Приклад розрахунку «перекидання» наведено в табл. 3.1.

Таблиця 3.1

Приклад розрахунку «перекидання» моноліту

<i>b, м</i>	<i>W, кН</i>	<i>F_{slide}, кН</i>	<i>F_{tip}, кН</i>
1,0	2384,0	953,6	198,7
1,2	2860,8	1144,3	286,1
1,4	3337,6	1335,0	389,4
1,6	3814,4	1525,8	508,4
1,8	4291,2	1716,5	644,3
2,0	4768,0	1907,2	794,7
2,2	5244,8	2097,9	962,3
2,4	5721,6	2288,6	1145,3
2,6	6198,4	2479,4	1343,2
2,8	6675,2	2670,1	1557,6
3,0	7152,0	2860,8	1788,0
3,2	7628,8	3051,5	2034,4
3,4	8105,6	3242,2	2297,6
3,6	8582,4	3433,0	2574,7
3,8	9059,2	3623,7	2868,8
4,0	9536,0	3814,4	3178,7

У всіх розглянутих випадках b від 1 до 4 м сила, потрібна для перекидання (F_{tip}), менша, ніж сила, потрібна для ковзання (F_{slide}). Тобто, якщо ми

прикладатимемо горизонтальне зусилля у верхній точці, моноліт спершу перекинеться, перш ніж зсунутися з місця.

Зі зростанням b моноліт стає стабільнішим від перекидання, тому що F_{tip} зростає квадратично ($\propto b^2$). Утім, навіть при $b=4\text{ м}$ F_{tip} усе ще не перевищує F_{slide} . Це означає, що при ширині до 4 м «поріг» сил для перекидання все ще нижчий, ніж «поріг» для зсуву.

Ковзання настане першим (а не перекидання) тільки тоді, коли ширина b перевищить 4,8 м (формула $b > 2\mu H$). Саме в цей момент «баланс» змінюється, і сила, необхідна для подолання тертя при зсуві (F_{slide}), стає меншою, ніж та, що потрібна для перекидання (F_{tip}). Інакше кажучи, якщо моноліт робити достатньо широким, він уже не «завалюватиметься», а радше «поїде» по площині.

Таким чином, головна суть у тому, що монолітна плита при заданій висоті 6 м і коефіцієнті тертя 0,4 ковзатиме тільки якщо вона досить «широка» (більше ніж 4,8 м). В усіх прикладах до 4 м ширини блоку перекидання відбувається за меншої сили, ніж зсув.

За $\mu=0,3$ і висоті 6 м моноліт шириною до 3,6 м спершу перекинеться, а не зсунеться. При перевищенні цього порогу (3,6 м) ковзання стає більш вірогідним попередником, аніж перекидання. Це підтверджується як аналітичною формулою $b > 2\mu H$, так і цифрами в табл. 3.2.

Під час падіння моноліт зберігає потенційну енергію, яка в момент удару трансформується в кінетичну енергію. Швидкість удару моноліту об поверхню робочого майданчика визначається на основі теореми про зміну кінетичної енергії, для чого обчислюється робота, виконана монолітом [40].

$$E_k - E_p = \sum A,$$

де E_p – кінетична енергія, Дж;

E_k – потенційна енергія, Дж;

$\sum A$ – робота, що здійснюються монолітом.

Кінетична енергія визначається з виразу [40].

I – інерційний коефіцієнт;

Таблиця 3.2

Порівняння сил ковзання та перекидання моноліту залежно від його
ширини ($\mu = 0,3$, $H = 6$ м)

<i>b</i>, м	<i>W</i>, кН	<i>F</i>_{slide} = 0,3<i>W</i>, кН	<i>F</i>_{tip}, кН
1	2384	715,2	198,7
1,2	2860,8	858,24	286,1
1,4	3337,6	1001,28	389,4
1,6	3814,4	1144,32	508,4
1,8	4291,2	1287,36	644,3
2	4768	1430,4	794,7
2,2	5244,8	1573,44	962,3
2,4	5721,6	1716,48	1145,3
2,6	6198,4	1859,52	1343,2
2,8	6675,2	2002,56	1557,6
3	7152	2145,6	1788
3,2	7628,8	2288,64	2034,4
3,4	8105,6	2431,68	2297,6
3,6	8582,4	2574,72	2574,7
3,8	9059,2	2717,76	2868,8
4	9536	2860,8	3178,7

$$I = \frac{1}{3}mh^2,$$

ω – кутова швидкість моноліту, м/с;

m – маса моноліту, кг;

h – висота моноліту, м.

Кутова швидкість зі моноліту визначається із залежності [40].

$$V = \omega R$$

де V – поступальна швидкість тіла, м/с;

R – радіус кола по якій рухається тіло тобто $R = h$, м.

Кутова швидкість в точці С буде дорівнювати:

$$\omega_c = \frac{2V_c}{h}.$$

Визначимо величину кінетичної енергії в момент удару в точці С:

$$E_k^c = \frac{2}{3}mV_c^2.$$

Потенційна енергія моноліту в момент переходу в кінетичну дорівнює роботі його в момент падіння [41].

$$A = E_n,$$

$$E_n = mgh.$$

Для точки С потенційна енергія дорівнює:

$$E_n^c = \frac{mgh}{2}.$$

Кінетична енергія моноліту дорівнює роботі моноліту в момент удару: На підставі цього впливає, що

$$E_k = E_n = A.$$

Знайдемо швидкість моноліту в момент удару в точці С

$$V_c = \sqrt{\frac{3gh}{4}}.$$

У момент удару моноліту об поверхню робочого майданчика він набуває ударний імпульс, який знаходиться з виразу:

$$S = mV_1 - mV_2$$

де V_1 – швидкість моноліту в момент удару, м/с;

V_2 – швидкість моноліту після удару, м/с.

Після удару моноліт припиняє свій рух ($V_2 = 0$), графік якого представлений на рис.3.6.



Рис. 3.6. Графік виду $V = f(t)$

З графіка видно, що в момент часу t_0 моноліт починає рухатися з постійно наростаючою швидкістю, в момент часу t_1 відбувається удар, моноліт набуває швидкість удару V_1 , одночасно швидкість стає $V_2 = 0$ м/с. На підставі цього імпульс удару дорівнює:

$$S_c = mV_c$$

де m – маса моноліту,

V_c – швидкість, яку моноліт «здобуде» після удару (або швидкість удару, якщо припустити цілком нееластичний чи миттєвий «прилипний» удар).

$$m = \rho v,$$

де v – об'єм моноліту, м³.

Отримаємо імпульс удару в точці С

$$S_c = \rho v V_c.$$

Для обрахунку приймалася маса моноліту (прямокутного паралелепіпеда) з розмірами: довжина $L = 15$ м, висота $H = 6$ м, товщина T (змінюється від 1 м до 3 м), обчислюється за формулою

$$m = \rho L H T,$$

де ρ – густина матеріалу моноліту (камінь, залізобетон тощо).

З урахуванням $m = \rho L H T$ отримаємо $S(V) = m \cdot V = \rho \cdot L \cdot H \cdot T \cdot V$. Оскільки $L=15$ м та $H = 6$ м фіксовані, але T змінюється у межах $1,5 \leq T \leq 3$ м, то:

$$S(V,T)=\rho \cdot 15 \cdot 6 \cdot T \cdot V = 90 \rho T V.$$

Якщо для прикладу взяти $\rho \approx 2500 \text{ кг/м}^3$ (густина граніту), тоді:

При $T=1,5 \text{ м}$:

$$S(V) = 90 \times 2500 \times 1,5 \times V = 337500 V, \text{ Н/с.}$$

При $T = 3 \text{ м}$: $S(V) = 90 \times 2500 \times 3 \times V = 675000 V, \text{ Н/с.}$

Це означає, що для $V=1 \text{ м/с}$ імпульс коливатиметься від $337,500 \text{ Н/с}$ (при товщині моноліту $1,5 \text{ м}$) до $675,000 \text{ Н/с}$ (при товщині моноліту 3 м).

З цієї формули випливає, що імпульс удару залежить від швидкості удару і маси моноліту, тому, з їх зміною змінюється імпульс удару за залежностями, які наведені на рис. 3.7.

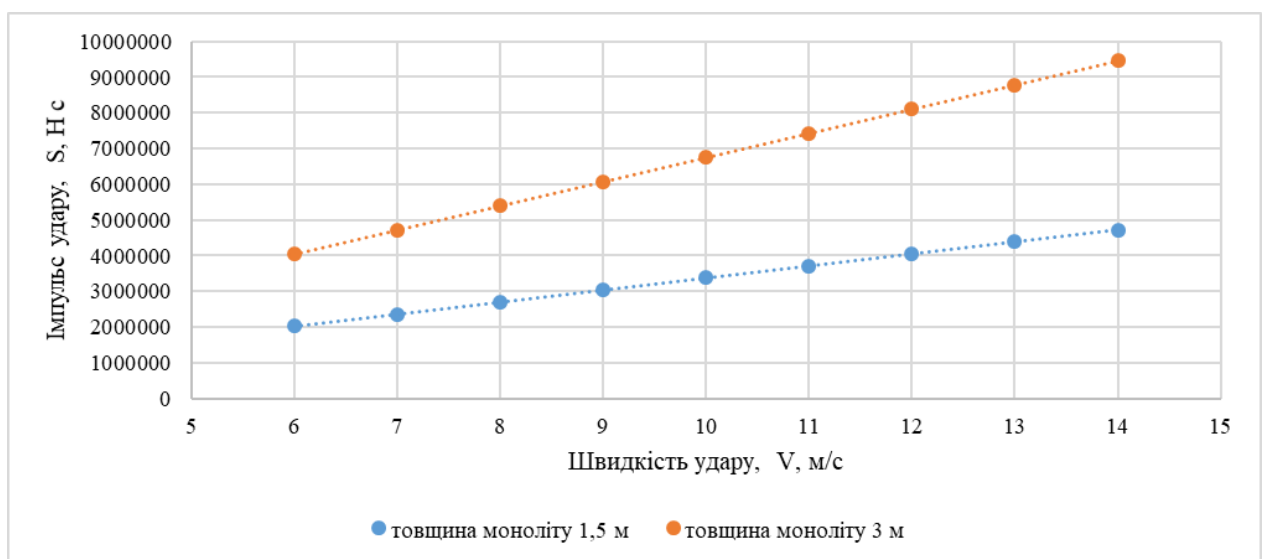


Рис. 3.7. Графік виду $S = f(V)$

З імпульсу удару визначається сила удару моноліту (P) про поверхню робочого майданчика.

$$P = \frac{S}{t},$$

де t – тривалість удару або час удару, с.

Тривалість удару визначається за залежністю:

$$t = 2b\sqrt{\frac{\rho}{E}},$$

де b – ширина моноліту, м;

ρ – щільність природного каменю, кг/м³;

E – модуль Юнга, Па.

Для моноліту природного каменю з довжиною 15 м тривалість удару буде 7 мс.

Зі зміною величини імпульсу удару можна регулювати силу удару, які характеризуються прямолінійною залежністю (рис. 3.8).

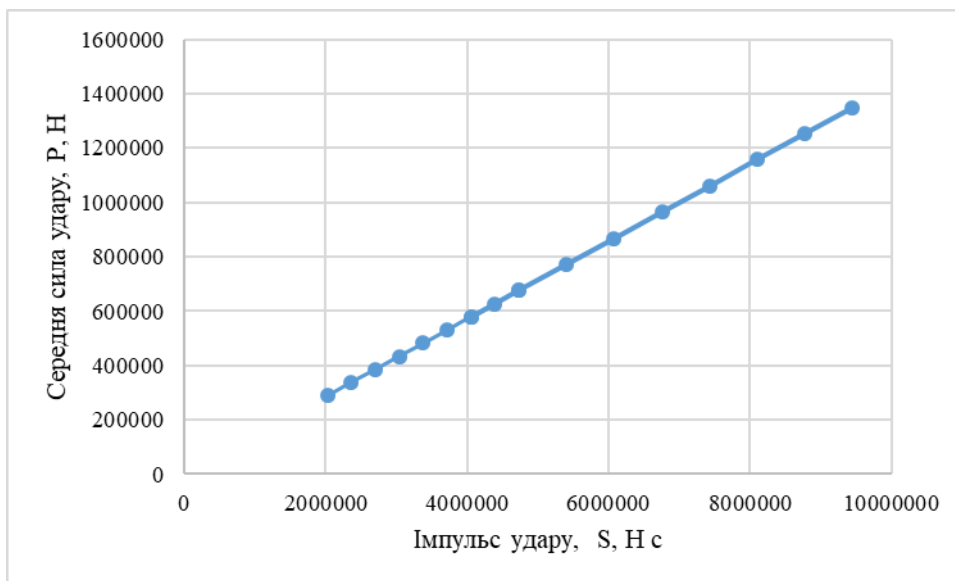


Рис. 3.8. Графік виду $P = f(S)$

Моноліт, виготовлений із твердого та крихкого каменю (граніту або габро), при падінні накопичує кінетичну енергію. У момент зупинки падіння ця кінетична енергія передається у вигляді сили удару P , що діє на моноліт. Короткочасний вплив цієї сили викликає миттєві високі напруження всередині

кристалічної структури каменю. Оскільки граніт і габро мають крихкий характер, вони майже не здатні до пластичних деформацій. У крихких матеріалах руйнування починається з ініціації тріщин у місцях концентрації напруг. Тріщини поширюються дуже швидко, бо відсутнє «поглинання» або розсіювання енергії за рахунок пластичної деформації. Механізм крихкого руйнування полягає в одночасному розриві міжатомних зв'язків у кристалічній решітці. Цей розрив зв'язків відбувається по всій площині або кількох площинах, що стають поверхнями тріщин. Щоб розірвати велику кількість зв'язків одночасно, потрібно досягти високих напружень, а отже, і високої сили. При ударі вся кінетична енергія моноліту різко зосереджується в невеликому об'ємі матеріалу. Саме сила удару P виступає зовнішнім чинником, який «штовхає» камінь за межу його міцності. Якщо рівень напружень перевищує міцність граніту або габро, виникає раптове руйнування. Унаслідок цього руйнування великі фрагменти моноліту можуть відколюватися по лініях тріщин. Під час удару спостерігаються динамічні ефекти, коли пікова сила може бути значно більшою за статичні навантаження. Оскільки граніт і габро – породи з високою твердістю, їхня крихкість виявляється у відсутності суттєвих залишкових деформацій. Процес руйнування розвивається настільки швидко, що моноліт тріскається буквально за мить. У будівельній та інженерній практиках нерідко використовують саме ударні методи для розколювання блоків із таких порід. Величина сили удару P визначається імпульсом (зміною кількості руху) поділеним на час тривалості удару. Чим коротша тривалість удару, тим вища середня сила, що призводить до інтенсивнішого руйнування. Отже, підсумовуючи, зовнішнє ударне навантаження та крихка природа матеріалу спільно зумовлюють швидке і раптове руйнування граніту чи габро. Напруга, що виникає в моноліті (або динамічне навантаження) в момент удару визначається з виразу

$$\sigma = \frac{P}{F},$$

де F – площа поверхні удару, м^2 .

Якщо ж урахувати раніше отримані залежності (зокрема час удару, імпульс), то вираз можна подати у вигляді:

$$\sigma = 2,72\sqrt{\rho E h_i}, \text{ МПа},$$

де ρ – густина каменю, E – модуль Юнга, а h_i – висота досліджуваного перерізу моноліту.

Критичним моментом є перевищення цієї динамічної напругою σ границі міцності каменю на розтяг $[\sigma_p]_d$. Якщо виконується нерівність.

$$\sigma > [\sigma_p]_d, \text{ МПа}.$$

Отже, змінюючи динамічне навантаження шляхом коригування сили та площі удару, можна ефективно контролювати процес руйнування матеріалу. Це дозволяє регулювати інтенсивність впливу на структуру і досягати потрібного рівня її деструкції.

На представлених епюрах (рис. 3.9) чітко видно, що характеристики ударного впливу змінюються в залежності від положення точки на моноліті. Найбільші значення ударного навантаження спостерігаються у верхній частині моноліту, що свідчить про нерівномірність розподілу навантаження по його поверхні. Така особливість може бути врахована для подальшої оптимізації процесу руйнування або моделювання розподілу ударного впливу.

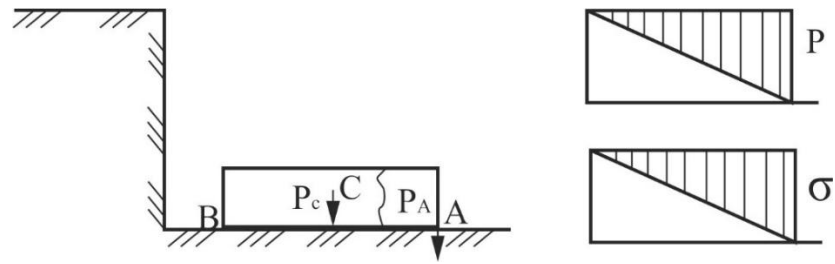


Рис. 3.9. Перевернутий моноліт та графічне відображення основних характеристик, що впливають на нього під час удару

Після розгляду процесів падіння, удару та руйнування моноліту здійснимо аналіз можливості регулювання (контролю) основних характеристик: швидкості падіння V_c , площі контакту S , сили удару P , а також напруження σ в ключових точках моноліту (точки А, В, С), що представлені в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3.

Динамічні характеристики ударного процесу моноліту в точках А, В, С

Характеристика	Точки		
	Точка В	Точка С	Точка А
Швидкість удару	$V_B = 0$	$V_c = \sqrt{\frac{3gh_m}{4}}$	$V_a = \sqrt{3gh_m}$
Імпульс удару	$S_B = 0$	$S_c = mV_c$	$S_a = mV_a$
Сила удару	$P_B = 0$	$P_c = \frac{S_c}{t}$	$P_a = \frac{S_a}{t}$
Тривалість удару	$T = 2B\sqrt{\frac{\rho}{E}}$		
Динамічне навантаження	$\sigma_B = 0$	$\sigma_c = \frac{P_c}{F}$	$\sigma_a = \frac{P_a}{F}$
Перевірка міцності моноліту	$\sigma \geq [\sigma_p]_d - \text{відбудеться руйнування}$		

Швидкість удару є одним із ключових параметрів, що визначають динамічне навантаження під час падіння моноліту. Згідно з формулою $V = \sqrt{\frac{3gh}{4}}$ швидкість удару залежить від прискорення вільного падіння g (сталого значення) та від висоти падіння h , яка може змінюватися.

