

А.М. Махно, аспірант
В.В. Мамрай, к.т.н., доц.*Державний університет «Житомирська політехніка»*

Перспектива впровадження комбінованої гідроабразивної технології при обробці та видобутку природного облицювального каменю в Україні

У статті розглянуто сучасні підходи до підвищення ефективності процесу обробки та видобутку природного облицювального каменю шляхом застосування комбінованої гідроабразивної технології. Проаналізовано існуючі методи відокремлення комерційних блоків облицювального каменю у кар'єрах блочної будівельної сировини, їхні енергетичні затрати та технологічні особливості. Обґрунтовано актуальність тематики, зумовлену стабільним попитом на якісний облицювальний камінь і потребою зниження собівартості виробництва при підвищенні якості блоків. Проаналізовано традиційні технології видобутку (буровибухові, буро-клинові, алмазно-канатні, дискові, барові, із застосуванням НРС) та визначено їхні основні недоліки – високі втрати матеріалу, механічні пошкодження, шум, пил, термічні деформації та обмеження геометричної точності. Запропоновано поєднання класичних методів відокремлення блоків від масиву природного облицювального каменю в кар'єрах мінеральної будівельної сировини та гідроабразивного методу різання під високим тиском з абразивною дією, що дозволяє знизити енергоємність процесу обробки та видобування природного облицювального каменю, зменшити втрати корисного матеріалу та підвищити якість комерційних блоків. Проведено техніко-економічне порівняння вартості розрізу 1 м² гранітного блоку різними методами: алмазно-канатним (≈358 грн/м²), буро-клиновим (≈1150 грн/м²) та гідроабразивним (≈3385 грн/м²). Незважаючи на вищу собівартість, гідроабразивний спосіб забезпечує мінімальні експлуатаційні втрати матеріалу (близько 0 %), що компенсує витрати та підвищує рентабельність при комбінованому використанні. У статті також наведено критерії поєднання методів, визначено оптимальні технологічні параметри та обґрунтовано переваги гідроабразивного різання для створення точних стартових і фінішних зрізів. Зазначено, що комбінована технологія знижує енерговитрати, втрати матеріалу, рівень шуму й пилу, а також покращує екологічні показники. Визначено перспективи подальших досліджень, спрямованих на оптимізацію параметрів комбінованого способу, розробку мобільних кар'єрних гідроабразивних установок та оцінку довгострокової економічної ефективності для кар'єрів облицювального каменю України.

Ключові слова: природний камінь; видобуток та обробка облицювального каменю; гідроабразивний спосіб впливу; архітектурно-будівельна сировина; родовища корисних копалин.

Актуальність теми. Попит на якісний природний облицювальний камінь в Україні та на експортних ринках залишається досить стабільним. Традиційні методи видобутку комерційних блоків в умовах блочних кар'єрів (контурні буровибухові та буро-клинові роботи, алмазно-канатне, дискове, барове механічне випилювання, використання невивбухових руйнуючих сумішей (НРС) та ін.) звичайно мають багато переваг, але також і низку недоліків: висока питома витрата матеріалу (відходи), термічні та механічні ушкодження, шум, пил, заклинювання алмазного канату в тріщинах, обмеження щодо точності, складні геометричні форми комерційних блоків та ін. Як один з потенційних варіантів збереження переваг традиційних методів відокремлення блоків з облицювального каменю від масиву і нівелювання недоліків цих методів є можливість використання комбінованих методів видобування та обробки блоків і виробів з природного облицювального каменю.

У цій статті пропонується використовувати комбіновану гідроабразивну технологію впливу високошвидкісного струменя води «abrasive water jet» на масив гірської породи, що забезпечує високу точність, відсутність термічного впливу, мінімальну механічну деформацію та можливість різати складні контури блоків, в поєднанні з традиційними методами відокремлення комерційних блоків облицювального каменю у кар'єрах. Слід зазначити, що застосування гідроабразивної технології безпосередньо в умовах кар'єру для відокремлення комерційних блоків також може мати певні обмеження через низьку продуктивність та потенційно підвищену вартість такої технології. Але в комбінації гідроабразивної технології впливу на природний масив (рис. 1) з іншими методами (наприклад, використання різання алмазним канатом для попереднього розпилу та використання гідроабразивної технології впливу на масив для створення, наприклад, складнодоступного «тилового» різку або кінцевого оконтурювання і підрізки облицювальних комерційних блоків) може дати абсолютне поєднання економічності та якості виготовлення архітектурно-будівельної продукції з природного облицювального каменю [1].

