

С.М. Шишко, аспірант
А.О. Криворучко, к.т.н., доц.
Л.Г. Полонський, д.т.н., проф.
О.В. Шапочніков, асистент

Державний університет «Житомирська політехніка»

Вплив буроклинових робіт на якість видобутих блоків з природного каменю

У статті досліджено вплив буроклинових робіт на якість товарної продукції кар'єру, що спеціалізується на видобуванні блочної сировини, з позицій керованого руйнування гірського масиву та забезпечення стабільних товарних характеристик природного каменю. Розглянуто основні технологічні параметри буроклинового відокремлення (глибину, крок буріння, орієнтацію шпурів відносно систем природної тріщинуватості та послідовність розклинювання) і проаналізовано їхній вплив на напружено-деформований стан у зоні відриву, ініціацію та розвиток тріщин, формування поверхонь відколу і виникнення дефектів (діагональних сколів, та зміщення площини відколу). Показано, що в умовах високоміцних порід (граніт, габро, лабрадорит) ключовим чинником якості є узгодження параметрів буріння та режимів розклинювання з анізотропією й структурною неоднорідністю масиву, оскільки технологічні відхилення спричиняють появу додаткової тріщинуватості та втрати монолітності блоків.

Запропоновано систему показників оцінювання якості продукції, яка охоплює вихід товарних блоків, частку браку, геометричну точність дотримання проектних габаритів, характер і шорсткість поверхонь відколу, а також орієнтацію технологічних тріщин. Наведено результати порівняльного аналізу якості блоків за різних режимів буроклинових робіт і встановлено критичні фактори зниження товарності, зокрема нерівномірність прикладання зусиль клинів, надмірний крок шпурів, відхилення осей буріння, неоднорідність буріння за глибиною та локальні концентрації напружень у приконттактній зоні. На основі отриманих закономірностей сформульовано практичні рекомендації щодо оптимізації параметрів буріння і розклинювання, спрямовані на мінімізацію дефектів, підвищення виходу кондиційної продукції та забезпечення стабільної якості блочного каменю в умовах відкритої розробки.

Ключові слова: відкриті гірничі роботи; блоки природного каменю; буроклинова технологія; природний камінь.

Актуальність теми. Природний камінь вирізняється широкою варіативністю декоративних та фізико-механічних властивостей: різноманітням кольорової гами та мінералогічних відтінків, високою насиченістю й стабільністю забарвлення, індивідуальним текстурно-структурним рисунком, а також можливістю формування поверхонь із різним рівнем обробки – від дзеркально відполірованих до шліфованих, термооброблених і фактурних. Поряд із естетичними характеристиками, камінь демонструє значну міцність, зносостійкість, морозостійкість і довговічність, що забезпечує його надійну експлуатацію в умовах змінних кліматичних та механічних навантажень. Сукупність цих властивостей зумовлює високий матеріалознавчий та архітектурно-будівельний потенціал природного каменю, розширюючи можливості його застосування у конструктивних і оздоблювальних рішеннях, а також створюючи передумови для реалізації складних дизайнерських концепцій у цивільному й промисловому будівництві та сучасній архітектурі.

Актуальність дослідження впливу буроклинових робіт на якість товарної продукції кар'єру визначається специфікою видобування природного каменю блочної кондиції, де ключовим критерієм ефективності є не маса добутої гірничої маси, а вихід кондиційних блоків із заданими габаритами, геометричною правильністю та мінімальною кількістю дефектів. На відміну від кар'єрів щєбеневої сировини, у блочному каменедобуванні руйнування масиву повинно бути керованим і малодеструктивним, оскільки надмірне порушення структури порід призводить до зростання технологічної тріщинуватості, погіршення якості поверхонь відколу, втрати монолітності та зниження товарності каменю. У цих умовах буроклинові роботи є одним із базових методів відокремлення монолітів, а їхні параметри безпосередньо формують напружено-деформований стан у приконттактній зоні, визначають напрям і характер розвитку тріщин та, відповідно, впливають на геометричні й структурні характеристики отриманих блоків.

Додаткову складність при видобуванні становить природна анізотропія та неоднорідність кам'яних масивів, яка зумовлена системами тріщин, шаруватістю, текстурними особливостями й локальними зонами ослаблення та неоднорідності. За таких умов навіть незначні відхилення технологічних параметрів (крок і глибина шпурів, їх орієнтація відносно систем тріщин, рівномірність і послідовність розклинювання,

якість буріння) можуть спричиняти формування появи діагональних відколів, небажаних тріщин, появу сколів і відшарувань, а також збільшення частки браку. Тому наукове обґрунтування раціональних режимів буроклинового відокремлення, встановлення основних факторів, що впливають на появу дефектів, і розроблення критеріїв контролю якості є необхідними для підвищення виходу кондиційних блоків, зниження виробничих втрат, стабілізації товарних характеристик і забезпечення конкурентоспроможності продукції природного каменю в умовах відкритої розробки.

Аналіз останніх досліджень та публікацій, на які спираються автори. Природний камінь як об'єкт геологічних і технологічних досліджень вивчають здавна, оскільки його структурно-текстурні особливості та фізико-механічні властивості безпосередньо визначають можливості раціонального видобування й напрями промислового використання. У роботах [1–3, 5, 6] виконано геометризацію досліджень і масивів природного каменю Коростенського плутону на підставі аналізу їх просторового положення, внутрішньої будови та взаємозв'язків між різновидами кристалічних порід. Для цього застосовано сучасний інструментарій цифрової геометризації, який базується на використанні комп'ютерних технологій і методів просторового моделювання для побудови цифрових моделей розподілу параметрів у межах родовищного простору.