Постає логічне питання: що мається на увазі під цією висотою h . У найпростішому випадку, коли моноліт падає на робочий майданчик без додаткових підсипань, висота падіння дорівнює висоті самого моноліту ($h=h_{\text{пад}}$).

Якщо ж передбачено використання підсипань чи інших проміжних шарів, тоді ефективна висота падіння зменшується $h_{\text{пад}} = h - h_{\text{нас}}$, що безпосередньо впливає на кінцеву швидкість удару.

Отже, швидкість удару тісно пов'язана з одним із основних параметрів моноліту – його висотою. Змінивши цей параметр або умови падіння, можна регулювати й швидкість удару. Оскільки динамічне навантаження зростає разом зі швидкістю падіння, коригування висоти дає можливість контролювати силу удару та рівень механічних деформацій у точці контакту. Це важливо для забезпечення безпеки, збереження цілісності конструкцій та запобігання пошкодженням робочого майданчика.

Крім того, під час проєктування падіння моноліту слід ураховувати вплив швидкості та динамічного навантаження на довговічність і міцність конструкції, а також на можливість виникнення резонансних коливань і втомних процесів у матеріалі. Такий комплексний підхід допомагає оптимізувати як самі параметри моноліту, так і техніку його монтажу та захисту опорних елементів.

Імпульс удару, позначений як $S = mV$, характеризує кількість руху, яку передає моноліт в момент контакту. Як ми вже знаємо, збільшення або зменшення швидкості удару безпосередньо впливає на цей показник. Проте одним із ключових чинників зміни імпульсу є маса моноліту, адже вона визначається його основними розмірами (h, b, l) та густиною матеріалу ρ . Формально це записується так: $m = hbl\rho$.

Таким чином, варіюючи висоту, ширину, довжину або змінюючи густину матеріалу, можна впливати на масу моноліту, а відтак і на величину імпульсу удару.

Важливо пам'ятати, що імпульс тісно пов'язаний із силою удару. Оскільки

$$P_c = \frac{S_c}{t}.$$

де t – час взаємодії моноліту з поверхнею, зміна імпульсу (через зміну швидкості або геометричних параметрів моноліту) неминуче призводить до коригування сили удару. Це відкриває можливість керувати динамічним навантаженням, встановлюючи оптимальні параметри для забезпечення необхідної міцності та безпеки конструкцій.

Напруга σ у матеріалі визначається співвідношенням $\sigma = \frac{P}{F}$,

тож будь-яка зміна сили удару P чи площі контакту F впливає на її величину. Зокрема, площа удару $F = hl$ є геометричною характеристикою моноліту. Зі зміною висоти h або довжини l змінюватиметься і динамічне навантаження, що може пришвидшити чи уповільнити процес руйнування.

Водночас, окрім розмірів та форми моноліту, не меншу роль у забезпеченні його цілісності відіграє гірська порода, із якої він виготовлений. Тип природного каменю визначає механічні характеристики, такі як міцність, крихкість, схильність до появи тріщин тощо. Тож, щоб гарантувати оптимальні показники надійності й довговічності, варто враховувати як геометричні параметри (площу удару, масу, висоту тощо), так і специфіку самого матеріалу.

3.4. Вплив параметрів моноліту, що перекидаються на його руйнування і їх обґрунтування

Однією з ключових переваг алмазно-канатних пил, яка зумовлює їх успішне впровадження та поступове витіснення дискових і барових каменерізних машин, є здатність відокремлювати моноліти набагато більшого

розміру – у десятки разів більші, ніж можуть забезпечити традиційні технології. Це дає змогу суттєво збільшити масштаб робіт під час видобутку природного каменю, відкриваючи нові можливості для промислового застосування. Крім того, використання алмазно-канатних пил сприяє підвищенню продуктивності кар'єрів і покращує економічні показники загального циклу видобування.

Для кращого розуміння варто навести порівняння з альтернативними способами різання каменю. Так, дискові стінорізні машини, попри їхню порівняно високу точність, обмежені висотою блоку приблизно в один метр, а барові – 2–3 метри, що помітно знижує вихід готової продукції при видобутку великих блоків. Натомість алмазно-канатні пили забезпечують можливість відпрацьовувати уступи заввишки до 6 метрів. Така значна відмінність дає змогу отримувати набагато більші кам'яні блоки, які мають попит у промисловості, оскільки з великих монолітів можна надалі нарізати широке розмаїття готових виробів, підвищуючи таким чином рентабельність усього виробничого процесу.

Однак, як і з будь-якою високопродуктивною технологією, слід враховувати можливі ризики та технічні обмеження. Зокрема, надмірне збільшення висоти (або інших параметрів) під час формування блоку може призвести до пошкодження моноліту внаслідок штучних тріщин. Ці тріщини утворюються через удар при падінні каменю на робочий майданчик, що в свою чергу здатне спричиняти додаткові технологічні втрати. Якщо блок ушкоджено, з нього вже не можна виготовити повноцінні вироби, що прямо знижує вихід товарних блоків і призводить до додаткових витрат на усунення дефектів чи перероблення непридатних залишків.

Отже, доцільним рішенням є пошук оптимальних розмірів кам'яних монолітів, що підлягають видобутку за допомогою алмазно-канатних пил. Ця оптимізація передбачає комплексний аналіз технічних і природних чинників, серед яких:

Структура тріщинуватості природного каменю. Якщо в надрах порід заздалегідь існують тріщини або зони слабкості, збільшення розмірів моноліту

може спричинити неконтрольоване поширення тріщин і призвести до появи значних дефектів.

Фізико-механічні властивості матеріалу. Міцність, густина, стисливість та інші властивості каменю істотно впливають на те, наскільки великим може бути блок, щоб не зазнати руйнування або значної деформації.

Стан і якість «подушки» чи робочого майданчика. Міцне та рівне місце для падіння моноліту знижує імовірність появи пошкоджень, тоді як нерівна або надто тверда поверхня збільшує ризик виникнення тріщин.

Кут нахилу робочого майданчика. За надто різкого нахилу блок може скочуватися або падати з більшою силою, що збільшує ймовірність механічних пошкоджень.

Економічні міркування. Витрати на кожному етапі від видобування до транспортування і подальшої обробки мають бути співмірними з очікуваним прибутком. Чим більші блоки, тим потенційно ефективнішим може бути використання матеріалу, проте надмірне збільшення розмірів підвищує ризики пошкоджень та супутніх збитків.

Саме зважуючи всі ці аспекти, можна знайти баланс між продуктивністю та якістю результату. Оптимальне співвідношення розмірів моноліту до характеристик кар'єру, обладнання й самого каменю дасть змогу мінімізувати втрати та водночас максимізувати вихід товарних блоків. У такий спосіб впровадження сучасних алмазно-канатних технологій виправдовує себе не лише з огляду на зростання масштабів видобутку, а й з точки зору економічної ефективності, яка в підсумку визначає конкурентоспроможність підприємства на ринку природного каменю.

У той же час, надмірно завищена висота (або інших параметрів) може привести до руйнування моноліту мармуру за штучно утвореними тріщинами при падінні його на робочий майданчик, тобто технологічним втратам, що зменшить вихід товарних блоків. Тому, необхідно знаходити оптимальні параметри моноліту, що забезпечать економічну ефективність при мінімальних питомих витратах на видобуток які, залежать від характеру тріщинуватості фізико-

механічних властивостей природного каменю, якості подушки, кута нахилу робочого майданчика тощо.

3.4.1. Вплив висоти моноліту, що перекидаються на формування технологічних втрат

Одним із визначальних технологічних параметрів у процесі перекидання моноліту є його висота, адже вона безпосередньо відповідає висоті уступу на кар'єрі. Важливо розуміти, що некоректно встановлена висота на поточному горизонті видобутку вже не підлягає зміні, хоча на наступних горизонтах її можна буде скоригувати. Тому саме на етапі планування кожного окремого рівня необхідно ретельно оцінити оптимальне значення цього показника.

Щоб зрозуміти вплив висоти на руйнування моноліту, розгляньмо кілька випадків, коли висота змінюється ($h_1 > h_2 > h_3$), а ширина b та довжина L залишаються незмінними. З фізичних міркувань, швидкість удару при падінні залежить від висоти скидання: що вище моноліт, то більша накопичена потенціальна енергія, яка в момент удару перетворюється на кінетичну. Отже, якщо $h_1 > h_2 > h_3$, то й швидкості удару відповідно будуть у тому ж порядку: $V_1 > V_2 > V_3$.

Підвищення швидкості удару часто призводить до посилення динамічних навантажень під час контакту моноліту із поверхнею, що може збільшувати ризик утворення тріщин і подальшого руйнування блоку. З одного боку, більша висота моноліту може бути вигідною для одержання крупніших товарних блоків і зменшення кількості додаткових операцій із розрізання. З іншого – завелика висота може спричинити надмірні пошкодження каменю при падінні, унеможлививши отримання якісних виробів і призвести до збільшення технологічних втрат.

На рис. 3.10 показано, як змінюється швидкість удару моноліту об робочий майданчик залежно від його висоти.

Зі зменшенням висоти моноліту не лише знижується його маса, а й зменшується швидкість удару, адже імпульс (S) визначається як добуток маси на

швидкість $S=m \cdot V$. За умови $h_1 > h_2 > h_3$ маємо відповідно $m_1 > m_2 > m_3$, а отже й $V_1 > V_2 > V_3$

У результаті одночасного зменшення маси та швидкості імпульс удару моноліту також знижується: $S_1 > S_2 > S_3$.

На рис. 3.11 наведено графік цієї залежності для різних висот падіння моноліту на робочий майданчик.

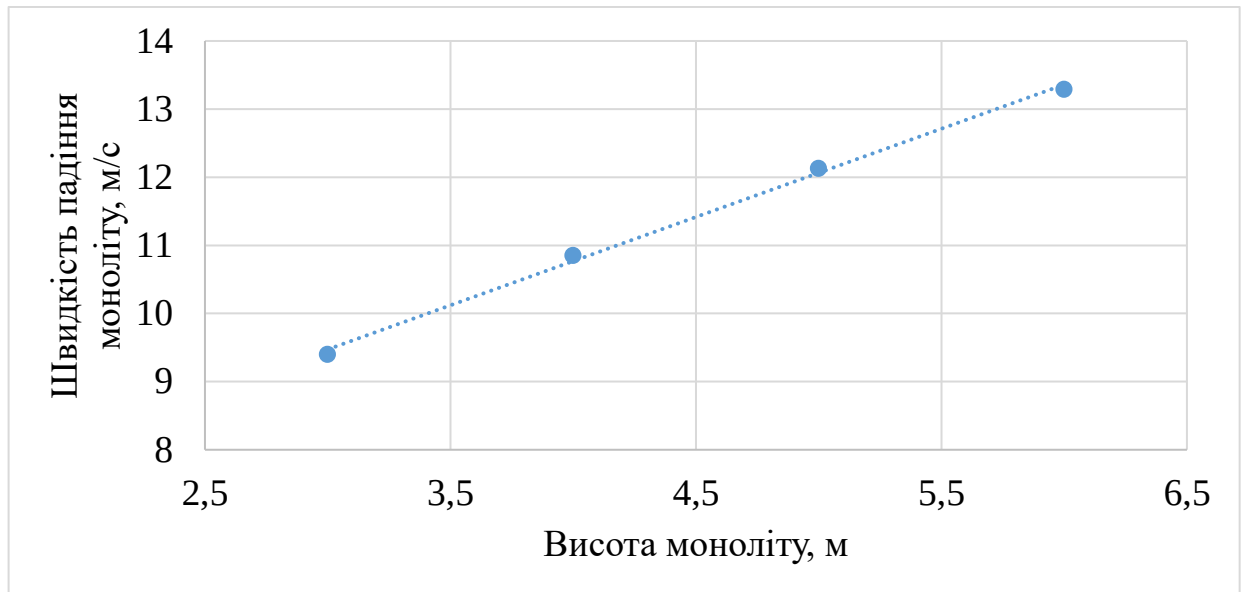


Рис. 3.10. Графік залежності швидкості падіння моноліту від його висоти в верхній точці

Додатково слід зазначити, що швидкість падіння моноліту пов'язана з висотою через залежність

$$V_a = \sqrt{3gh_m}$$

де g – прискорення вільного падіння, а h – висота моноліту. Тож, зі зменшенням висоти знижується не лише маса моноліту (за умови відсікання чи руйнування його частини), а й досяжна швидкість, що в підсумку впливає на зменшення імпульсу при ударі.

Залежність імпульсу удару моноліту об робочий майданчик від висоти його в верхній точці наведено на рис. 3.11.

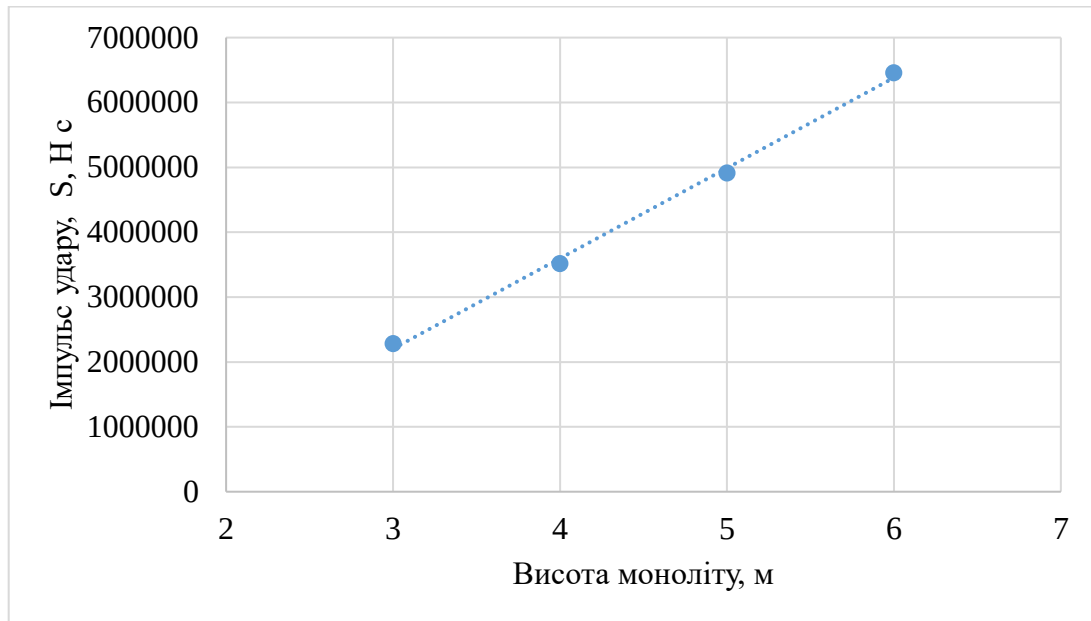


Рис. 3.11. Графік залежності імпульсу удару моноліту об робочий майданчик від його висоти в верхній точці

На відміну від попередніх двох параметрів – швидкості (V) та імпульсу (S), сила удару (P) безпосередньо залежить від величини імпульсу. Отже, якщо $S_1 > S_2 > S_3$, тоді й відповідні сили удару упорядковуються так само: $P_1 > P_2 > P_3$. Це означає, що зі зростанням імпульсу зростає і сила удару. Графічна ілюстрація цієї залежності наведена на рис. 3.12.

Додатково слід зазначити, що сила удару за визначенням є відношенням зміни імпульсу до проміжку часу, за який цей імпульс передається ($P = \Delta S / \Delta t$). Тож, за однакового часу взаємодії, більший імпульс зумовлює і вищу силу удару.

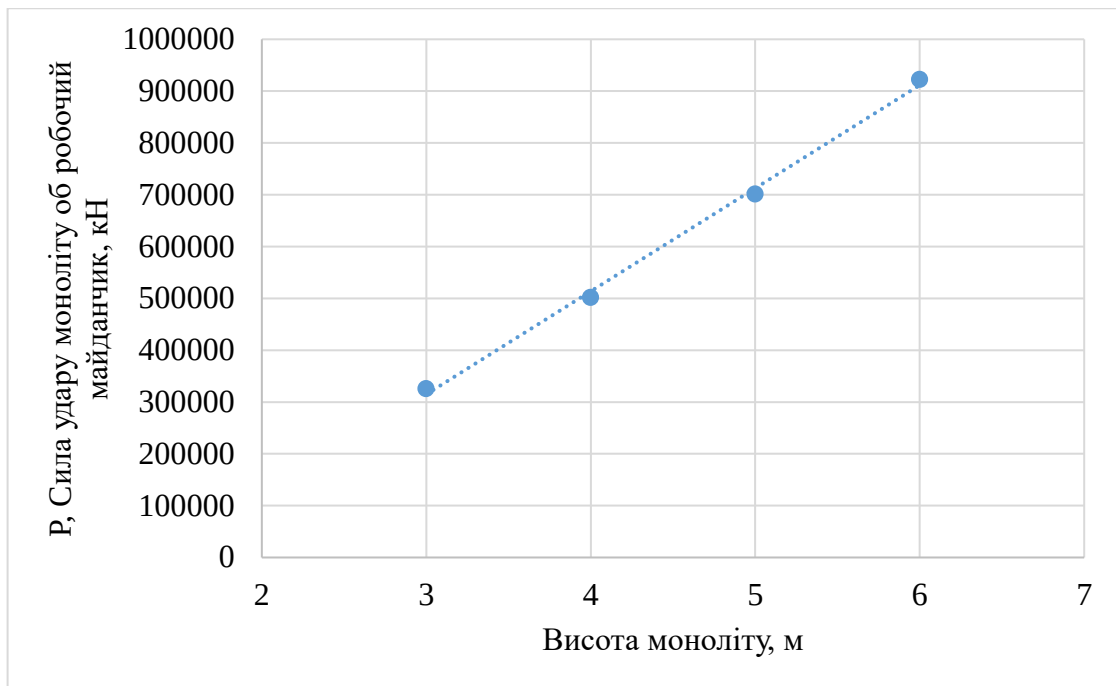


Рис. 3.12. Залежність сили удару моноліту об поверхню від його висоти в верхній точці

Подібно до імпульсу удару, динамічне навантаження $\sigma = \frac{P}{F}$ також змінюється зі зміною висоти моноліту. Із ростом висоти збільшується сила удару P , а отже зростає і динамічне напруження σ . При цьому сама площа контакту F може змінюватися залежно від геометричних параметрів моноліту (зокрема, від його висоти h).