Аналіз останніх досліджень та публікацій за тематикою. Вивчаючи вплив матеріалу абразиву на ефективність гідроабразивного різання, Фабер (K.Faber) і Овейнах (H.Oweinah) показали, що гідроабразивний струмінь із мідними шлаками як абразив ріже матеріал в 3 рази швидше, ніж рівноцінна кількість гранату, однак при обробці бетону спостерігається зворотна картина. Для ілюстрації важливості правильного вибору абразиву Саммерс (D.A. Summers) розглядає використання сталевого дробу як абразиву при різанні металів, скла, гірської породи. У випадку різання скла удар дробинки концентрує початкову енергію частки на малій площі в точці контакту дробинки з поверхнею й викликає утворення радіальних тріщин навколо цієї точки. При наступних ударах виникають бічні замикаючі тріщини, що приводить до відділення частки матеріалу від його основного масиву. Якщо така ж сталева дробинка вдаряє по в'язкому матеріалу, наприклад, алюмінію, то вона поринає в його поверхневий шар, утворює з витиснутого металу виступ навколо лунки, але не відокремлює його від поверхні. При ударі дробинки по міцному пружному металі (інструментальна сталь) відбувається рикошет від поверхні без якого-небудь проникнення дробинки в матеріал. Отже, якщо порівнювати роботу абразиву зі сталі й гранату, то при різанні крихких матеріалів більш ефективним є використання сталевого дробу, у той час в'язкі матеріали гранат буде різати набагато глибше й продуктивніше [2].

У Британському інституті зварювання при різанні різних матеріалів під тиском води в 100 МПа з витратою 25 л/хв як абразив використовувався дрібнозернистий піщаник у кількості до 50 г/с. При різанні м'яких матеріалів використовувалися більш дрібні частки – діаметром 0,1–0,4 мм, а при різанні більше твердих матеріалів і металів використовувалися частки розміром 0,4–1,4 мм.

Так Еванс (A.G. Evans) і Шелдон (G.L. Sheldon) досліджували механізм руйнування крихких матеріалів і дали таку його інтерпретацію. Спочатку під ударом абразивних часток на поверхні матеріалу виникає зона стиснення, що приводить до розтягування поверхні навколо цієї зони. У міру того, як навантаження в зоні стиску зростають, у розтягнутій зоні утворюються радіальні тріщини навколо периметра зони стиску. Подальше збільшення навантаження приводить до виникнення бічних (поперечних) тріщин, що розходяться майже паралельно поверхні матеріалу в межах радіальних тріщин. Бічні тріщини, розширюючись, з'єднуються з радіальними, що приводить до утворення ізолюваного від основного масиву фрагмента (шматка) матеріалу, який видаляється з зони різання. Необхідно зазначити, що на відміну від багатьох інших крихких матеріалів гірські породи мають природні дефекти у вигляді тріщин різного розміру й конфігурації, які можуть сприяти збільшенню об'єму матеріалу, який руйнується при гідроабразивному різанні порід.

Вплив витрати абразиву на величину об'єму матеріалу, що видаляється за одиницю часу, при різних тисках води досліджував Лаурінат (A.Laurinat). Досліди виконувалися при фрезеруванні хромонікелевої сталі. Тиск води змінювалося від 150 до 350 МПа з інтервалом 50 МПа. Використовувалися струмоформувальні насадки діаметром 0,25 мм, коліматор діаметром 0,9 мм довжиною 40 мм. Швидкість переміщення інструмента над поверхнею зразка складає 500 мм/хв. Витрата абразиву (олівін з розміром часток 180–350 мкм) змінювався в межах 2–12 г/с. Установлено, що об'єм матеріалу, що видаляється, зростає зі збільшенням як тиску води, так і витрати абразиву. Залежність об'єму матеріалу, що видаляється, від тиску води є лінійною. Установлено, що в умовах проведеного дослідження величина оптимального масового відношення при всіх значеннях тиску води, прийнятих у дослідженнях, дорівнює приблизно 0,33 [2].