Для вивчення впливу висоти моноліту на величину напруги σ , що визначає появу технологічних тріщин у моноліті в момент удару, виконано розрахунок із використанням таких вихідних даних:

- густина природного каменю $\rho = 2700$ кг/м³;
- опір на стиск $\sigma_{\text{ст}} = 150$ МПа;
- модуль Юнга $E = 7,3 \times 10^4$ МПа;
- опір на розтяг $\sigma_{\text{р}} = 8$ МПа;
- ширина моноліту 2 м;
- довжина моноліту 15 м.

Результати розрахунків наведені на рис. 3.13.

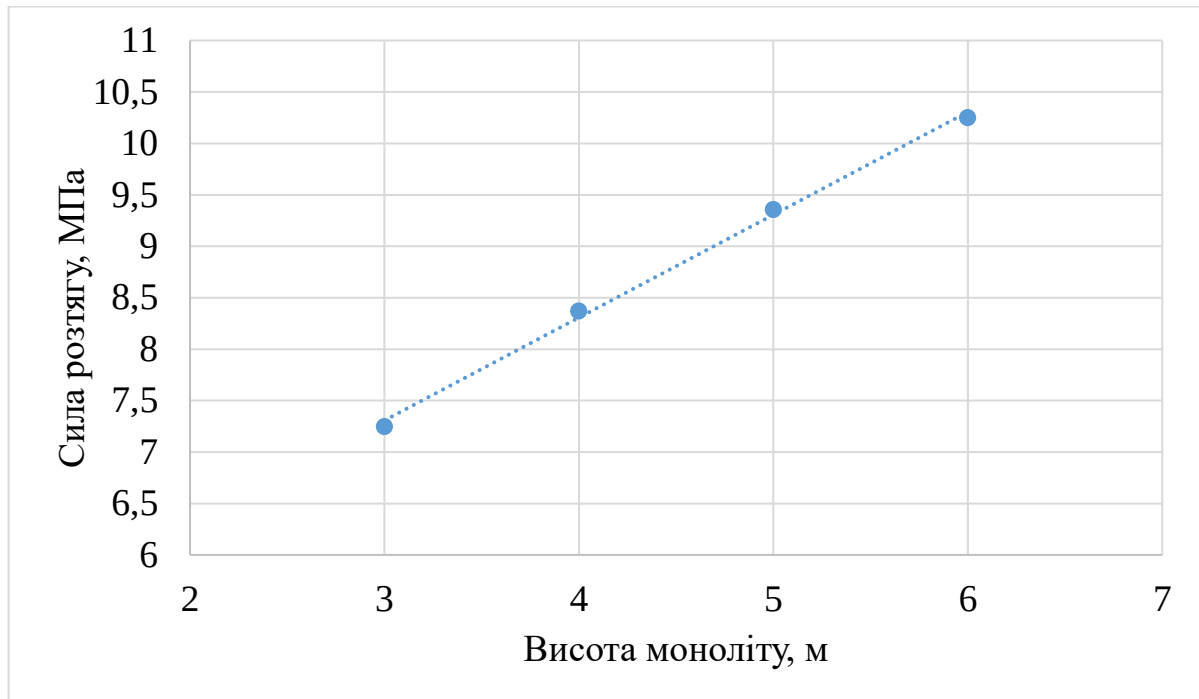


Рис. 3.13. Залежність міцності на розтяг моноліту від його висоти

3.4.2. Вплив ширини моноліту на його руйнування

Раніше було встановлено, що сила удару змінюється разом із імпульсом, проте вона також залежить і від часу зіткнення. Підставивши у формулу для визначення часу удару значення b_1, b_2, b_3 (які відповідають різним ширинам моноліту), отримуємо $t_1 > t_2 > t_3$. Це означає: зі збільшенням ширини моноліту зростає й тривалість удару. Водночас виявляється, що сила удару залишається сталою: $P_1 = P_2 = P_3$. Тобто при зміні ширини моноліту величина сили удару P не змінюється.

Виходячи з того, що сила удару не залежить від ширини моноліту ($P_1 = P_2 = P_3$), можна дійти висновку, що й руйнування моноліту відбувається однаково за різної ширини. Це підтверджується й тим, що напруга σ залишається

незмінною ($\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$). Отже, зміна ширини моноліту майже не впливає на силу удару та на силу напруження, яке обумовлює руйнування.

3.4.3. Вплив довжини перекидаються моноліту на його руйнування

Параметри моноліту включають висоту h (м), ширину b (м) та довжину L , причому $L_1 > L_2 > L_3$. Подібно до ширини b , довжина моноліту не впливає на швидкість його удару об робочий майданчик, оскільки швидкість визначається насамперед висотою падіння.

Натомість ситуація з імпульсом удару суттєво відрізняється, адже у формулі імпульсу ($S=m \cdot V$) маса m змінюється пропорційно довжині моноліту (за сталих інших розмірів). Підставляючи $L_1 > L_2 > L_3$ у формулу, отримаємо $S_1 > S_2 > S_3$, що свідчить: зі зменшенням довжини моноліту зменшується і його імпульс удару.

Таким чином, залежність між імпульсом удару та довжиною моноліту ($S = f(L)$) є прямопропорційною: що більша довжина, то більша маса і, відповідно, більший імпульс при сталому значенні швидкості.

Зі збільшенням (чи зменшенням) довжини моноліту змінюються як імпульс S , так і сила удару P . Водночас напруга σ залишається незмінною, оскільки зростання (або зменшення) сили удару компенсується відповідною зміною площі зіткнення. Таким чином, у досліджуваних межах довжина моноліту не впливає на величину напруги σ і, відповідно, на технологічні втрати, що виникають під час удару моноліту об робочу поверхню.

Висновки до розділу 3

1. Встановлено, що технологічні втрати каменю при видобутку алмазно-канатними пилками формуються на підшві уступу внаслідок необхідності буріння під кутом. Розроблено аналітичну залежність об'єму втрат від геометричних параметрів моноліту ($V_{\text{втр}} = L \cdot B \cdot \text{tg} \alpha / 2$), яка показує, що зі

збільшенням розмірів моноліту технологічні втрати зростають і потребують компенсації через оптимізацію висоти уступу.

2. Аналіз умов рівноваги прямокутного моноліту при перекиданні показав, що для висоти блоку 6 м і коефіцієнта тертя $\mu=0,4$ перехід від режиму перекидання до режиму ковзання відбувається при ширині понад 4,8 м ($b > 2\mu H$). При ширині до 4,8 м у всіх розглянутих випадках сила, необхідна для перекидання, є меншою за силу для ковзання, що підтверджує пріоритет перекидання як механізму відділення моноліту.

3. Встановлено, що динамічне напруження в моноліті під час удару об робочий майданчик визначається формулою $\sigma = 2,72\sqrt{\rho E h}$ і залежить виключно від висоти моноліту: зі збільшенням висоти з 3 до 6 м динамічне напруження перевищує границю міцності каменю на розтяг (8 МПа), що є критерієм появи технологічних тріщин. Зміна ширини та довжини моноліту не впливає на величину динамічного напруження σ .

4. Доведено, що ширина моноліту не впливає на силу удару і динамічне напруження ($P_1=P_2=P_3$, $\sigma_1=\sigma_2=\sigma_3$), оскільки збільшення тривалості удару при зростанні ширини компенсує зростання імпульсу. Натомість збільшення довжини моноліту пропорційно збільшує імпульс і силу удару, проте напруга σ залишається незмінною, бо зростання сили компенсується відповідним збільшенням площі контакту.

5. На основі отриманих закономірностей обґрунтовано, що регулювання технологічних втрат при перекиданні моноліту слід здійснювати насамперед через управління висотою уступу, оскільки саме цей параметр є єдиним визначальним чинником динамічного напруження. Застосування амортизаційних підсіпок дозволяє зменшити ефективну висоту падіння і тим самим знизити ризик утворення тріщин.

Розділ 4. ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ КАНАТНОГО РІЗАННЯ З УРАХУВАННЯМ РОЗМІРНО-ГЕОМЕТРИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК БЛОКУ

4.1. Вплив геометричних параметрів моноліту на процес канатного різання

Різання природного каменю є одним із ключових технологічних процесів у добувній та обробній промисловості. Сучасні методи видобутку передбачають застосування високотехнологічних інструментів, зокрема алмазно-канатних пилок, які забезпечують високу точність, мінімізацію втрат матеріалу та оптимальне використання ресурсів. Однак ефективність цього процесу значною мірою залежить від геометричних характеристик моноліту, динаміки контакту інструмента з породою та механічних властивостей матеріалу.

Важливим аспектом аналізу різального процесу є визначення форми та траєкторії ліній різку, що формуються під впливом нормального погонного тиску та кінематичних параметрів системи. Використання варіаційних методів і диференціальних рівнянь рівноваги дозволяє побудувати математичні моделі, які описують залежність довжини контакту інструмента від переміщення візка пилки. Це дає можливість не лише прогнозувати ефективність різання, а й оптимізувати технологічні параметри для мінімізації втрат природного каменю.

У роботі [36], використовуючи принцип можливих переміщень і варіаційні методи, було визначено форму гнучкого ріжучого інструмента в стані рівноваги. Результати розв'язання диференціальних рівнянь рівноваги засвідчили, що геометрія ліній різку визначається траєкторіями рівного нормального погонного тиску $f_n = b \cdot \sigma_t = \text{const}$, де b – ширина пропилу.

У цій роботі розглядається вплив форми моноліту на геометрію ліній різку та довжину контакту ріжучого інструмента в різні моменти процесу різання. Процес різання умовно поділяється на два етапи. Перший – початковий етап формування пропилу, який завершується в момент, коли верхні кутові ділянки пропилу зникаються приблизно в середній частині довжини моноліту,

утворюючи єдину зону (рис. 4.1). Цей момент визначається умовою (9). Незалежно від форми моноліту – витягнутого по горизонталі або вертикалі прямокутника чи квадрата – початкове різання завершується саме в цьому положенні.

Другий етап – стаціонарне різання – настає у випадку, коли моноліт має форму витягнутого в горизонтальному напрямку прямокутника. У цьому режимі роботи канатної пилки переміщення візка становитиме відповідну величину, яка визначається за формулою:

$$L_{\text{пер}} = 0,5(L - H), \text{ м.}$$

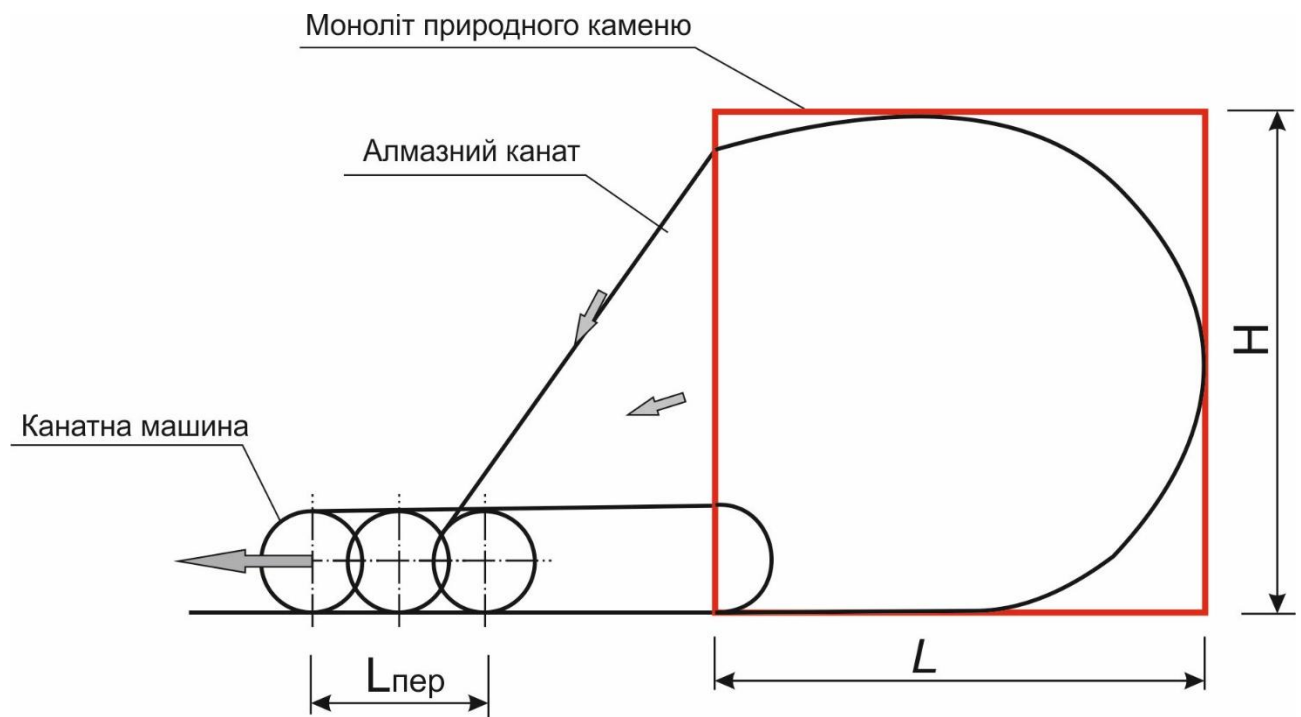


Рис. 4.1. Геометрична форма моноліту

На підставі визначених геометричних параметрів, що характеризують лінії різку на різних стадіях різання, стає можливим обчислити площу пропилу як між суміжними ізолініями, так і сумарну площу від початку процесу різання. На

рис. 4.2 відображено зміну довжини контакту канатної пилки з монолітом (вісь ординат) у залежності від переміщення візка (вісь абсцис).

Спочатку (біля 2 м переміщення) довжина контакту становить приблизно 4 м, потім при незначному збільшенні переміщення до 2,7 м вона різко зростає до 10 м. Такий стрибок може пояснюватися тим, що інструмент входить у більшу площу моноліту, формуючи ширший пропил.

Подальше зростання переміщення візка призводить до поступового зменшення довжини контакту: від 10 м вона падає до 8 м (при 4 м руху), далі до 6 м (5 м руху), 5 м (6 м руху) і так далі – аж до 1 м при 8 м переміщення. Це зниження свідчить про те, що під час розпилювання моноліту змінюється геометрія взаємодії інструмента з породою, і, наближаючись до кінця пропилю, активна ділянка контакту постійно скорочується.



Рис. 4.2. Залежність зміни довжини контакту інструмента з породою (тобто довжини лінії різку) від переміщення візка канатної пилки

Таким чином для різання площини моноліту з висотою 6 м та довжиною 3 м алмазна машина від’їде від моноліту майже на 8 м. Отже розмір моноліту безпосередньо впливає на розміри робочого майданчику на якому розміщено напрямні рейки канатної машини. Якщо розмір робочого майданчуку дозволяє

нарощувати рейки для канатної машини в цьому випадку не потрібно скорочувати довжину контуру каната. В іншому випадку скорочують контур канату коли канатна машина від'їжджає на максимальну відстань. Після скорочення канату канатна машина повертається в початкове положення і продовжується процес різання моноліту.

Дослідження процесу алмазно-канатного різання природного каменю підтвердило значну залежність ефективності цього методу від геометричних параметрів моноліту та кінематичних характеристик ріжучого інструмента. Визначено, що форма моноліту безпосередньо впливає на траєкторію різу, а також на довжину контакту канатної пилки з матеріалом, що змінюється в процесі різання.

Отримані результати мають практичне значення для оптимізації технологічних параметрів процесу різання. Вони можуть бути використані для підвищення продуктивності, зниження питомих втрат каменю та вдосконалення управління різальним процесом. Використання точних математичних моделей сприятиме більш ефективному проектуванню технологічних операцій у кар'єрному видобутку та обробці природного каменю, що, своєю чергою, позитивно вплине на загальну економічну ефективність галузі.

4.2. Дослідження впливу параметрів робочої зони та технології підготовки горизонтів на потенційну виробничу потужність кар'єру

Технологія розкриття та підготовки робочих горизонтів родовищ міцного природного каменю тісно пов'язана із застосуванням методів відокремлення каменю від масиву, а також вибором транспортного та видобувно-навантажувального обладнання. Від цих факторів залежить інтенсивність гірничих робіт, яка, у свою чергу, визначає собівартість товарних блоків природного каменю. На родовищах облицювального каменю ключовим є питання впливу параметрів робочої зони та обраних методів підготовки горизонтів на загальну продуктивність кар'єру.

Швидкість зниження рівня гірничих робіт та загальна продуктивність кар'єру значною мірою залежать від обраного способу підготовки горизонту, технологічних процесів та організації робіт. Траншейна підготовка передбачає виконання комплексу заходів, спрямованих на забезпечення оптимальних умов для ефективної, безпечної та безперебійної роботи видобувного обладнання.

Цей процес включає створення під'їзних шляхів, облаштування транспортувальних і робочих зон, а також формування стійких укосів і платформ. Завдяки правильному плануванню траншейна підготовка сприяє мінімізації втрат видобувного матеріалу та забезпечує належний рівень продуктивності кар'єру.

Інтервал часу між початком траншейної підготовки суміжних горизонтів визначається низкою факторів, серед яких:

- Темпи видобутку на попередньому горизонті, що впливають на швидкість його відпрацювання.
- Технічні можливості обладнання, яке задіяне для підготовки та видобутку.
- Обсяг підготовчих робіт, необхідних для створення безпечних умов експлуатації нового горизонту.
- Рівень організації робіт, який визначає ефективність виконання послідовних операцій.
- Геологічні умови, що можуть збільшувати або зменшувати тривалість підготовчих робіт (наприклад, складність розкривних операцій, тип породи та її стабільність).

Зазвичай цей інтервал оптимізують, щоб уникнути простоїв у роботі кар'єру, забезпечити безперервність видобутку та максимально ефективно використовувати технічні й людські ресурси.

Цей інтервал визначається за формулою:

$$I = I_{\text{роз}} + I_{\text{тр}} + I_{\text{роз.тр.}}$$

де $I_{роз}$ – ривалість робіт, спрямованих на розширення бортів траншеї вищого горизонту для облаштування робочого майданчика потрібної ширини, роки; $I_{тр}$ – Час проходження розкривної траншеї, роки; $I_{роз.тр.}$ – Час проходження розрізної траншеї, роки.

Траншейна підготовка є однією з найбільш трудомістких технологій, оскільки вимагає виконання похилої виробки (рис. 4.3). Під час проведення робіт із відокремлення об'єму каменю від масиву висотна відмітка підосви повинна відповідати відмітці виробки на відповідній ділянці. Це забезпечується шляхом нахилу площини відокремлення каменю у бік проходки виробки, що дозволяє оптимізувати процес видобутку та забезпечити стійкість конструкцій. Такий підхід сприяє створенню умов для ефективної роботи обладнання та підвищує продуктивність процесу.

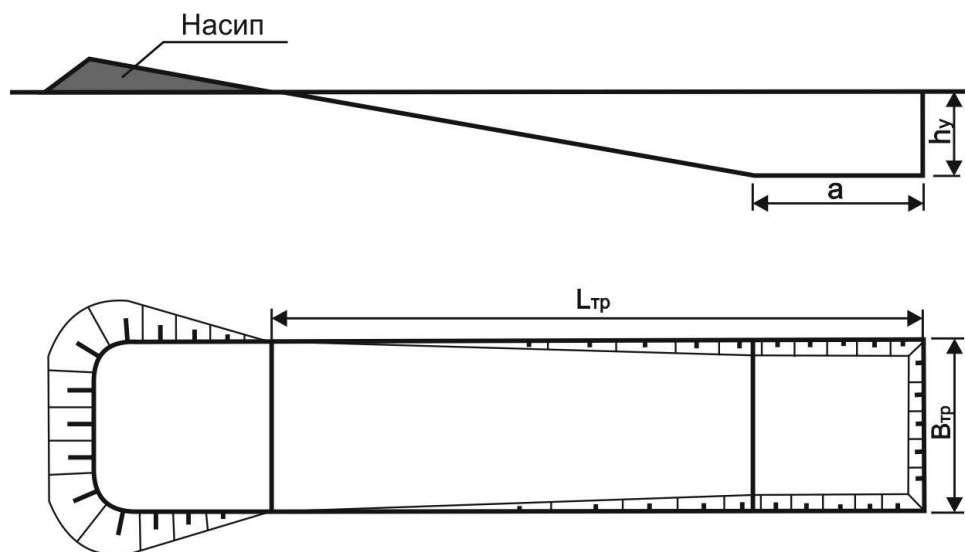


Рис. 4.3. Вигляд капітальної траншеї

Відповідно до законодавства окремих європейських країн, ухил з'їзду повинен відповідати певним нормативам, які обмежують його максимальне співвідношення висоти до довжини на рівні 1:7. Це співвідношення еквівалентне ухилу в 140 %. Дотримання таких вимог забезпечує безпеку транспортування вантажів і пересування техніки на кар'єрах та інших об'єктах.

Діючий СНиП 2.05.07-91 «Промышленный транспорт» обмежує ухили транспортних з'їздів для повнопривідного транспорту в важких умовах 200 проміле. Таким чином, доцільно здійснювати розкриття блочного кар'єру двома типами автомобільних з'їздів. В верхній частині кар'єру для розкривних робіт влаштовуються капітальні траншеї з ухилом 80–100 проміле, а в нижній частині створюються крутонахилені транспортні з'їзди з ухилами до 200 проміле. Такі ухили здатні долати фронтальні навантажувачі, які є основним транспортом на невеликих блочних кар'єрах. Фронтальні навантажувачі здатні долати ухили до 300 проміле. Ухили до 200 проміле здатні долати повнопривідні самоскиди з шарнірно-зчленованою рамою САТ 740 з вантажопідйомністю 38 т. Таким чином довжина капітальної траншеї в міцних гірських породах при максимальній висоті уступу 6 м будуть складати 30 м при ухилі 200 ‰.

Ширина капітальної траншеї залежить від габаритних розмірів транспорту, який рухається по цій траншеї. Основним транспортом є фронтальні навантажувачі, тому їх габаритні розміри впливають на ширину капітальної траншеї. Ширина найпоширеніших фронтальних навантажувачів по шинах, без урахування додаткового обладнання (ковшів більшої ширини тощо) наступна:

- САТ 962Н: ~2,80 м;
- САТ 966Н: ~3,00–3,05 м;
- САТ 972Н: ~3,10–3,15 м;
- САТ 980Н: ~3,25–3,30 м.

Для одностороннього (односмугового) руху великогабаритної техніки в траншеї глибиною 6 м зазвичай рекомендують не менше 0,5–1,0 м від краю колеса (або ковша) до стінки. У твердому граніті, де стінки можуть бути практично вертикальними та стійкими, можна зменшувати цей зазор, проте це знижує маневреність і безпеку. Задля комфортної роботи водія та зниження ризику контакту зі стінкою рекомендують 1,0 м із кожного боку.

Таким чином ширина по низу капітальної траншеї складе:

$$B_{\text{тр}} = B_{\text{ф.н.}} + 2B_{\text{заз}}, \text{ м,}$$

де $B_{ф.н.}$ – ширина фронтального навантажувача, м; $B_{заз}$ – зазор безпеки між фронтальним навантажувачем і траншеєю 1 м.

Таким чином мінімальна ширина капітальної траншеї складе (для односмугового руху):

- САТ 962Н: –4,8 м;
- САТ 966Н – 5,1 м;
- САТ 972Н – 5,2 м;
- САТ 980Н – 5,3 м.

Для автосамоскиду САТ 740 мінімальна ширина траншеї складе 5,5 м.

Часові витрати на розширення бортів траншеї для створення робочого майданчика ($Ш_{рп}$) можна розрахувати за допомогою такої формули:

$$I_{тр} = I_{гор.част} + I_{пох.част} + I_{насип.}, \text{ год.}$$

де $I_{гор.част}$ – час проведення горизонтальної частини, год; $I_{пох.част}$ – час проведення похилої частини, год; $I_{насип.}$ – час утворення насипу, год.

При траншейному способі підготовки застосовується спеціалізований комплекс обладнання, що включає канатно-алмазну пилку та бурову установку, розроблену для ефективного відокремлення природного каменю від масиву.

Розрізну траншею рекомендовано проходити паралельно до поздовжніх тріщин S , а врубів – уздовж поперечних тріщин Q . Відколювання моноліту або блоку слід здійснювати так, щоб його довша сторона була орієнтована паралельно до поздовжніх тріщин S .

Експериментальні дослідження показали, що розрізні та врубіві траншеї необхідно прокладати між вертикальними тріщинами однієї головної системи.

Сновні вимоги до проходки траншей:

- Закладення гирла траншеї слід проводити в місцях із великою відстанню між тріщинами ($N_{\gamma} > N_3$), що дозволяє зменшувати ширину фронту траншеї в процесі робіт.

- Початковий нахил первинно-пластової тріщини у напрямку проходження траншеї має бути позитивним (кут α зі знаком «+» щодо нульового горизонту).

- Розкриття вертикальних тріщин (у цьому випадку Q) повинно виконуватися так, щоб вони могли поглинати енергію вибуху, запобігаючи її поширенню на масив, який підлягає видобутку.

- Ширина ділянки між тріщинами повинна забезпечувати можливість виконання навантажувально-виймальних робіт під час проходки траншеї.

Закладення траншей бажано здійснювати на ділянках із нижчою якістю каменю, що характеризується щільною мережею вертикальних тріщин. Проте, на практиці вибір таких ділянок може бути обмеженим.

Проведення капітальних траншей рекомендується проводити за допомогою канатних верстатів. Це виключе вплив вибухових речовин на цілісність масиву гірських порід. Для цього використовується канатно-алмазна каменерізальна машина, комбінований пневматичний верстат для буріння горизонтальних, похилих та вертикальних свердловин діаметром $D = 85$ мм, верстат строчного буріння для свердловин діаметром $D = 36\text{--}43$ мм, гідродомкратна установка та домкрати з ходом штоку 70 та 220 мм.

План бурових свердловин для проведення капітальної траншеї наведено на рис. 4.4. Капітальна траншея має розміри: ширина – 8 м, довжина – 18 м, глибина – 6 м. Випилювання траншеї починається із буріння похилих свердловин на всю довжину капітальної траншеї позначені зеленим та синім кольором на рис. 4.4.

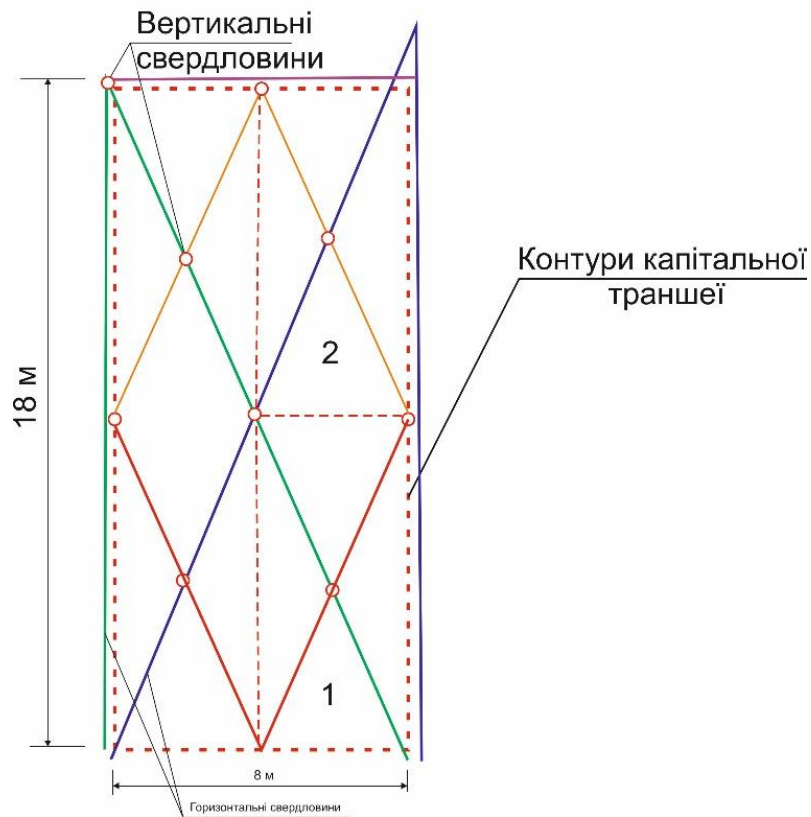


Рис. 4.4. Схема розміщення свердловин при продженні капітальних траншей

Далі бурять похилі свердловини, які позначені червоним кольором. Після буріння свердловин заводять алмазний канат та випилюють підшову капітальної траншеї. Бурять вертикальні свердловини і заводять алмазний канат для різання вертикальних площин. При цьому періодичність випилювання масиву може бути епізодичною, але слід прагнути до того, щоб одна похила вертикальна поверхня завжди залишалася вільною. Після заглиблення траншеї на задану глибину (4–6 м – оптимальний варіант) виконується розворот усього обладнання на 180 градусів. Далі, за тією ж технологією, здійснюється випилювання траншеї у зворотному напрямку

Розрахунки проводилися зі змінними параметрами висоти уступу. У результаті було встановлено, що збільшення висоти уступу та міцності матеріалу призводить до зростання витрат часу на проходку траншеї (рис. 4.5). Це

пояснюється необхідністю пропорційного збільшення інших параметрів траншеї, таких як довжина та ширина, що ускладнює виконання робіт.

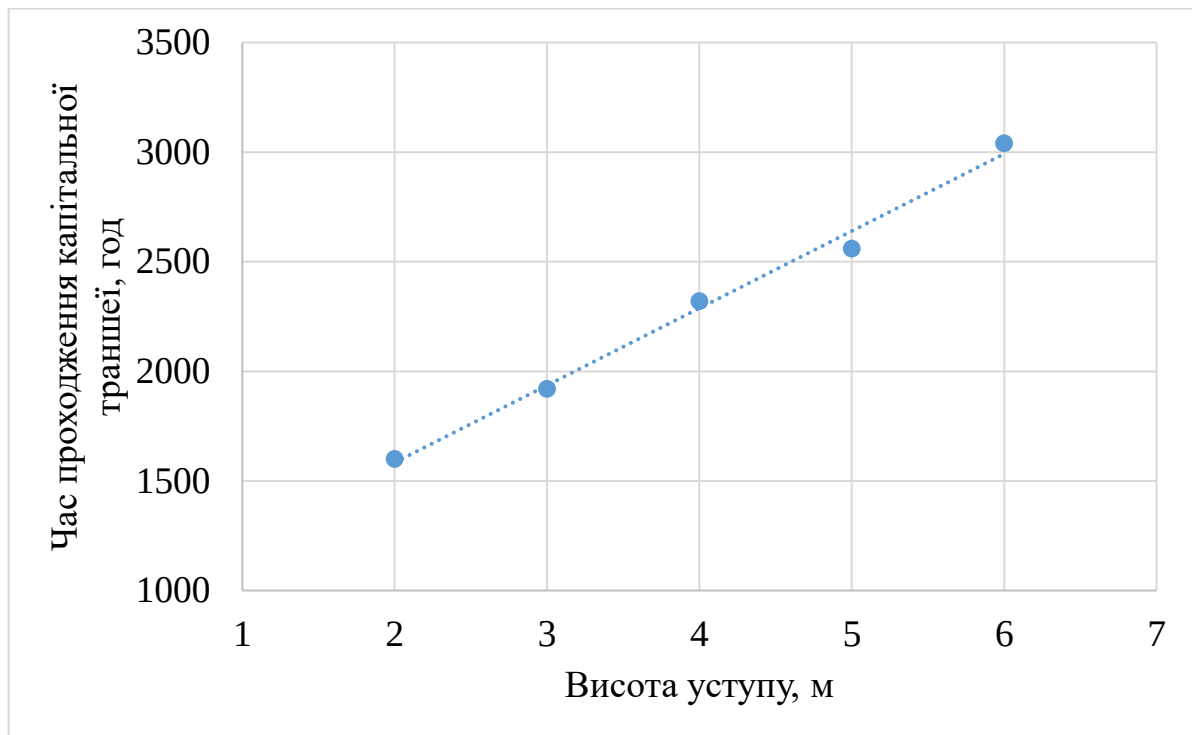


Рис. 4.5. Залежність часу проходження капітальної траншеї від висоти уступу

Для розширення бортів траншеї може бути застосована технологія, аналогічна до тієї, яка використовується при її проходці (рис. 4.6). При цьому збільшення висоти уступу під час розширення бортів сприяє скороченню часу на підготовчо-заклучні операції, включаючи проходку розрізної та допоміжних траншей. Такий підхід дозволяє оптимізувати робочий процес і забезпечити ефективне використання ресурсів.

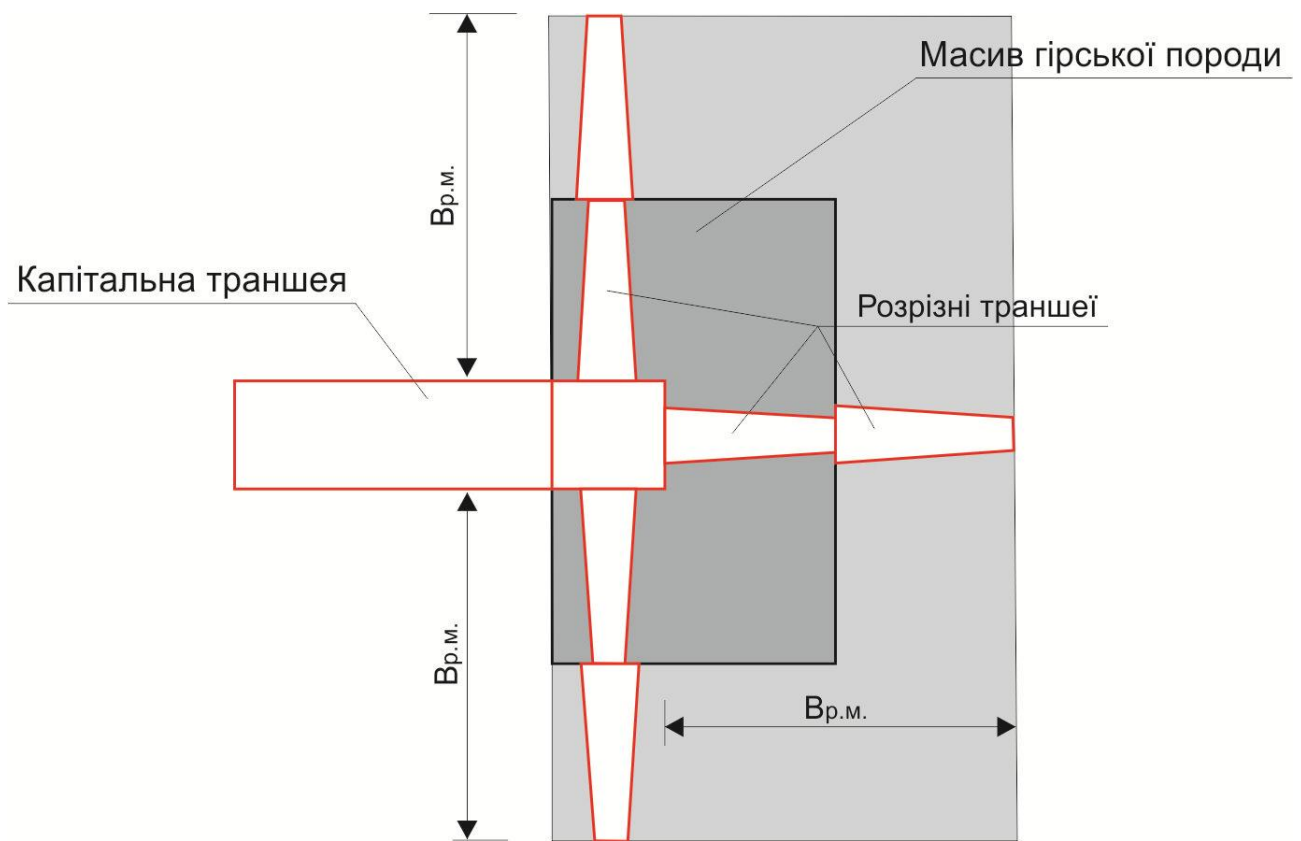


Рис. 4.6. Схема розміщення розвитку гірничих робіт при утворенні робочого майданчику

Процес проведення капітальних траншей є однією з найбільших потенційних проблем у кар'єрах природного каменю. Проведення капітальних траншей використовується для розкриття робочого уступу кар'єру та формування нових видобувних горизонтів. Це операція, під час якої принаймні три поверхні відокремлюються, щоб надати початок фронту гірничих робіт в робочій зоні кар'єру.