Крім зазначених вище досліджень з вивчення впливу природи абразиву, його характеристик і витрати на ефективність гідроабразивного різання різних матеріалів, окремий інтерес становить економічний аспект цієї проблеми [3]. Більш дешеві абразиви необхідно частіше застосовувати там, де немає високих вимог до якості поверхні, яка отримується після різання (гірська промисловість, будівництво), а більш дорогі абразиви, такі як гранат, хризоліт, мідні шлаки та ін., застосовуються частіше при точному різанні матеріалів. Тут необхідно зауважити, що матеріал абразиву значною мірою впливає на його ціну, а це своєю чергою визначає можливості використання того або іншого абразиву в конкретній технології. Так під час гідроабразивного різання листових матеріалів у промислових умовах відносно нескладно організувати збір відпрацьованого абразиву, його очищення від продуктів руйнування й вторинне використання. У цьому випадку питомі витрати абразиву на одиницю продукції значно знижуються, що допускає застосування дорогих, але більше ефективних, з погляду забезпечення продуктивності різання, абразивів.

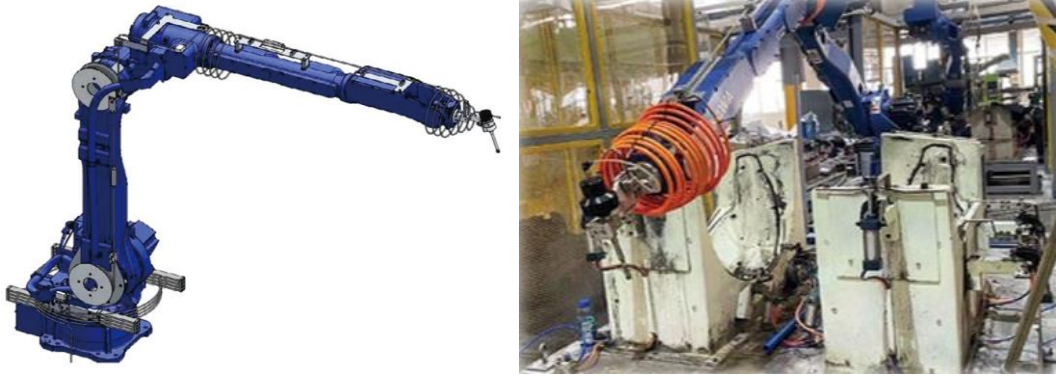


Рис. 1. Використання рухомої роботизованої системи для гідроабразивного різання природного облицювального каменю виробництва компанії «SAME»

Крім того, у роботі Хесслінга виконано порівняльні випробування 52 різних типів абразиву за сукупністю оцінюваних критеріїв (ерозійна міцність зерна, вартість, глибина різання) кварцовий пісок є найкращим абразивом.

Як показано в роботі Ісобе (Т.Ісобе) при різних досліджених сполученнях розмірів отворів струмоформувальної насадки, коліматора й витрат абразиву (сталеві дробинки) спостерігалось і широке коливання в розподілі швидкості часток, що виходять з коліматора, але найбільша швидкість для більшості абразивних частот досягалася за більш низької витрати абразиву й більших діаметрів отворів струмоформувальної насадки й коліматора. Проведений аналіз публікацій закордонних досліджень з гідроабразивного різання різних матеріалів показує, що основні параметри процесу змінювалися в таких межах: тиск води перед струмоформувальною насадкою – від 50 до 400 МПа, діаметр отвору струмоформувальних насадок – від 0,18 до 0,875 мм і витрата абразиву від 0,03 до 3,6 кг/хв [2].

Проведений аналіз експериментальних досліджень також дозволяє припустити, що кожний конкретний гідроабразивний інструмент, який працює за принципом захоплення абразиву, має свій індивідуальний характеристичний параметр, що виражається відношенням масових витрат абразиву й води, при якому досягається максимальна продуктивність гідроабразивного струменя.

Метою статті є дослідження технічних, економічних та екологічних передумов впровадження комбінованої гідроабразивної технології у процесах видобутку та обробки природного облицювального каменю в Україні, а також оцінка її ефективності порівняно з традиційними методами механічного, алмазного та термічного різання.

Викладення основного матеріалу. Використання гідроабразивного методу впливу на гірську породу має досить великі перспективи у впровадженні в процес видобування природного каменю. Крім класичних методів використання гідроабразивних способів впливу на масив (безпосередня обробка поверхні каменю та різання), існує цілий ряд перспективних технологій використання гідроабразивного методу впливу, для прикладу, водоструменеве буріння, використання гідромеханічних різаків, очищення поверхонь, гідроабразивне руйнування будівельних конструкцій при реконструкції будинків, процеси каталізу та ін. Проведення дослідження раціональності використання способу гідроабразивного різання в поєднанні з методами алмазного вирізання блоків, буровибухового, буро-клинового способу та іншими є досить перспективним і актуальним.

Прагнення до відпрацювання родовищ з мінімальними експлуатаційними втратами при безпечному веденні робіт є одним з основних умов підвищення ефективності гірничого виробництва. Так було встановлено [4], що при алмазно-канатному різанні відхилення грані блоку природного каменю від його площини досягає 6–8 мм на кожні 1 м довжини блоку. Експлуатаційні втрати складають 0,76–1,52 м³, що становить 2,4–5,1 %; при застосуванні буровибухових методів зона порушення грані блочного каменю складає: $N_{\text{пош.}} = 340 \dots 440$ мм. Експлуатаційні втрати при цьому складуть від 0,15 до 3,1 м³ що становить від 14,6 до 91 %. Використання ж контурних вибухових методів дозволить зменшити втрати в 1,4–2,2 раза. При застосуванні буро-клинової технології зона порушення грані блочного каменю складає: $N_{\text{пош.}} = 120 \dots 250$ мм. Величина експлуатаційних втрат при цьому складає від 0,15 до 0,8 м³, що становить від 4 до 31 %. З метою зниження експлуатаційних втрат та зменшення нерівності відколу рекомендовано застосовувати концентратори напружень. Це дозволить зменшити нерівність відколу в 1,5–2 рази, а експлуатаційні втрати зменшити в 1,3–1,8 раза. З дослідження експлуатаційних втрат блочної сировини [4] можна зробити узагальнюючий висновок, що на даний момент в кар'єрах облицювального каменю України під час видобування комерційних блоків є досить великий відсоток експлуатаційних втрат, що звичайно впливає на рівень рентабельності та конкурентоздатності діючих каменедобувних підприємств України [5]. Це є досить важливим економічним фактором розробки оптимізованих рішень у виборі способів та технологій видобування сировини з облицювального каменю.

У видобувних кар'єрах блочного каменю традиційні методи стають дедалі менш ефективними, оскільки вони можуть спричинити низку недоліків як щодо видобутку каменю, так і щодо якості виробленого матеріалу. Тому поява нових технологій-замінників, комерційно доступних у кар'єрах майбутнього, буде схвалюватися за умови, що технічний прогрес супроводжуватиметься доведеною економічною прибутковістю. Серед них гідроабразивне різання видається дуже перспективним.



Рис. 2. Приклад використання машини гідроабразивного різання на гранітному кар'єрі в Сардинії (Італія) (R.Ciccu)[6]

Гідроабразивне різання використовувалося для різання граніту в низці кар'єрів Європи [6]. Так у Франції піщаник видобувають за допомогою гідроабразивного різання для всіх вертикальних і горизонтальних розрізів, за винятком глухого забою, який ріжеться шляхом проштовхування колони блоків за допомогою вилочного навантажувача. Експериментальний європейський досвід довів необхідність удосконалення методів видобутку комерційних блоків, щоб забезпечити більшу надійність і зробити простіше обладнання комерційно доступним [7]. Для здійснення глибокого пропилю в породі на глибину до кількох метрів потрібне проникнення коліматора в щілину. Практично проблема вирішується використанням поперечної висувної балки з коліматорами, що створюють один або декілька (зазвичай два) струмені, що генеруються обертовими або коливальними соплами, або кількома кутовими струменями з нерухомої головки (рис. 2). Однак таке важке обладнання потребуватиме достатньої питомої потужності для здійснення різання, що, крім того, спричинить більше часу на встановлення та регулювання на опорних рейках [6].