Технологію проведення гірничих робіт визначає висота та ширина уступу в кар'єрі природного декоративного каменю. Вибір відповідних розмірів і напрямків розрізних траншей є важливим для планування кар'єру та підвищення його продуктивності. Властивості гірської породи, такі як тріщинуватість, нашарування та ламінування, а також її топографія безпосередньо впливають на розміри та напрямок розрізної траншеї. Розрізні траншеї проводяться двома

методами (рис. 4.7): у формі U (трапеціями) та у формі V (трикутниками). На рисунку 3 зображено процес проведення розрізних траншей V і U способами із застосуванням методу різання алмазним канатом.

Проведення капітальних траншей у формі V (у вигляді трикутника) широко застосовується в кар'єрах природного каменю під час запуску видобутку. Перевагами цього методу є низька початкова вартість інвестицій та легкість застосування. Проте цей метод не є ефективним для правильного формування уступів під час планування кар'єру.

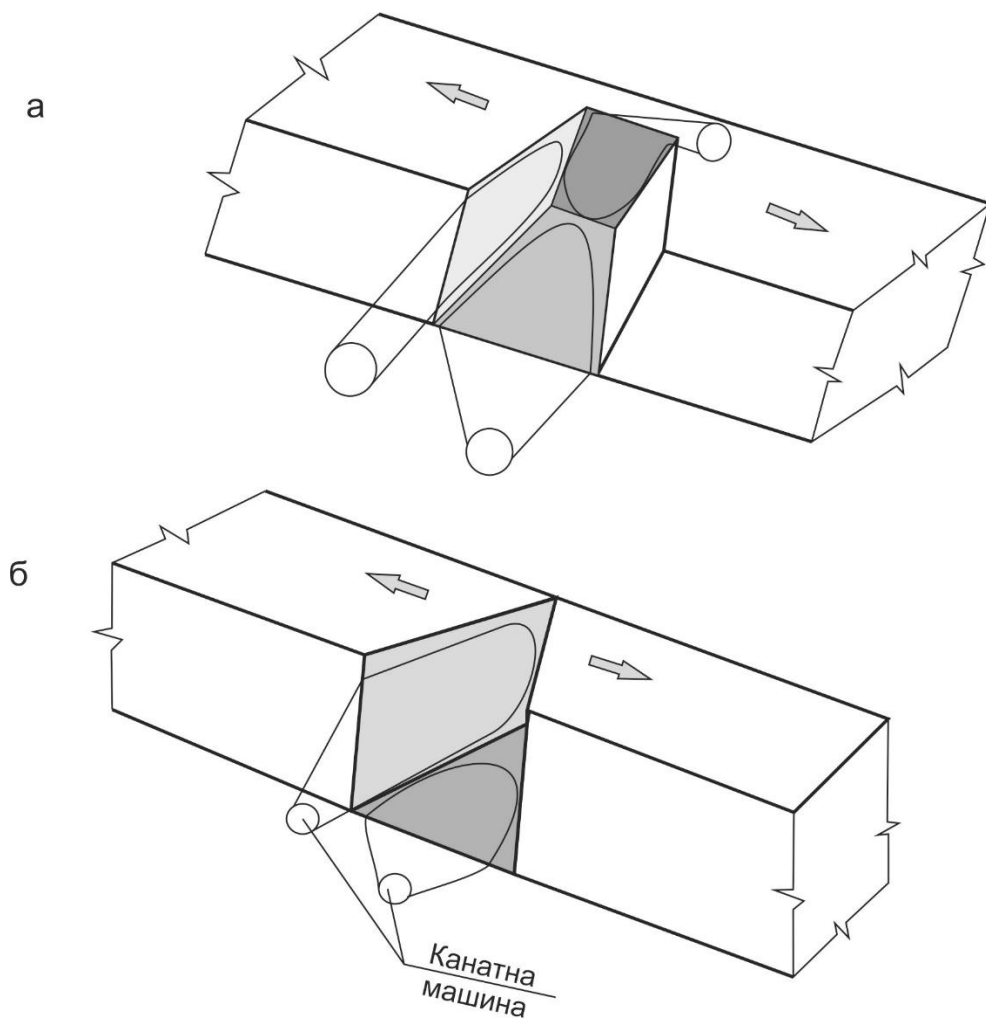


Рис. 4.7. Методи проведення розрізних траншей в блочних кар'єрах: а – форма траншеї U (трапеція); б – форма траншеї V (трикутна)

При проходженні капітальної траншеї у вигляді трикутника складно отримати необхідну кількість блоків із бажаними характеристиками. Головна причина полягає в тому, що гірнича маса, яка отримана після проведення капітальної траншеї, має трикутну форму і лише три відокремлені поверхні. Через це неможливо сформувати уступи потрібних розмірів і форм, що призводить до виробничих втрат і збільшення часу. Після розрізання трьох поверхонь маса у формі V (рис. 4.8) перевертається за допомогою гідравлічних подушок для монолітів.

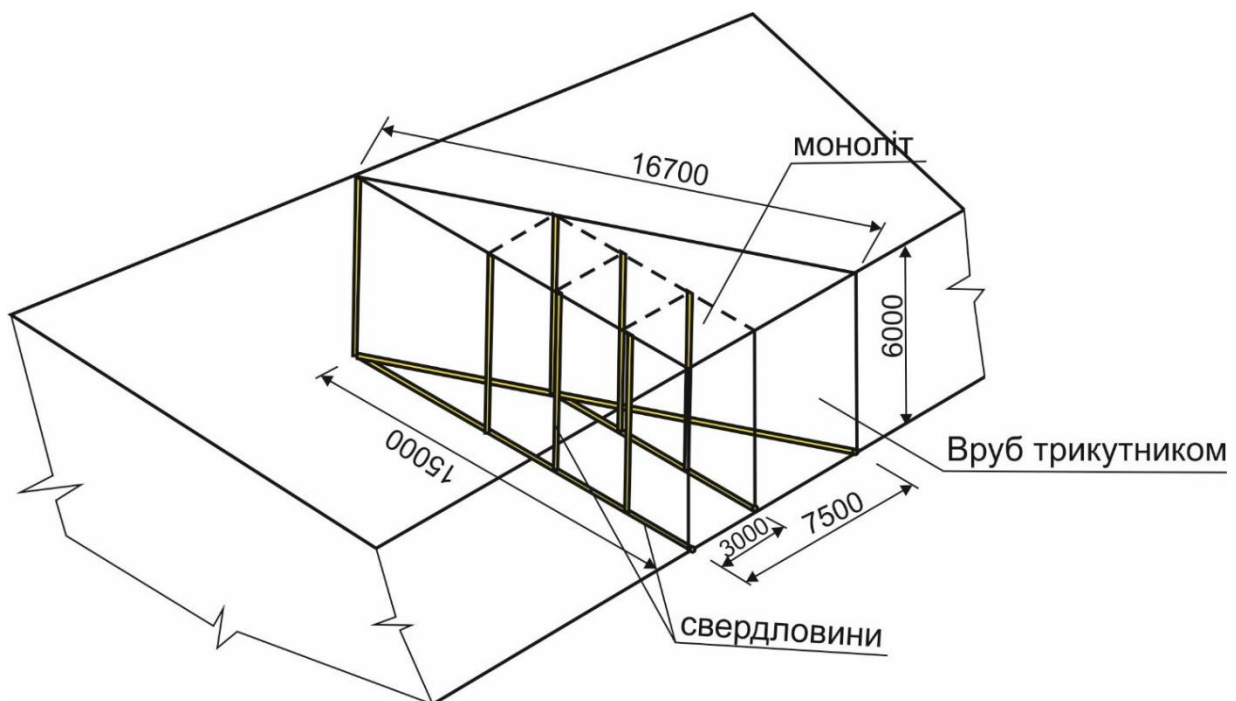


Рис. 4.8. Схема розташування свердловин, при проведенні трикутної форми розрізної траншеї

Процес проведення розрізної траншеї у вигляді трапеції (рис. 4.9) залежить від наявного видобувного обладнання. Вид є більш ефективним, оскільки забезпечує правильне формування уступу на етапі планування кар'єру. Технологія проведення розрізної траншеї включає в себе супутнє видобування блоків природного каменю.

Вихід блоків є вищий за цим методом вищий ніж у попереднього методу. Виробничі втрати та втрати часу через складності у формуванні фронту робіт на уступі є мінімальними. За даним методом різання алмазним канатом є складніше, що потребує більше часу.

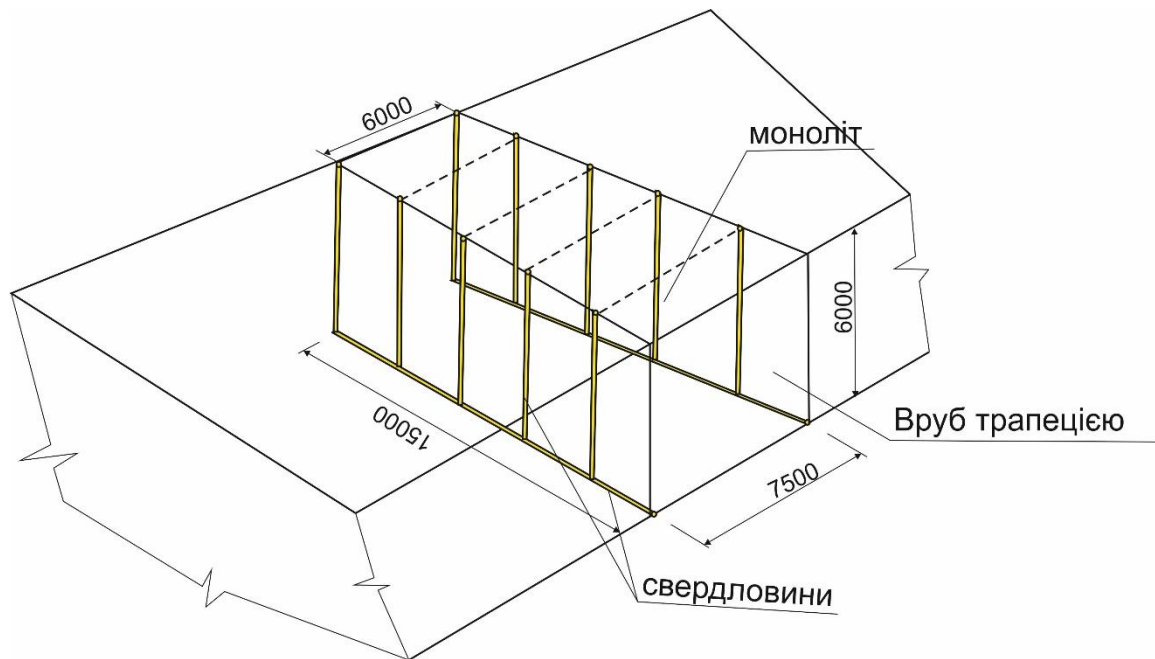


Рис. 4.9. Схема розташування свердловин, при проведенні трапецевидної форми розрізної траншеї

Спочатку виконується різання тильної вертикальної частини моноліту, після чого проводиться горизонтальне різання за допомогою алмазно-канатної машини. Далі виконуються поперечні різи, а завершальним етапом є вирізання бокових частин блоку.

Вертикальні різи з тильного боку за допомогою алмазно-канатної машини є одним із найбільш складних етапів різання. Цей метод використовується вкрай рідко і, як правило, лише досвідченими операторами через його технічну складність. Він найбільш доцільний під час створення розрізних траншей для забезпечення цілісності масиву гірських порід, а також у випадках, коли необхідно отримати блоки з особливими характеристиками.

Формування вибою різання при цьому методі здійснюється за допомогою двох вертикально проникаючих шківів (рис. 4.10), які встановлюються в попередньо пробурені свердловини діаметром 240–320 мм.

Геометрія різання в цьому випадку суттєво відрізняється від геометрії горизонтального різання. По-перше, канат не зазнає значного натягу, а фактично штовхається у вибій, що впливає на його стабільність. По-друге, траєкторія його руху примусово змінюється на два рази по 180° : спочатку на 90° вниз у шківів, а потім ще на 90° у поворотних маховиків.

Щоб досягти проектної глибини різання, напрямні блоки необхідно опустити нижче за необхідний рівень різання. Через те, що напрямні блоки не створюють достатнього натягу, швидкість різання при використанні цього методу є на 30–40 % нижчою, ніж у традиційних методах.

Однак є і певні переваги. Зокрема, циркуляція води значно полегшується, оскільки вона природним чином стікає вниз, що сприяє охолодженню та зменшенню тертя. Крім того, цей метод дозволяє працювати зі складними зонами, де застосування інших методів є неможливим, що дає змогу здійснювати так звані "сліпі" різи без необхідності створення додаткового доступу до вибою.

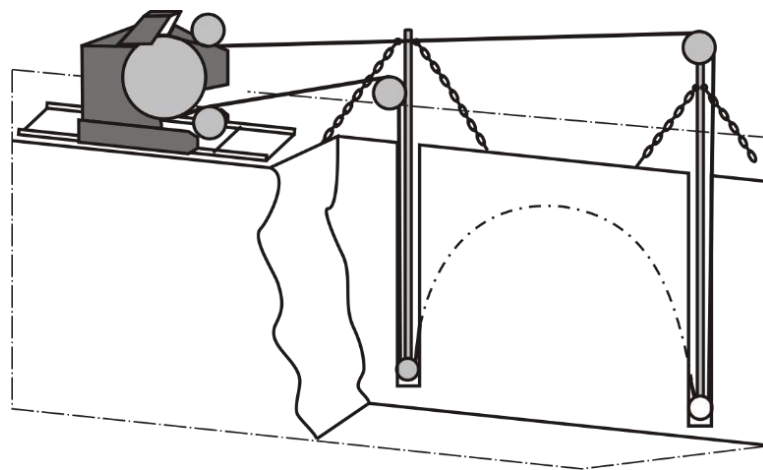


Рис. 4.10. Вертикальний різ с тильної сторони

За цим методом є можливість проводити різання породи тільки з однієї вільної поверхні. Це звільняє оператора від необхідності виконання буріння двох зустрічних свердловин, буріння яких іноді викликає деякі проблеми. Цей метод призводить до підвищеного зношення алмазного канату та потребує спеціального бурового обладнання.

Ще одним методом різання тильної сторони є з'єднання двох свердловин в площині, де буде виконуватись різання. Цей метод здійснюється двома способами (рис. 4.11).

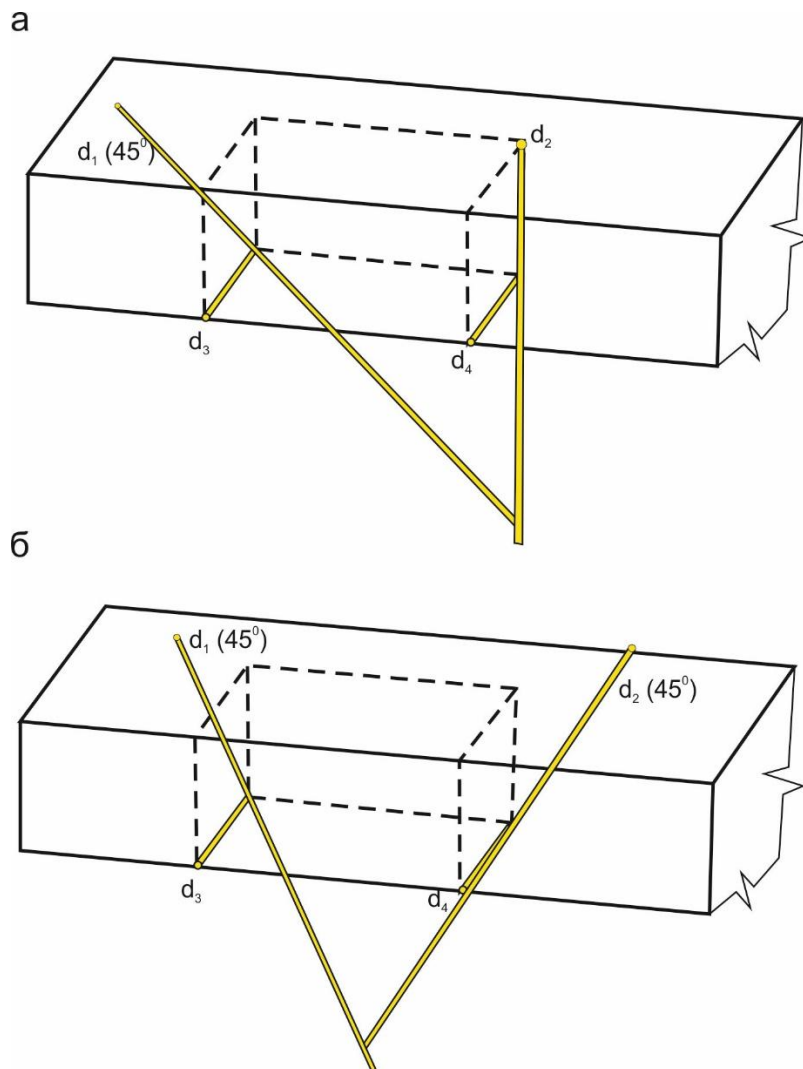


Рис. 4.11. Схема розміщення свердловин при різанні тильної сторони алмазним канатом

При першому способі (рис. 4.11, а) буряться дві похилі свердловини, які з'єднуються таким чином, щоб покрити задню поверхню моноліту. За другого способу (рис. 4.11, а) буряться одна свердловина вертикально інша під кутом, ці свердловини мають бути з'єднані між собою.

При застосуванні методу буріння похилих свердловин можливі відхилення під час виконання робіт. Крім того, цей метод є проблемним через труднощі з видаленням шламу, що утворюється в процесі різання.

Методи проведення розрізних траншей були порівняні на Лезниківському кар'єрі.

Відповідно до отриманих даних, метод проведення розрізної траншеї трапецевидної форми виявився більш вигідним порівняно з методом трикутної форми (рис. 4.12).

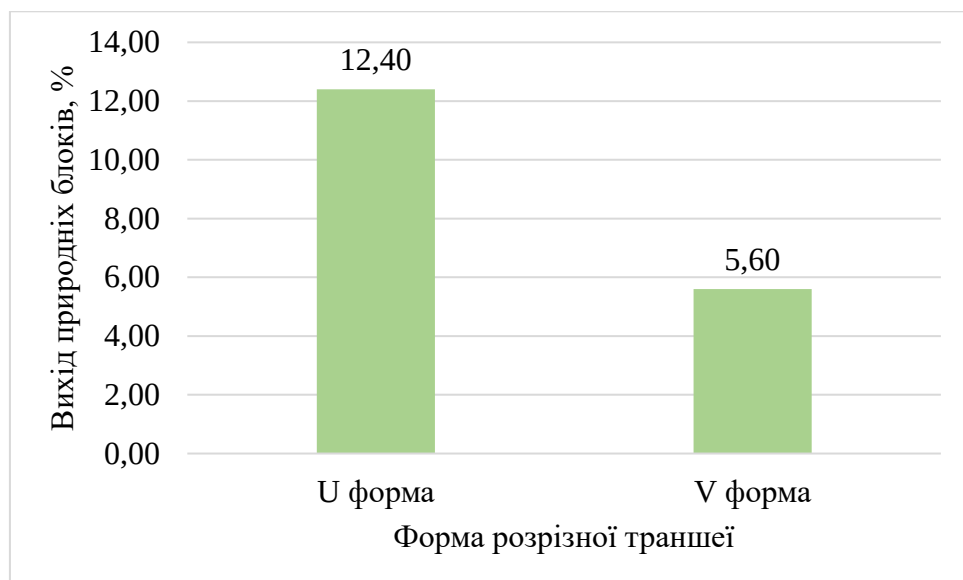


Рис. 4.12. Порівняльний аналіз виходу блоків при проведенні розрізних траншей

Дані показують (рис. 4.13), що при використанні проведені розрізної траншеї витрати часу на її проведення зменшуються на 63,4 % ніж для проведення розрізної траншеї трапецевидної форми.

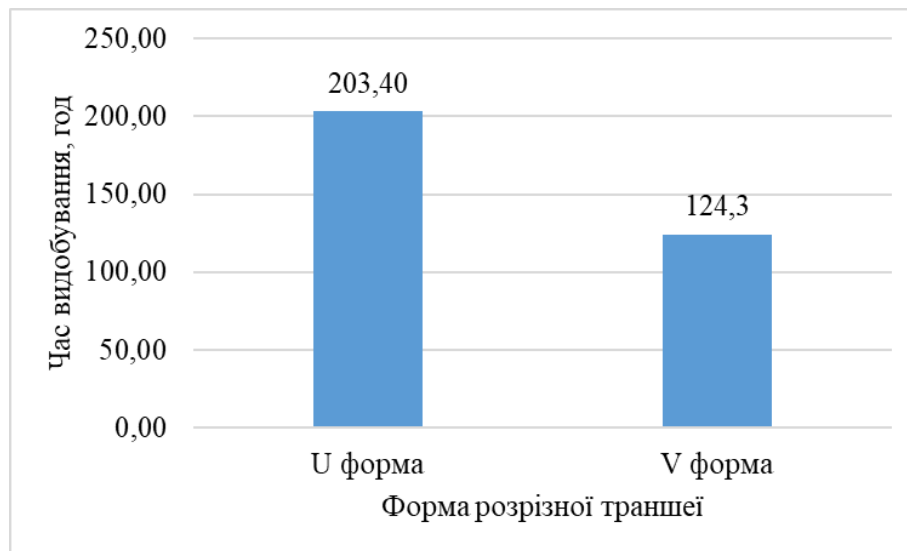


Рис. 4.13. Порівняльний аналіз часу на проведення розрізних траншей

Ширина робочого майданчику $V_{p.m.}$ буде залежити від обладнання, яке використовується для видобутку блочної сировини. Одним із найгабаритнішого обладнання є фронтальний навантажувач. Для видобування блоків природного каменю використовуються фронтальні навантажувачі з вантажопідйомністю 20–40 т. Саме тому мінімальний розмір робочого майданчику буде визначатися за формулою:

$$V_{p.m.} = 2R_{пов} + V_{нав} + 2V_{без}, \text{ м},$$

де $R_{пов}$ – радіус повороту фронтального навантажувача, м; $V_{нав}$ – ширина фронтального навантажувача, м, $V_{без}$ – запас безпеки 1,5 м.

В даному дослідженні розглянуто фронтальні навантажувачі Caterpillar (CAT) через їхню високу надійність, широкий асортимент моделей та поширеність на блочних кар'єрах. У цьому порівнянні розглянемо чотири моделі від Caterpillar: CAT 962H, CAT 966H, CAT 972H та CAT 980H, основні технічні характеристики наведено в табл. 4.1

Таблиця 4.1

Технічні характеристики фронтальних навантажувачів САТ

Характеристика	САТ 962Н		САТ 966Н	САТ 972Н	САТ 980Н
Вантажопідйомність	до 23 тонн		до 25 тонн	до 30 тонн	до 35 тонн
Довжина	9		9	10	10
Ширина	2,6		2,7	2,7	3
Радіус	5,2		5,5	6,0	6,5

Таким чином можемо отримати залежність (рис. 4.14) ширини робочого майданчуку від вантажопід'ємності фронтальних навантажувачів.

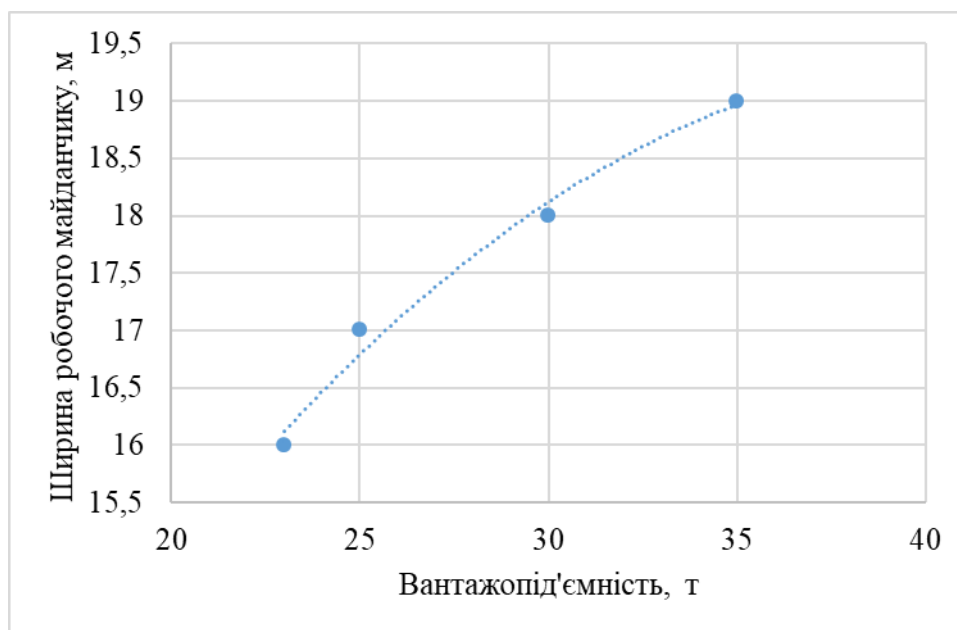


Рис. 4.14. Залежність ширини робочого майданчуку від вантажопід'ємності фронтального навантажувача фірми САТ

Таким чином, ширина робочого майданчуку для фронтальних навантажувачів фірми САТ коливається від 16 до 19 м.

Мінімальна ширина капітальної траншеї має бути 8 м для проїзду фронтального навантажувача.

Швидкість зниження рівня гірничих робіт значною мірою визначається висотою уступу та обраним методом підготовки горизонту (рис. 4.15).

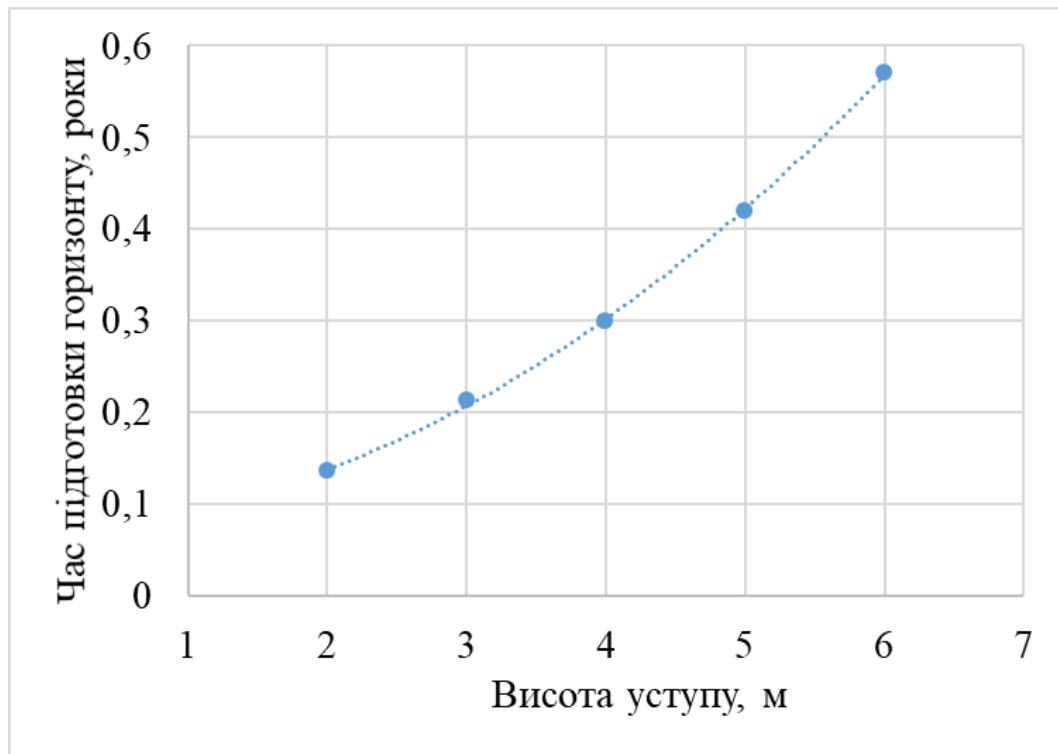


Рис. 4.15. Залежність часу підготовки горизонту від висоти уступу

Швидкість зниження рівня гірничих робіт значною мірою визначається висотою уступу та обраним методом підготовки горизонту. Зі збільшенням горизонтальної робочої зони пропорційно зростає довжина фронту гірничих робіт, що безпосередньо впливає на кількість задіяних видобувних комплексів. Це, у свою чергу, сприяє зміні продуктивності кар'єру за обсягом гірничої маси, яка видобувається (рис. 4.16). Таким чином, оптимізація параметрів робочої зони дозволяє забезпечити підвищення ефективності виробничого процесу.

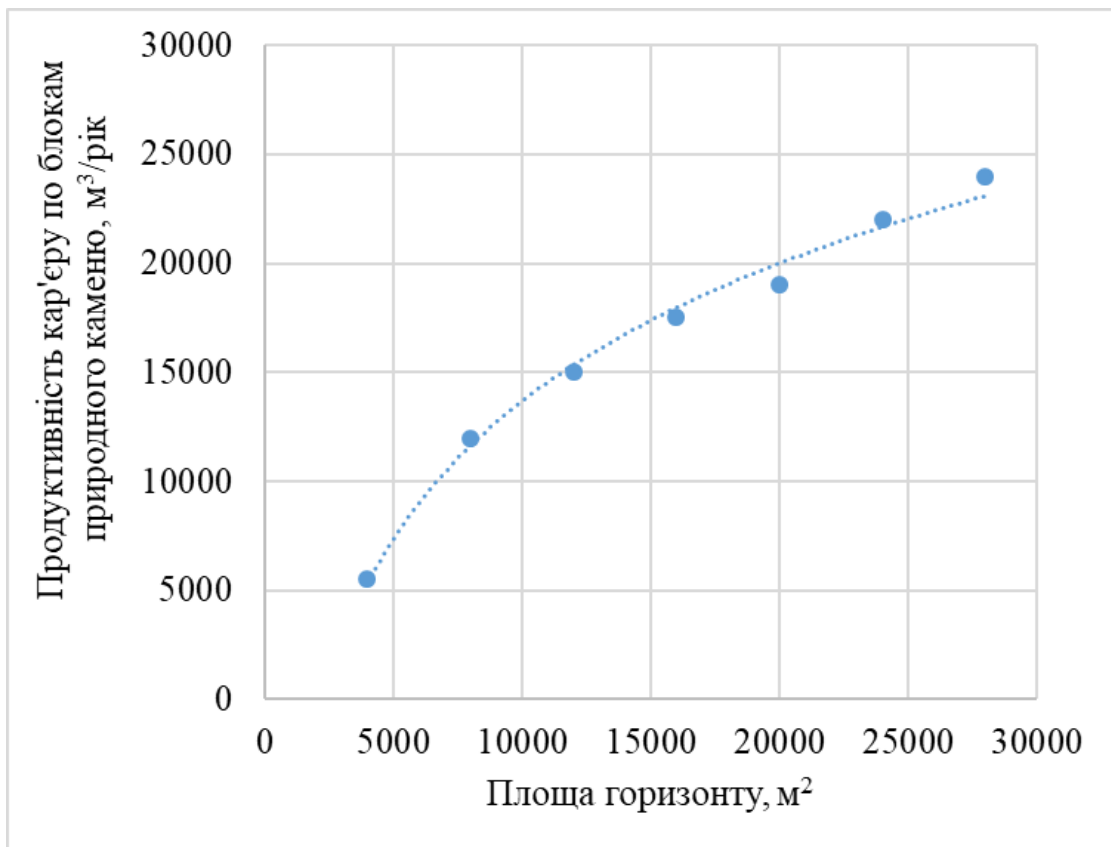


Рис. 4.16. Залежність продуктивності кар'єру від площі горизонту

Застосування алмазно-канатного різання значно підвищило якість видобутих блоків і збільшило обсяги виробництва. Наявність затверджених запасів, висока декоративна цінність каменю, впровадження ефективної канатної технології та стабільні обсяги видобутку забезпечують вихід кар'єру на глобальний ринок.

Родовища декоративного природного каменю України мають подвійну або потрійну систему тріщин, що створює певні труднощі у їх розробці. Схема розкриття та розробки горизонтів, показала, що впровадження технології видобутку з використанням алмазно-канатних машин дозволяє вести роботи з витратами, які забезпечують рентабельність та високу якість видобутого сировини навіть на складних за геологією родовищах.

Розкриття нижніх горизонтів без використання буровибухових робіт виконується двостадійною або тристадійною технологією видобутку блоків природного каменю.

При видобутку блоків у три стадії (рис. 4.17) форма первинного моноліту залежить від розмірів робочого майданчику та можливості розмістити алмазно-канатну машину. Класичною схемою видобутку є вирізання моноліту розмірами: довжина – 6 м, висота – 6 м, ширина – 2–3 м.

Для цього горизонтально пробурюються дві свердловини за допомогою бурової установки: одна завдовжки 6 м, інша – поперечна, завдовжки 2–3 м, діаметром 85 мм. Свердловини бурять так, щоб вони зустрілися в заданих точках, визначених за допомогою теодоліта або нівеліра. Потім на перетині цих свердловин за допомогою теодоліта та рулетки зверху визначають точну позицію для подальших операцій.

Визначається точка перетину свердловин, після чого за допомогою вертикальної бурової установки пробурюється свердловина діаметром 85 мм і висотою 6 м до точного з'єднання з обома горизонтальними свердловинами. Машина встановлюється за рівнем, з поворотом робочого шківa для горизонтального різy. Через поздовжню та поперечну свердловини протягується шнур. До шнура прив'язується алмазний канат довжиною $L = 30$ м.п., за допомогою якого виконується горизонтальний пропил площею $S = 6 \times 3 = 18$ м².

Таким самим чином заводиться канат на поздовжнє різання через поздовжню та горизонтальну свердловини з площею різання 36 м², довжина каната 30 м.п., при цьому здійснюється поздовжній пропил. Потім проводиться пропил поперечний. Таким чином отримуємо моноліт висотою та довжиною 6 м, шириною 2–3 м.

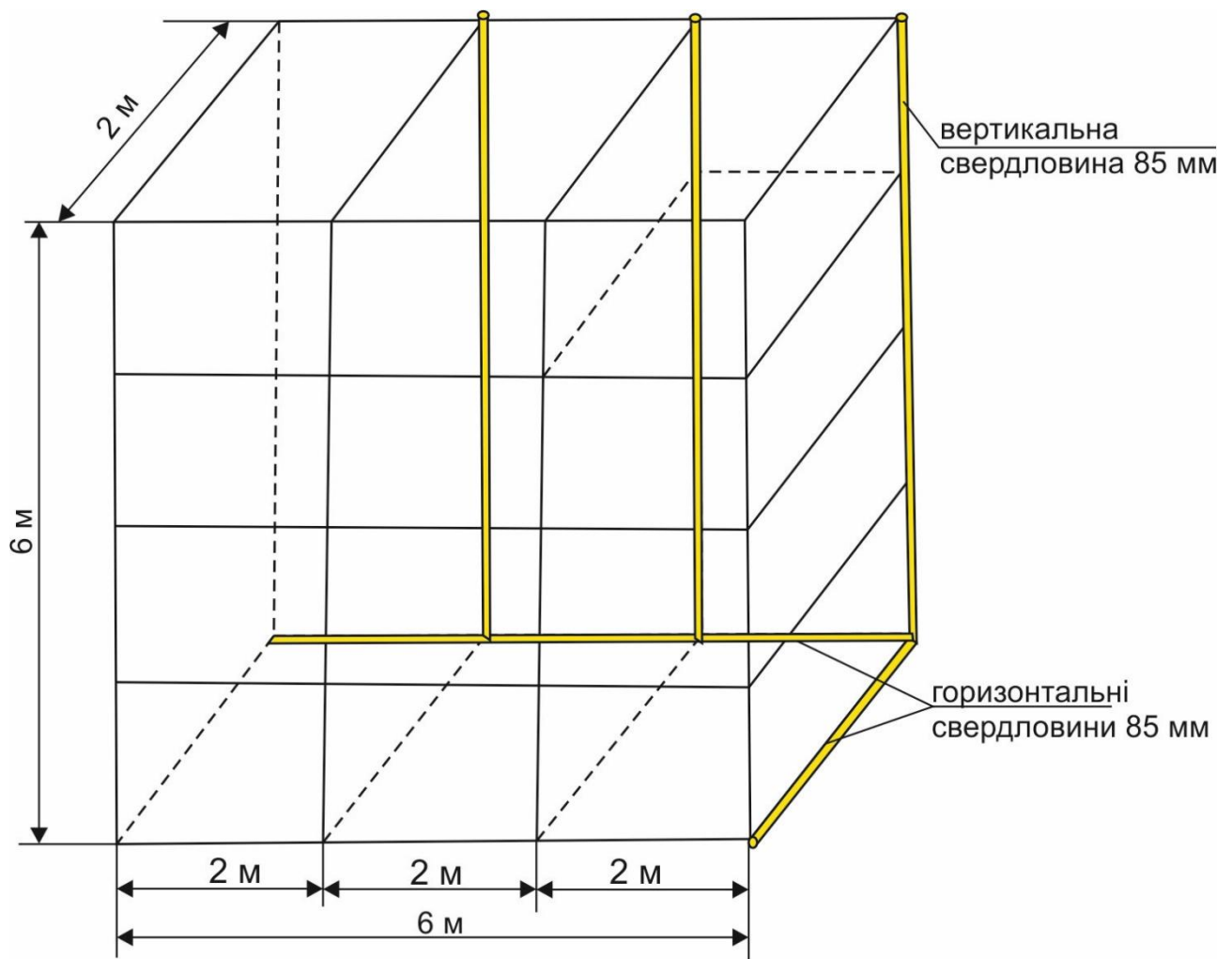


Рис. 4.17. Схема тристадійного способу видобування блоків природного каменю

Друга стадія видобування блоків природного каменю передбачає нарізання вертикальних площин та отримання монолітів висотою 6 м, шириною 2 м та довжиною 3 м.