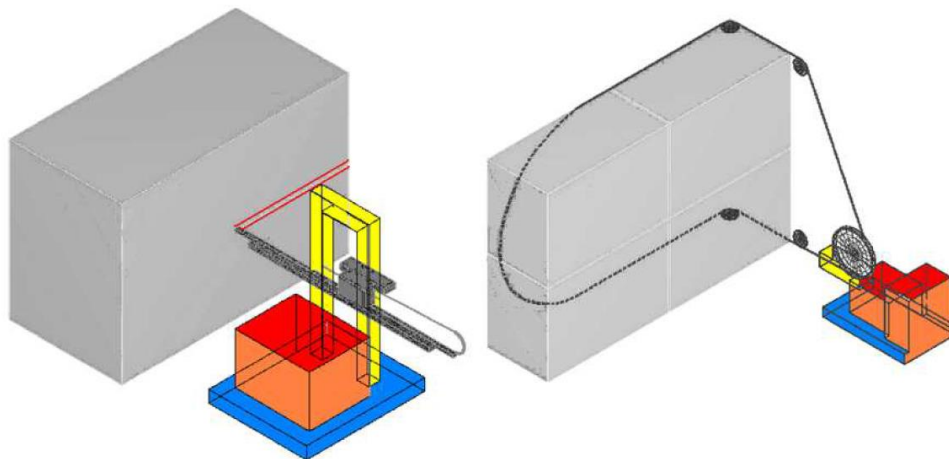


Рис. 3. Приклад використання гідроабразивного різання та алмазно-канатного різання для видобування гранітних блоків (R.Ciccu) [6]

До основних технологічних критеріїв вибору способу видобування блоків з облицювального каменю варто зарахувати міцність та твердість породи, тріщинуватість масиву, геометрію залягання пласта з врахуванням конфігурації систем тріщин, продуктивність, витрату робочого інструменту, якість отриманої поверхні блоків [8].

Таблиця 1

Критерії поєднання двох технологій видобування блоків каменю: вирізання алмазним канатом і вирізання гідроабразивним струменем води

Критерій	Алмазно-канатне різання	Гідроабразивне вирізання	Комбінований ефект
Швидкість процесу видобування	Висока (до 10–20 см/хв)	Середня (3–8 см/хв)	Оптимізація за рахунок попереднього прорізу
Якість поверхні блоку	Середня	Висока	Зменшення втрат при розколюванні
Енерговитрати	Помірні	Вищі	Компенсуються зменшенням простоїв
Знос інструменту	Високий при абразивних породах	Менший	Розподіл навантаження

При поєднанні алмазно-канатного та гідроабразивного способів різання (рис. 3) при видобуванні блоків гідроабразивний метод є більш ефективним для формування початкових канавок, а алмазний канат – для завершального розрізання, за наявності тріщин перевагу має звичайно гідроабразивний спосіб, адже менше вібрацій і немає явища заклинювання робочого інструменту, як у випадку з алмазним канатом. Що стосується конфігурації блока та глибини розрізу, то алмазний канат зручніший для довгих пропиливі, а гідроабразивне різання для точних стартових і завершальних зрізів [9].

Вибір черговості операцій: Варіант 1: гідроабразивне різання формує стартові шви, алмазний канат завершує відділення блока. Варіант 2: алмазний канат робить основні пропили, гідроабразивне різання формує чистові або контрольні зрізи.

Таблиця 2

Критерії поєднання двох технологій видобування блоків каменю: буро-клинового способу і вирізання гідроабразивним струменем води

Критерій	Буро-клиновий спосіб	Гідроабразивне вирізання	Комбінований ефект
Швидкість процесу видобування	Висока швидкість при попередньому розколі	Висока швидкість при попередньому розколі	Висока швидкість при попередньому розколі
Якість поверхні блоку	Низька	Висока	Зменшення втрат при розколюванні
Енерговитрати	Помірні, залежать від буріння і розколу	Помірні, залежать від буріння і розколу	Помірні, залежать від буріння і розколу
Знос інструменту	Значний знос бурів і клинів при твердих породах	Значний знос бурів і клинів при твердих породах	Значний знос бурів і клинів при твердих породах

Комбіноване використання буро-клинового способу та гідроабразивного вирізання дозволяє поєднати переваги обох технологій: швидке первинне відділення блоків і точну фінішну обробку [10]. Це забезпечує високу якість поверхні, точну геометрію блоків, зменшення втрат корисного каменю та оптимізацію енерговитрат. Крім того, комбінований підхід підвищує безпеку праці, знижує негативний вплив на масив і навколишнє середовище, а також продовжує ресурс інструменту. В цілому поєднання цих методів є ефективним і прогнозовано економічно доцільним для видобутку облицювального каменю (табл. 1).