Третя стадія передбачає завалювання моноліту та розділення моноліту на блоки природного каменю. Моноліт розділяється на блоки природного каменю за допомогою стрічкового буріння та клинів. Під час завалювання монолітів можливе їх розпадання по тріщинах, у такому випадку буріння шпурів здійснюється вибірково за попередньою розміткою.

При веденні робіт за двостадійною технологією видобутку: перша стадія – підготовка і відокремлення монолітів великого об'єму від масиву гірських порід

(рис. 4.18); після перекидання моноліту відбувається друга стадія – розділення монолітів на товарні блоки.

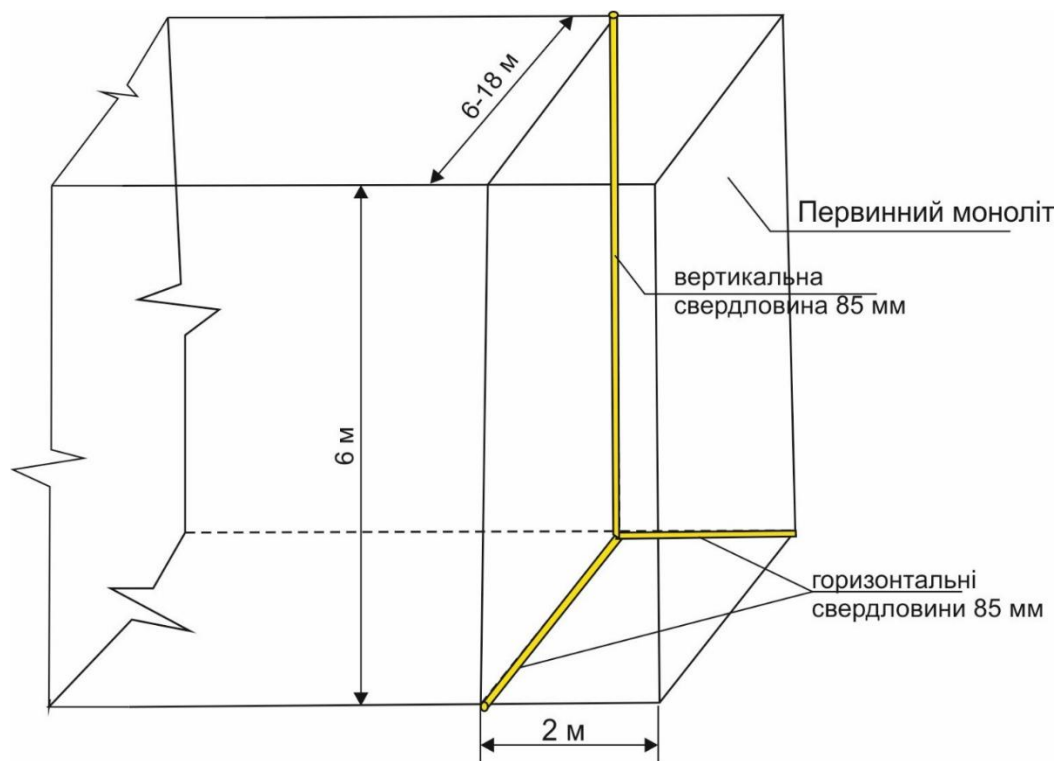


Рис. 4.18. Схема двостадійного способу видобування блоків природного каменю

Вибір між двостадійною та тристадійною технологією видобутку визначається геологічними умовами родовища, наявністю вільних робочих площ, а також вимогами до розмірів і якості товарних блоків. Тристадійна технологія забезпечує більш точне формування первинного моноліту та дозволяє отримувати блоки стандартних розмірів навіть за складної системи тріщинуватості масиву. Двостадійна технологія є ефективнішою за умов достатньо однорідного масиву та дозволяє скоротити тривалість підготовчих операцій.

Застосування алмазно-канатного різання на всіх стадіях видобутку забезпечує мінімальні втрати декоративного каменю, відсутність динамічних навантажень на масив та високу точність геометрії отримуваних блоків. Порівняно з традиційними буровибуховими методами, безвибухова технологія

розкриття нижніх горизонтів підвищує вихід товарних блоків на 15–20 % та суттєво знижує ризик утворення прихованих тріщин у матеріалі.

Таким чином, розроблені технологічні схеми тристадійного та двостадійного видобутку блоків природного каменю з використанням алмазно-канатних машин є обґрунтованими та придатними для впровадження на родовищах декоративного каменю України.

Висновки до розділу 4

1. Побудовано математичну модель залежності довжини контакту алмазного канату з монолітом від переміщення візка канатної пилки. Встановлено нелінійний стрибкоподібний характер цієї залежності: на початковому етапі довжина контакту різко зростає з 4 м до 10 м (при переміщенні з 2 до 2,7 м), після чого поступово знижується до 1 м наприкінці різання. Це підтверджує, що навантаження на алмазні намистини є максимально нерівномірним на перехідному етапі різання, що потребує врахування при проектуванні режимів роботи.

2. Встановлено, що для різання моноліту висотою 6 м і довжиною 3 м канатна машина переміщується на 8 м від початкової позиції, що безпосередньо визначає мінімальну довжину рейкового шляху та розмір робочого майданчику. Геометрія моноліту таким чином є визначальним параметром при плануванні розміщення технологічного обладнання на кар'єрі.

3. Порівняльний аналіз методів проведення розрізних траншей на Лезниківському кар'єрі показав суттєву перевагу трапецієподібної форми (U) над трикутною (V): вихід товарних блоків становить відповідно 12,4% проти 5,6%, тобто більш ніж вдвічі вищий. Крім того, трапецієподібний метод потребує на 63,4% менше часу на проведення траншеї, що підтверджує його технологічну та економічну доцільність.

4. Визначено залежність часу підготовки горизонту від висоти уступу: зі збільшенням висоти час підготовки зростає через необхідність пропорційного збільшення розмірів траншеї. Встановлено, що мінімальна ширина капітальної

траншеї для одностороннього руху фронтальних навантажувачів САТ становить від 4,8 м (САТ 962Н) до 5,5 м (САТ 740), а ширина робочого майданчику – від 16 до 19 м залежно від вантажопідйомності навантажувача.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Дисертаційна робота присвячена вирішенню актуальної науково-практичної задачі – підвищенню ефективності видобутку блочного каменю шляхом оптимізації технологічних параметрів алмазного канатного різання. За результатами проведених досліджень сформульовано такі висновки:

1. Порівняльний аналіз технологій видобутку блочного каменю показав, що алмазне канатне різання забезпечує найбільш точний та економічно вигідний спосіб отримання комерційних блоків: втрати каменю становлять лише 5–10 % проти понад 30 % при вибухових методах, а вихід якісних блоків підвищується на 15–20 %. Еволюція технології свідчить про зростання ресурсу канатів з 15–20 м²/м (1980-ті роки) до 40–50 м²/м (сучасні гумові троси), що вдвічі знижує потребу у заміні витратних матеріалів. Визначено, що основними невирішеними проблемами галузі залишаються прискорене зношування ріжучого інструменту, нерівномірне навантаження алмазних намистин та відсутність науково обґрунтованих критеріїв вибору режимів різання для різних типів гірських порід.

2. Вперше науково обґрунтовано верхню межу оптимального швидкісного діапазону алмазного канатного різання. Моделювання у середовищі Ansys Workbench та виробничі випробування довели, що підвищення швидкості руху каната з 25 до 35 м/с збільшує максимальні контактні напруження з 85 до 126 МПа і прискорює зношування намистин на 40 %, тоді як приріст продуктивності становить лише 10 %. Встановлено оптимальний діапазон швидкості – 25–30 м/с, а також виявлено нерівномірний характер зношування: намистини у центральній частині каната зношуються на 30 % швидше за периферійні. Порівняльні випробування намистин класів SDA 75+, SDA 85+, SDA 100+ показали, що при швидкостях близько 30 м/с клас SDA 100+ і SDA 85+ демонструють суттєво менше зношування завдяки вищій кристалічності та термічній стабільності.

3. Вперше виявлено, що у твердих породах інтенсивність зношування алмазних намистин на 25 % перевищує аналогічний показник для м'яких порід. Встановлено кількісні залежності між натягом каната та ресурсом інструменту: при натягу понад 3000 Н зношування намистин зростає на 20 %, а термін експлуатації

каната скорочується на 12–15 %. Виробничий експеримент на Лезниківському кар'єрі підтвердив, що режим 55 А є раціональним для великих монолітів (понад 72 м²) з продуктивністю до 2,8 м²/год, тоді як режим 65 А забезпечує максимум 3,14 м²/год лише для монолітів площею до 36 м². На основі встановлених закономірностей розроблено породо-специфічні режими різання, що підвищують ефективність процесу на 20–30 %.

4. Удосконалено підхід до вибору геометричних параметрів кам'яного моноліту. Встановлено аналітичну залежність об'єму технологічних втрат від геометрії моноліту. Доведено, що динамічне напруження при перекиданні залежить виключно від висоти моноліту: при висоті понад 6 м напруження перевищує границю міцності каменю на розтяг (8 МПа), що є критерієм появи технологічних тріщин. Встановлено, що при висоті блоку понад 10 м виникає нерівномірний розподіл навантаження вздовж каната, що скорочує його ресурс на 12 %. Дотримання оптимальних геометричних пропорцій дозволяє знизити контактні напруження на 10–15 % та мінімізувати технологічні втрати матеріалу до рівня 10–18 %.

5. Удосконалено методику розрахунку динамічних навантажень на моноліт при перекиданні. Встановлено, що для блоку висотою 6 м при коефіцієнті тертя $\mu=0,4$ перекидання є пріоритетним механізмом відділення при ширині до 4,8 м ($b < 2\mu H$). Аналіз умов рівноваги показав, що ширина і довжина моноліту не впливають на величину динамічного напруження, а збільшення довжини лише пропорційно збільшує імпульс і силу удару без зміни σ . Обґрунтовано, що регулювання технологічних втрат при перекиданні слід здійснювати передусім через управління висотою уступу та застосування амортизаційних підсіпок.

6. Економічний аналіз підтвердив ефективність запропонованих технологічних рішень. Комплексна оптимізація параметрів алмазного канатного різання (натяг, швидкість, режим охолодження) забезпечує зниження загальних експлуатаційних витрат на 15–20 % за рахунок подовження ресурсу каната, скорочення витрат на електроенергію на 10–15 % та мінімізації технологічних втрат матеріалу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Mancini R., Fomaro M., Cardu M. & Gaj F., 1996. Production methods in Italian dimension stone quarries. Proc. Int. Symp. on Mining Science and Technology, Xuzhou, China, pp. 125-130.
2. Mancini R., Cardu M. & Fomaro M, 1994. Granite blocks extraction by detonating cord in different Italian quarry basins' an overview of design and operation practices. Proc. 20th Annual Conf on Explosive and Blasting Technique, Austin, USA, pp. 305-315.
3. Проектування каменеобробних підприємств. Частина II : навчальний посібник / С. С. Іськов, В. В. Коробійчук, В. Г. Кравець, Р. В. Соболевський, А. О. Криворучко, О. М. Толкач. – Житомир : ЖДТУ, 2019. – 248 с.
4. Мамрай В.В., Коробійчук В.В., Толкач О.М., Шлапак В.О. Дослідження показників очікуваних експлуатаційних втрат сировини при видобуванні блочної сировини дисковими каменерізними машинами. Вісник ЖДТУ. Серія "Технічні науки". 2019. Вип. 1(83), С. 270-275.
5. Mamray V., Korobiichuk V., Shlapak V. Experience of Dimension Stone Extraction by Quarry Cutting Machine at Pokostovsky Deposit (Ukraine). Journal of Mining and Geological Science. Sofia, 2019. Vol.62, Num. 2. P. 66-69.
6. Коробійчук В.В., Котенко В.В., Кальчук С.В., Соболевський Р.В., Кісель О.О., Ломаков Г.М.. Обладнання для видобування блочного природного каменю: навч. посібник /– Житомир: ЖДТУ, 2011. – 348 с.
7. Коробійчук, В. В., Кириленко, Н. П., Махно, А. М., Костенко, В. К., & Мамрай, В. В. Інтеграція європейського досвіду оцінки якості природного каменю в Україну. Технічна інженерія. 2023. (2(92), С. 217–224.
8. Hughes, F. H. The Early History of Diamond Tools. Industrial Diamond Review, Nov. 1980, pp 405 - 407
9. Barber, E. and Sanderson, L. Practical Engineering, 8, 1943, pp 244-245
10. Sanderson, L. Practical Engineering, 8, 1943, p60

11. Daniel, P. A A Brief History of Stone Cutting - Not by Diamond Alone. De Beers Publication, 1994
12. Hannay, J. B. On the Artificial Formation of the Diamond. Proc. Royal Soc., 30, 1880, pp 188–189
13. Parsons, C. A Experiments on the Artificial Production of Diamond. Proc. Royal Soc., 220, 1919, pp 67–107
14. Rossini, F. D. and Jessup, R. S. Heat and Free Energy of Formation of Carbon Dioxide and the Transition between Graphite and Diamond. J. Res. Natl. Bur. Stand., 21, 1938, pp 485–513
15. Berman, R. and Simon, F. Z. The Graphite Diamond Equilibrium. Electrochemie, 59, 1955, pp 333–338
16. Leipunskii, O . I. Synthetic Diamonds. Uspekhi. Khimii., 8, 1939, pp 1519–1534
17. Bridgman, P. W. An Experimental Contribution to the Problem of Diamond Synthesis. J. Chem. Phys., 15, 1947, pp 92–98
18. Bundy, F. P. Melting of Graphite at Very High Pressure. J. Chem. Phys., 38, 1963, pp 618–630
19. Fateeva, N. S. and Vereshchagin, L. F. Concerning the Melting Point of Graphite up to 90 kbar. Pisma Zhur Eks Teor Fiz., 13, 1971 , pp 157–159
20. Bundy, F. P. The P, T Phase and Reaction Diagram for Elemental Carbon. J. Geo. Res., 85, No B12, Dec. 1980, pp 6930 - 6936
21. Anon. Diamond Wire - Its Origins. Indiaqua, No. 35, 1983, pp 109 - 110
22. Trancu, T. C. Diamond Wire Machine Cuts Marble Quarrying Costs. Industrial Diamond Review, Sep.1980, pp 329–331
23. Paone, J. and Bruce, W. E. Drillability Studies. Report 6324, Bureau of Mines, USA, 1963
24. Gstalder, S. and Rayna!, J. Measurement of Some Mechanical Properties of Rocks and their Relationship to Rock Drillability. Petroleum Transactions, Journal of Petroleum Technology, 1966

25. Cassapi, V. B, Ambrose, D. and Waller, M. D. Performance and Wear Characterists in Diamond Core Drilling. Drillex '87 Conference, UK. , Apr. 1987, pp 5–20
26. Copeman, R. and Ford, I. Geotechnical Aspects of Machining Natural Stones with Diamonds. Diamond Tools in the Stone Industry Conference, Mar. 1969, pp 320–325
27. Burgess, R. R. Circular Sawing Granite with Diamond Saw Blades. Proceedings of Fifth Industrial Diamond Seminar, IDA, USA, May 1978, pp 3–10
28. Wright, D. N. and Cassapi, V. B. Factors in Calculating Sawability of Stone. Industrial Lubrication and Tribology, Jun. 1985, pp 84–89
29. Wright, D. N. and Jennings, M. Guidelines for Sawing Stone. Industrial Diamond Review, 2/1989, pp 70–75
30. Wright, D. N. The Effect of Parameters on Stationary Wire Sawing Performance. Dimension Stone Africa Conference, Johannesburg, Mar. 1993
31. Шамрай В.І., Коробійчук В.В., Забродський О.І. Обґрунтування параметрів проведення капітальних траншей на блочних кар'єрах за допомогою алмазно-канатного різання. Тези V Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених "Перспективи розвитку гірничої справи та раціонального використання природних ресурсів". 18–19 квітня 2018 року. Житомир : ЖДТУ, 2018. С. 48–50.
32. Bortolussi, A et. al. Progress in the Knowledge in Granite Cutting with Diamond Wire. Int. Conference on Ground Control in Mining, U. of Wollongong, Jul. 1992.
33. Коробійчук В.В., Темченко А.Г., Шамрай В.І., Іськов С.С., Дубінчук Б.В. Супутнє видобування блоків природного каменю в умовах щебеневого кар'єру. Технічна інженерія. 2022. Вип. 2 (90). С. 153–160.
34. Ertingshausen W. Wear processes in sauring hard stone. IDR. Industrial diamond review. 1985. № 45 (510). p. 254-258.

35. Kahraman S., Fener M., Gunaydin O. Predicting the sawability of carbonate rocks using multiple curvilinear regression analysis. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2004. № 41 (7). p. 1123-1131.
36. Ozcelik Y., Polat E., Bayram F., Ay A. Investigation of the effects of textural properties on marble cutting with diamond wire. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2004. № 41. p. 228–234.
37. Buyuksagis I. Effect of cutting mode on the sawability of granites using segmented circular diamond sawblade. *Journal of Materials Processing Technology*. 2007. № 183 (2). p. 399-406.
38. Sengun N., Altindag R. Prediction of specific energy of carbonate rock in industrial stones cutting process. *Arabian Journal of Geosciences*. 2013. № 6 (4). p. 1183-1190.
39. Криворучко А.О., Коробійчук В.В., Соболевський Р.В., Камських О.В., Павлюк І.В. Визначення оптимального напрямку ведення гірничих робіт при видобуванні блоків з природного каменю. *Вісник ЖДТУ*. 2016. № 3 (78). С. 150-163.
40. Korobiichuk I., Korobiichuk V., Iskov S., Nowicki M., Szewczyk R. Peculiarities of Natural Stone Extraction Technology with the Help of Diamond Wire Machines. *Int. Multidiscip. Sci. Geoconf. SGEM*. 2016. № 2. С. 649-656.
41. Павловський М. А. Теоретична механіка : підручник. Київ : Техніка, 2002. 512 с.
42. Beer F. P., Johnston E. R., Cornwell P. J. *Vector Mechanics for Engineers: Dynamics*. 12th ed. New York : McGraw-Hill Education, 2019. 1072 p.

Додаток А

Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у фахових виданнях, які входять до наукометричних баз:

1. Шамрай В. І., Мельник-Шамрай В. В., Шкабара Ю. В., Микитенко С. В., Ігнатюк Р. М. Аналіз сучасного стану каменедобувної та каменеобробної галузі України. *Технічна інженерія..* 2022. № 2 (90). С. 193–199. [https://doi.org/10.26642/ten-2022-2\(90\)-193-199](https://doi.org/10.26642/ten-2022-2(90)-193-199) (Входить до переліку міжнародної наукометричної бази даних WorldCat; BASE; eLibrary, GoogleScholar). Загальний обсяг 0,75 друк. арк., особисто автору належить 0,15 друк. арк.: особистий внесок автора полягає в обробці статистичних даних.

2. Leonets I., Kyrylenko N., Mykytenko S., Syroid Y. Impact Assessment of Natural Stone Processing Techniques on the Grain Composition of Sludge Admixtures for Press Powder. *Geoheritage..* 2024. Vol. 16. (129) P.80-92. <https://doi.org/10.1007/s12371-024-01029-6> (Входить до переліку міжнародної наукометричної бази даних Scopus, GoogleScholar). Загальний обсяг 1,5 друк. арк., особисто автору належить 0,4 друк. арк.: особистий внесок автора полягає в проведенні досліджень в лабораторії.

3. Микитенко С. В., Сироїд Є. С. Міжнародна торгівля України природним каменем під час війни. *Технічна інженерія..* 2024. № 1 (93). С. 400–405. [https://doi.org/10.26642/ten-2024-1\(93\)-400-405](https://doi.org/10.26642/ten-2024-1(93)-400-405) (Входить до переліку міжнародної наукометричної бази даних WorldCat; BASE; eLibrary, GoogleScholar). Загальний обсяг 0,75 друк. арк., особисто автору належить 0,4 друк. арк.: особистий внесок автора полягає в аналізі літературних джерел, постановці завдання та обробці статистичних даних.

4. Сироїд Є. С., Соколовський В. О., Шкабара Ю. В., Микитенко С. В., Сидоренко А. А. Економічні та географічні переваги розміщення підприємств з обробки природного каменю в Європі: порівняння ключових країн. *Технічна інженерія..* 2024. № 2 (94). С. 268–275. [https://doi.org/10.26642/ten-2024-2\(94\)-](https://doi.org/10.26642/ten-2024-2(94)-)

268-275 (Входить до переліку міжнародної наукометричної бази даних WorldCat; BASE; eLibrary, GoogleScholar). Загальний обсяг 1 друк. арк., особисто автору належить 0,2 друк. арк.: особистий внесок автора полягає в аналізі чинників, які впливають на локацію каменеобробного підприємства.

5. Сироїд Є. С., Сидоренко А. А., Леонець І. В., Микитенко С. В., Колодій М. А. Вплив параметрів різання на енергоспоживання та продуктивність при обробці каменю.. *Науковий вісник ДонНТУ*. 2024. № 2 (13). С. 102–113. <https://doi.org/10.31474/2415-7902-2024-2-13-102-113> (Входить до переліку міжнародної наукометричної бази даних GoogleScholar). Загальний обсяг 1,5 друк. арк., особисто автору належить 0,3 друк. арк.: особистий внесок автора полягає в обрахунку параметрів енергоспоживання та продуктивності при обробці каменів.

6. Мельничук П. П., Леонець І. В., Коваленко Я. П., Микитенко С. В. Дискове та алмазно-канатне різання гранітів: порівняння технологій для промислової ефективності.. *Технічна інженерія*. 2025. № 2 (96). С. 31–37. [https://doi.org/10.26642/ten-2025-2\(96\)-31-37](https://doi.org/10.26642/ten-2025-2(96)-31-37) (Входить до переліку міжнародної наукометричної бази даних WorldCat; BASE; eLibrary, GoogleScholar). Загальний обсяг 1 друк. арк., особисто автору належить 0,2 друк. арк.: особистий внесок автора полягає в проведенні натурних досліджень.

7. Сидоренко А. А., Микитенко С. В. Аналіз механізму зношування алмазних зерен при різних швидкостях різання. *Науковий вісник ДонНТУ*.. 2025. № 1 (14). С. 210–219. <https://doi.org/10.31474/2415-7902-2025-1-14-210-219> (Входить до переліку міжнародної наукометричної бази даних WorldCat; BASE; eLibrary, GoogleScholar). Загальний обсяг 1,25 друк. арк., особисто автору належить 0,7 друк. арк.: особистий внесок автора полягає в підготовці ключових розділів статті, таких як вступ, методика, результати чи висновки, а також створення ілюстрацій (графіків) для демонстрації результатів.

8. Микитенко С. В., Кузнецов О. О., Леонець І. В., Цигода В. В. Аналіз ефективності використання дискових пил у каменеобробній промисловості.. *Науковий вісник ДонНТУ*. 2025. № 2 (15). С. 200–208.

<https://doi.org/10.31474/2415-7902-2025-2-15-200-208> (Входить до переліку міжнародної наукометричної бази даних WorldCat; BASE; eLibrary, GoogleScholar). Загальний обсяг 1,12 друк. арк., особисто автору належить 0,2 друк. арк.: особистий внесок автора полягає в обробці даних щодо сейсмічних вібрацій та формулюванні висновків.

9. Кузнецов О. О., Леонєць І. В., Микитенко С. В., Білобров Д. М., Цигода В. В. Економіка використання великих блоків лабрадориту в сучасному каменеобробному виробництві.. *Науковий вісник ДонНТУ*. 2026. № 1 (16). С. 54–64. <https://doi.org/10.31474/2415-7902-2026-1-16-54-64> (Входить до переліку міжнародної наукометричної бази даних WorldCat; BASE; eLibrary, GoogleScholar). Загальний обсяг 1,37 друк. арк., особисто автору належить 0,3 друк. арк.: особистий внесок автора полягає в постановці задачі, аналізі результатів економіки використання великих блоків лабрадориту.

Статті у закордонних збірниках наукових праць:

10. Микитенко С. В., Кузнецов О. О., Цигода В. В. Вплив конструктивних і режимних параметрів дискових пил на ефективність різання кам'яних порід.. *Тези III Всеукраїнської науково-практичної конференції «Сучасні проблеми гірництва та будівництва»*, 20 листопада 2025 року. Житомир: Житомирська політехніка, 2025. С. 63.

11. Сидоренко А. А., Микитенко С. В., Шкабара Ю. В., Качуровський М. В., Соколовський В. О. Вплив параметрів різання на енергоспоживання та продуктивність при обробці каменю.. *Тези II Всеукраїнської науково-практичної конференції «Сучасні проблеми гірництва та будівництва»*, 21 листопада 2024 року. Житомир: Житомирська політехніка, 2024. С. 54.

12. Леонєць І. В., Микитенко С. В., Білобров Д. М., Шкабара Ю. В. Вплив місць збору шламу на каменеобробних підприємствах на зерновий склад прес-порошків.. *Тези Всеукраїнської науково-практичної конференції «Сучасні проблеми гірництва та будівництва»*, 23 листопада 2023 року. Житомир: Житомирська політехніка, 2023. С. 34–35.

Додаток Б



Метадані

ДОКУМЕНТ

Заголовок

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИДОБУТКУ БЛОЧНОГО КАМЕНЮ ШЛЯХОМ ОПТИМІЗАЦІЇ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ АЛМАЗНО-КАНАТНОГО РІЗАННЯ

Автор

Сергій Вікторович Микитенко

Науковий керівник / Експерт

Zhytomyr Polytechnic

ІД документу

334388603

ОРГАНІЗАЦІЯ

Назва організації

State University "Zhytomyr Polytechnic"

підрозділ

State University "Zhytomyr Polytechnic"

ЗВІТ

Дата звіту

2026-06-22

Дата редагування

Обсяг знайдених подібностей

Коефіцієнт подібності визначає, який відсоток тексту по відношенню до загального обсягу тексту було знайдено в різних джерелах. Зверніть увагу, що високі значення коефіцієнта не автоматично означають плагіат. Звіт має аналізувати компетентна / уповноважена особа.



КП 1



КП 2

25

Довжина фрази для коефіцієнта подібності 2

20357

Кількість слів

153971

Кількість символів

Тривога

У цьому розділі ви знайдете інформацію щодо текстових спотворень. Ці спотворення в тексті можуть говорити про МОЖЛИВІ маніпуляції в тексті. Спотворення в тексті можуть мати навмисний характер, але частіше характер технічних помилок при конвертації документа та його збереженні, тому ми рекомендуємо вам підходити до аналізу цього модуля відповідально. У разі виникнення запитань, просимо звертатися до нашої служби підтримки.

Заміна букв		9
Інтервали		0
Мікропробіли		0
Білі знаки		0
Парафрази (SmartMarks)		13

Джерела

Нижче наведений список джерел. В цьому списку є джерела із різних баз даних. Копію тексту означає в якому джерелі він був знайдений. Ці джерела і значення Коефіцієнту Подібності не відображають прямого плагіату. Необхідно відкрити кожне джерело і проаналізувати зміст і правильність оформлення джерела.

10 найдовших фраз

Копію тексту

#	НАЗВА ТА АДРЕСА ДЖЕРЕЛА URL (НАЗВА БАЗИ)	КІЛЬКІСТЬ ІДЕНТИЧНИХ СЛІВ (ФРАГМЕНТІВ)
1	https://ela.kni.ua/hitstream/123456789/35574/1/Mamrai_araf.pdf	18 0 (0 0%)

2	дисертація_Виговська.docx 9/28/2021 State University "Zhytomyr Polytechnic" (State University "Zhytomyr Polytechnic")	16 0 (0.08 %)
3	Дис_Ковалевич.pdf 5/11/2023 State University "Zhytomyr Polytechnic" (State University "Zhytomyr Polytechnic")	15 0 (0.07 %)
4	https://vsau.org/assets/images/general/nauka/razovi-radu/Retsenziia-Tokarchuk-D.M..pdf	15 0 (0.07 %)
5	https://otherreferats.allbest.ru/manufacture/00313637_0.html	14 0 (0.07 %)
6	https://core.ac.uk/download/pdf/47239085.pdf	13 0 (0.06 %)
7	дисертація_Виговська.docx 9/28/2021 State University "Zhytomyr Polytechnic" (State University "Zhytomyr Polytechnic")	13 0 (0.06 %)
8	Розробка наукових основ технології супутнього видобування блоків в умовах щеленевих гранітних кар'єрів 3/15/2025 National Technical University of Ukraine Igor Sikorskyi Kyiv Politech Institute (National Technical University of Ukraine Igor Sikorskyi Kyiv Politech Institute)	11 0 (0.05 %)
9	Дис_Ковалевич.pdf 5/11/2023 State University "Zhytomyr Polytechnic" (State University "Zhytomyr Polytechnic")	11 0 (0.05 %)
10	https://www.auvieuxcampeur.fr/media/catalog/product/documents/Guides_des_tailles_0.pdf	11 0 (0.05 %)

Домашня база даних (0.44 %)



#	ЗАГОЛОВОК	КІЛЬКІСТЬ ІДЕНТИЧНИХ СЛІВ (ФРАГМЕНТІВ)
1	дисертація_Виговська.docx 9/28/2021 State University "Zhytomyr Polytechnic" (State University "Zhytomyr Polytechnic")	43 (4) (0.21 %)
2	Дис_Ковалевич.pdf 5/11/2023 State University "Zhytomyr Polytechnic" (State University "Zhytomyr Polytechnic")	39 (4) (0.19 %)
3	Костишин.docx 4/15/2021 State University "Zhytomyr Polytechnic" (State University "Zhytomyr Polytechnic")	7 (1) (0.03 %)

Програма обміну базами даних (0.41 %)



#	ЗАГОЛОВОК	КІЛЬКІСТЬ ІДЕНТИЧНИХ СЛІВ (ФРАГМЕНТІВ)
4	Розробка наукових основ технології супутнього видобування блоків в умовах щеленевих гранітних кар'єрів 3/15/2025 National Technical University of Ukraine Igor Sikorskyi Kyiv Politech Institute (National Technical University of Ukraine Igor Sikorskyi Kyiv Politech Institute)	47 (5) (0.23 %)

5	Обґрунтування сейсмобезпечних параметрів буропідричних робіт на кар'єрах в умовах закарстованих породних масивів 3/15/2025 National Technical University of Ukraine Igor Sikorskyi Kyiv Politech Institute (National Technical University of Ukraine Igor Sikorskyi Kyiv Politech Institute)	16 (2) (0.08 %)
6	Управління якістю нерудних будівельних матеріалів на основі геостатистичного моделювання 3/15/2025 National Technical University of Ukraine Igor Sikorskyi Kyiv Politech Institute (National Technical University of Ukraine Igor Sikorskyi Kyiv Politech Institute)	12 (2) (0.06 %)
7	Дисертаційна робота_Баранова Ю.Г._13.06.2025 6/15/2025 State Biotechnological University (Сторонні)	8 (1) (0.04 %)

Інтернет (1 %)



#	ДЖЕРЕЛО URL	КІЛЬКІСТЬ ІДЕНТИЧНИХ СЛІВ (ФРАГМЕНТІВ)
8	https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/35574/1/Mamrai_aref.pdf	31 (3) (0.15 %)
9	https://core.ac.uk/download/pdf/47239085.pdf	21 (2) (0.1 %)
10	http://resource.npl.co.uk/docs/networks/time/meeting5/johansson.pdf	17 (2) (0.08 %)
11	https://ir.lib.vntu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/32453/%D0%9F%D1%80%D0%B5%D0%B7%D0%B5%D0%BD%D1%82%D0%B0%D1%86%D1%96%D1%8F%20%D0%92%D0%B0%D1%80%D0%B0%D0%BA%D1%81%D0%B0%20%D0%92.%20%D0%92_.pdf?sequence=1	16 (2) (0.08 %)
12	https://vsau.org/assets/images/general/nauka/razovi-radu/Retsenziia-Tokarchuk-D.M..pdf	15 (1) (0.07 %)
13	https://otherreferats.allbest.ru/manufacture/00313637_0.html	14 (1) (0.07 %)
14	http://discovery.phys.virginia.edu/research/groups/qes-archive/data/12C.pdf	13 (2) (0.06 %)
15	https://publikationen.bibliothek.kit.edu/1000189715/173148524	13 (2) (0.06 %)
16	http://irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?C21COM=2&I21DBN=UJRN&P21DBN=UJRN&Z21ID=&IMAGE_FILE_DOWNLOAD=1&Image_file_name=PDF%2FNvuumevcg_2018_17%281%29_.pdf	13 (2) (0.06 %)
17	http://www.lib.ua-ru.net/diss/cont/139017.html	12 (2) (0.06 %)
18	https://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/34818	12 (2) (0.06 %)
19	https://www.auvieuxcampeur.fr/media/catalog/product/documents/Guides_des_tailles_0.pdf	11 (1) (0.05 %)
20	http://www.kalkulatorglapy.info/	10 (1) (0.05 %)
21	http://referatu.net.ua/referats/7569/173747	5 (1) (0.02 %)



Список прийнятих фрагментів

#	ЗМІСТ	КІЛЬКІСТЬ ОДНАКОВИХ СЛІВ (ФРАГМЕНТІВ)

Додаток В

ТОВАРИСТВО З ОБМЕЖЕНОЮ ВІДПОВІДАЛЬНІСТЮ «НІКА-ГРАН»

Комплекс будівель та споруд №4, село Двірець,
Житомирська область, Україна, 12447
Тел.: +38 (067) 440-88-95, e-mail: nikagran@gmail.com

«14» серпня 2026 р.

АКТ

впровадження результатів дисертаційної роботи

Товариство з обмеженою відповідальністю «Ніка-Гран» підтверджує, що результати дисертаційної роботи Микитенка Сергія Вікторовича на тему: «Підвищення ефективності видобутку блочного каменю шляхом оптимізації технологічних параметрів алмазно-канатного різання» використані при удосконаленні технологічних параметрів алмазно-канатного різання природного каменю на підприємстві.

У межах впровадження були використані результати дисертаційного дослідження, що стосуються методики визначення оптимальних режимів руху алмазного каната, раціонального рівня натягу каната залежно від фізико-механічних властивостей каменю, методів рівномірного розподілу навантаження на алмазні намистини, а також застосування систем автоматизованого контролю параметрів різання та рециркуляції охолоджувальної рідини.

Впровадження зазначених рішень дозволяє підвищити продуктивність алмазно-канатного різання, знизити інтенсивність зношування ріжучого каната, зменшити питомі енерговитрати на видобуток блочного каменю, скоротити технологічні втрати матеріалу при різанні, а також покращити якісні характеристики блочної продукції.

Очікуваний економічний ефект від впровадження результатів дисертаційної роботи досягається за рахунок збільшення терміну експлуатації алмазного каната, підвищення виходу кондиційних блоків, зниження собівартості видобутку природного каменю, а також скорочення витрат на охолоджувальну рідину та допоміжні матеріали.

Орієнтовний очікуваний економічний ефект від впровадження запропонованих технологічних рішень може становити від 180 до 280 тис. грн на рік залежно від обсягів видобутку та петрографічного складу породи, що розробляється.

Результати дисертаційної роботи рекомендовані для подальшого використання при проектуванні та веденні видобувних робіт на кар'єрі підприємства.

Заступник директора ТОВ «Ніка-Гран»

(підпис) _____ П.І.Б.)

М.П.