Також важливо оцінити економічний ефект комбінації традиційних методів видобування блоків природного каменю. Для цього оцінимо вартість $C_{\text{алм.}}$ розрізу 1 м² гранітного блоку алмазним канатом:

$$C_{\text{алм.}} = \frac{C_{\text{мат}} + C_{\text{ен}} + C_{\text{праці}} + C_{\text{ам}} + C_{\text{обсл}}}{S}, \quad (1)$$

де $C_{\text{мат}}$ – вартість витратних матеріалів (алмазний канат, мастило, вода);

$C_{\text{ен}}$ – вартість електроенергії;

$C_{\text{праці}}$ – оплата праці операторів;

$C_{\text{ам}}$ – амортизація використання алмазно-канатної установки;

$C_{\text{обсл}}$ – технічне обслуговування;

S – загальна площа різі (м²).

Підставимо у формулу (1) середні значення величин, що релевантні видобутку комерційних гранітних блоків в Україні:

$$C_{\text{алм.}} = \frac{18,19 \text{ грн/м}^2 + 72,77 \text{ грн/м}^2 + 242,57 \text{ грн/м}^2 + 24,26 \text{ грн/м}^2}{1 \text{ м}^2} \approx 357,78 \text{ грн/м}^2.$$

Оцінимо вартість $C_{\text{бур.}}$ розколу 1 м² гранітного блоку буро-клиновим способом:

$$C_{\text{бур.}} = n \cdot h \cdot C_{\text{бур}} + C_{\text{клин}} + C_{\text{роб}} + C_{\text{облад}}, \quad (2)$$

де n – кількість отворів на 1 м²;

h – глибина одного отвору (м);

$C_{\text{бур}}$ – вартість буріння 1 м отвору (грн/м);

$C_{\text{клин}}$ – вартість клинів на 1 м² (грн/м²);

$C_{\text{роб}}$ – вартість роботи персоналу на 1 м² (грн/м²);

$C_{\text{облад}}$ – амортизація і експлуатація обладнання на 1 м² (грн/м²).

Підставимо у формулу (2) середні значення величин, що релевантні видобутку комерційних гранітних блоків в Україні.

$$C_{\text{бур.}} = 2 \cdot 1 \text{ м} \cdot 400 \text{ грн/м} + 50 \text{ грн/м}^2 + 200 \text{ грн/м}^2 + 100 \text{ грн/м}^2 \approx 1150 \text{ грн/м}^2.$$

Оцінимо вартість розрізу 1 м² гранітного блоку гідроабразивною установкою:

$$C_{\text{алм.}} = C_{\text{абраз.}} + C_{\text{електр.}} + C_{\text{роб}} + C_{\text{вода}} + C_{\text{облад}}, \quad (3)$$

де $C_{\text{абраз.}}$ – вартість абразиву на 1 м² (грн/м²);

$C_{\text{електр.}}$ – вартість електроенергії 1 м² (грн/м²);

$C_{\text{роб}}$ – вартість роботи персоналу на 1 м² (грн/м²);

$C_{\text{вода}}$ – вартість витраченої води на 1 м² (грн/м²);

$C_{\text{облад}}$ – амортизація і експлуатація обладнання на 1 м² (грн/м²).

Підставимо у формулу (3) середні значення величин, що релевантні видобутку комерційних гранітних блоків в Україні.

$$C_{\text{алм.}} = 1500 \text{ грн/м}^2 + 625 \text{ грн/м}^2 + 750 \text{ грн/м}^2 + 10 \text{ грн/м}^2 + 500 \text{ грн/м}^2 \approx 3385 \text{ грн/м}^2.$$

З проведених розрахунків видно, що алмазно-канатна технологія різання високоміцних порід природного облицювального каменю є найбільш економічно доцільною, буро-клиновий спосіб відколу також є досить економічно малозатратним, а от вартість розрізу 1 м² гранітного блоку гідроабразивною установкою, якщо цю технологію використовувати самостійно, є найбільш дорогою. Зокрема варто згадати відсоток експлуатаційних втрат при використанні вище зазначених методів впливу на масив гірських порід [4]. Під час використання алмазно-канатної технології різання втрати становлять до 5,1 %; при застосуванні буро-клинової технології величина експлуатаційних втрат становить до 31 % і при використанні гідроабразивної технології різання величина експлуатаційних втрат наближена до 0. Цей показник нівелює високу вартість використання гідроабразивної технології різання природного каменю і в комбінації з традиційними методами впливу на природний камінь дає високий економічний ефект і значне зменшення експлуатаційних витрат на видобування комерційних блоків з природного облицювального каменю (табл. 2).

Висновки та перспективи подальших досліджень. Комбінована гідроабразивна технологія має значний потенціал для підвищення якості та економічної ефективності видобутку облицювального каменю в Україні. Впровадження вимагає початкових інвестицій і ретельної організації водовідведення та утилізації абразиву, але може знизити загальні витрати, зменшити втрати матеріалу та поліпшити екологічні показники виробництва. Оптимальний спосіб видобування вибирають за критерієм мінімальної собівартості при забезпеченні високої якості блоку та мінімальних втрат, враховуючи структуру породи і технічні можливості обладнання.

Список використаної літератури:

1. Махно А.М. Дослідження параметрів шорсткості поверхні природного облицювального каменю при гідроабразивному впливі на гірську породу / А.М. Махно, І.А. Піскун // Технічна інженерія. – 2025. – № 1 (95). – С. 172–178.
2. Сучасні фізико-хімічні методи обробки природного каменю / Р.В. Соболевський, В.Г. Левицький, В.А. Стріха, В.В. Коробійчук. – Житомир: ЖДТУ, 2014. – С. 58–129.
3. Optimization of working parameters of water jet cutting in terms of depth and width of cut / Y.Ozcelik, M.Gursel, R.Ciccu and other // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part E: Journal of Process Mechanical Engineering. – 2012. – Vol. 226, № 1. – P. 64–78.
4. Дослідження експлуатаційних втрат блочної сировини / С.С. Іськов, О.М. Толкач, Г.В. Скиба та ін. // Технічна інженерія. – 2023. – № 1 (91). – С. 319–330.
5. Engin I.C. A correlation for predicting the abrasive water jet cutting depth for natural stones / I.C. Engin // South African Journal of Science. – 2012. – Vol. 108, № 9/10.
6. Ozcelik Y. Comparison of the water jet and some traditional stone surface treatment methods in different lithotypes / Y.Ozcelik, R.Ciccu, G.Costa // Construction and Building Materials. – 2011. – Vol. 25, № 2. – P. 678–687.
7. Grosso B. Effect of the Rock Stress on the Water Jet Cutting Performance / B.Grosso, V.Dentoni, A.Bortolussi // Rock Mechanics and Rock Engineering. – 2021. – Vol. 54, № 9. – P. 4987–4999.
8. Improvement of Rock Cutting Performance through Two-Pass Abrasive Waterjet Cutting / G.Aydin, I.Karakurt, M.Amiri, S.Kaya // Sustainability. – 2022. – Vol. 14, Issue 19.

9. Experimental investigation on concrete rock breaking performance of self-excited oscillation pulsed waterjet / H.Li, S.Liu, F.Zhou and other // *Engineering Fracture Mechanics*. – 2022. – Vol. 268.
10. Aydin K. Abrasive Water Jet Cutting of Granite / K.Aydin // *Journal of Powder Metallurgy & Mining*. – 2014. – Vol. 3, № 2.

References:

1. Makhno, A.M. and Piskun, I.A. (2025), «Doslidzhennia parametriv shorstkosti poverkhni pryrodnoho oblytsiuvalnoho kameniu pry hidroabrazyvnomu vplyvi na hirsku porodu», *Tekhnichna inzheneriia*, No. 1 (95), pp. 172–178.
2. Sobolevskiy, R.V., Levytskyi, V.H., Strikha, V.A. and Korobiichuk, V.V. (2014), *Suchasni fizyko-khimichni metody obrobky pryrodnoho kameniu*, ZhDTU, Zhytomyr, pp. 58–129.
3. Ozelik, Y., Gursel, M., Ciccu, R. et al. (2012), «Optimization of working parameters of water jet cutting in terms of depth and width of cut», *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part E. Journal of Process Mechanical Engineering*, Vol. 226, No. 1, pp. 64–78.
4. Iskov, S.S., Tolkach, O.M., Skyba, H.V. et al. (2023), «Doslidzhennia ekspluatatsiinykh vtrat blochnoi syrovyny», *Tekhnichna inzheneriia*, No. 1 (91), pp. 319–330.
5. Engin, I.C. (2012), «A correlation for predicting the abrasive water jet cutting depth for natural stones», *South African Journal of Science*, Vol. 108, No. 9/10.
6. Ozelik, Y., Ciccu, R. and Costa, G. (2011), «Comparison of the water jet and some traditional stone surface treatment methods in different lithotypes», *Construction and Building Materials*, Vol. 25, No. 2, pp. 678–687.
7. Grosso, B., Dentoni, V. and Bortolussi, A. (2021), «Effect of the Rock Stress on the Water Jet Cutting Performance», *Rock Mechanics and Rock Engineering*, Vol. 54, No. 9, pp. 4987–4999.
8. Aydin, G., Karakurt, I., Amiri, M. and Kaya, S. (2022), «Improvement of Rock Cutting Performance through Two-Pass Abrasive Waterjet Cutting», *Sustainability*, Vol. 14, Issue 19.
9. Li, H., Liu, S., Zhou, F. et al. (2022), «Experimental investigation on concrete rock breaking performance of self-excited oscillation pulsed waterjet», *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 268.
10. Aydin, K. (2014), «Abrasive Water Jet Cutting of Granite», *Journal of Powder Metallurgy & Mining*, Vol. 3, No. 2.

Махно Артур Миколайович – аспірант Державного університету «Житомирська політехніка».
<https://orcid.org/0000-0002-7428-9578>.

Наукові інтереси:

- відкриті гірничі роботи; сучасні способи обробки та видобування облицювального каменю;
- раціональне використання природних ресурсів та сталий розвиток; екобезпека.

E-mail: artma28@gmail.com.

Мамрай Василь Васильович – кандидат технічних наук, доцент Державного університету «Житомирська політехніка».
<https://orcid.org/0000-0003-1801-7049>.

Наукові інтереси:

- процеси обробки природного каменю; сучасні методи видобування корисних копалин.

E-mail: mamrayv@ukr.net.

Makhno A.M., Mamrai V.V.

Prospects for the implementation of combined hydro-abrasive technology in the processing and extraction of natural dimension stone in Ukraine

The article presents modern approaches to increasing the efficiency of the processing and extraction of natural decorative stone by using combined abrasive waterjet technology. The existing methods of separating commercial decorative stone blocks in quarries of block building materials, their energy costs and technological features are analysed. The high relevance of the topic is explained, due to the stable demand for high-quality dimension stone and the need to reduce production costs while improving the quality of the blocks. Traditional extraction technologies (drill-blast, drill-wedge, diamond wire, disk, bar, with the use of non-explosive depleting compounds) are analysed and their main disadvantages are identified – high material losses, mechanical damage, noise, dust, thermal deformations and limitations in geometric accuracy. A combination of classical methods of separating blocks from the massif of natural facing stone in quarries of mineral building materials and the high-pressure abrasive waterjet cutting method with abrasive action is proposed, which allows to reduce the energy intensity of the process of processing and extracting natural decorative stone, reduce losses of useful material and improve the quality of commercial blocks. A technical and economic comparison of the cost of cutting 1 m² of a granite block by different methods was carried out: diamond wire (≈358 UAH/m²), drill-wedge (≈1150 UAH/m²) and abrasive waterjet (≈3385 UAH/m²). Despite the higher cost, the abrasive waterjet method provides minimal operational losses of material (about 0 %), which compensates for costs and increases profitability when used in combination. The article also provides criteria for combining methods, determines optimal technological parameters and substantiates the advantages of waterjet cutting for creating accurate starting and finishing cuts. It is noted that the combined technology reduces energy consumption, material losses, noise and dust levels, and also improves environmental performance. Prospects for further research aimed at optimizing the parameters of the combined method, developing mobile quarry waterjet units and assessing long-term economic efficiency for facing stone quarries in Ukraine are identified.

Keywords: natural stone; extraction and processing of natural stone; hydro-abrasive waterjet method; architectural and building materials; mineral deposits.

Стаття надійшла до редакції 30.09.2025.