У межах дослідження [2, 4–6] проаналізовано просторову мінливість ключових якісних показників природного каменю, зокрема межі міцності на стиск у сухому і зволоженому стані, водопоглинання, показників, що характеризують рудоносність, а також виконано оцінку декоративності порід. На основі отриманих даних сформовано деталізовані моделі зміни в межах родовища основних властивостей природного каменю та встановлено графічні й аналітичні залежності, які можуть бути використані для науково обґрунтованого планування гірничих робіт, оптимізації селективного видобування та прогнозування якості блочної продукції. Додатково охарактеризовано внутрішню структуру інтрузивів Володарськ-Волинського масиву Коростенського плутону, що підвищує інформативність геолого-технологічної моделі та точність прогнозів щодо властивостей природного каменю в межах ділянки відпрацювання.

Останніми роками в наукових публікаціях з видобування природного каменю простежується стійка тенденція до переходу від суто технологічного опису процесів відокремлення монолітів до кількісної оцінки якості товарної продукції через показники тріщинуватості, геометричної точності блоків, характеру поверхонь відколу та виходу кондиційних блоків. У працях [2, 7, 8], присвячених механіці руйнування гірських порід, обґрунтовується, що результати буроклинового відокремлення визначаються напружено-деформованим станом у приконтатній зоні, який формується схемою розміщення шпурів, їх геометрією, орієнтацією відносно систем природної тріщинуватості та режимом прикладання зусиль розклинювання. Підкреслюється роль анізотропії та неоднорідності масиву, що спричиняє варіативність траєкторій розвитку тріщин і, відповідно, нестабільність якості блоків навіть за близьких технологічних параметрів.

Паралельно з технологічними роботами активного розвитку набули публікації щодо цифрових методів контролю геометрії та якості у кар'єрних умовах [9–12]. У джерелах з інженерної геодезії та маркшейдерії показано ефективність використання 3D-вимірювань (TLS, мобільне сканування SLAM, фотограмметрія БПЛА та наземна фотограмметрія) для оперативної інвентаризації, оцінювання габаритів і об'ємів, а також документування поверхонь відколу й дефектів. У роботах [10–12] зі SLAM-сканування підкреслюється перевага оперативності та зменшення трудомісткості польових робіт, водночас наголошується на потребі метрологічної перевірки, оскільки результати можуть містити систематичні зміщення та похибки реєстрації хмар точок. Додатково в сучасних публікаціях аналізуються можливості споживчих сенсорів (зокрема LiDAR у смартфонах) для швидких 3D-фіксацій; при цьому акцент робиться на залежності точності від траєкторії знімання, довжини маршруту та умов освітлення, що важливо для відкритих виробок.

Разом із тим, попри наявність значної кількості робіт із лазерного сканування та 3D-моделювання загалом, аналіз літератури свідчить, що дослідження, спрямовані саме на блочні кар'єри, є обмеженими й часто мають фрагментарний характер: недостатньо розкрито питання зв'язку параметрів буроклинових робіт із метриками 3D-оцінювання якості (геометрична точність блоків, дефектність поверхонь, статистика тріщин) та бракує узгоджених методик, які б одночасно враховували технологічні режими відокремлення і цифровий контроль результату.

Отже, слід зазначити, що аналіз впливу буроклинових робіт на якість товарної продукції кар'єру підтверджує їх визначальну роль у формуванні геометричної точності блоків, стану поверхонь відколу та рівня тріщинуватості, від яких безпосередньо залежить вихід кондиційної блочної сировини. Водночас різноманітність гірничо-геологічних умов (анізотропія, природна тріщинуватість, структурна неоднорідність масиву) та технологічна варіативність параметрів буріння і розклинювання зумовлюють потребу в подальших дослідженнях для підвищення керованості процесу відокремлення монолітів і зниження втрат.

Метою статті є встановлення закономірностей впливу параметрів буроклинових робіт на якість товарної продукції кар'єру при видобуванні блочного природного каменю та обґрунтування раціональних

технологічних режимів буріння і розклинювання, що забезпечують підвищення виходу кондиційних блоків, зменшення дефектності (технологічної тріщинуватості, сколів, відшарувань) і стабілізацію геометричних параметрів отриманої продукції.

Викладення основного матеріалу. Використання клинових технологій для відокремлення природного каменю має доволі тривалу історію: сам принцип керованого розклинювання (розколювання) застосовували ще з давніх часів як один із найпростіших і водночас ефективних способів руйнування монолітних порід у заданому напрямку. Незважаючи на розвиток механізованих і високопродуктивних методів, клиновий спосіб зберігає актуальність і нині, оскільки забезпечує локальне, енергетично відносно ощадне та малодеструктивне відокремлення блоків природного каменю без інтенсивного динамічного навантаження на природний масив.

У сучасній практиці відкритої розробки родовищ блочного каменю клинові (зокрема буроклинові) роботи широко застосовують для виділення монолітів і формування товарних блоків, коли необхідно мінімізувати техногенно індуковану тріщинуватість і зберегти цілісність та геометричну правильність продукції. Найбільш часто цей метод використовують під час видобування блоків із високоцінних магматичних порід, таких як: лабродорит, габро, граніт та інших, які характеризуються високими показниками міцності та абразивності, а також складними умовами тріщинуватості. У таких породах застосування канатоопильних установок є технічно та економічно недоцільним, а вибухових способів – обмеженим або економічно неприйнятним через ризик утворення додаткових дефектів. Натомість клинове розклинювання дає змогу контролювати утворення та розвиток тріщини й отримувати блоки з прийнятними показниками товарності та якості.

Технологія відокремлення природного каменю від масиву методом розклинювання ґрунтується на створенні в породі контрольованої зони руйнування шляхом буріння лінійної (стрічкової) системи шпурів, у які встановлюють клинові пристрої. Зусилля розколу формують або внаслідок ударного навантаження на клин (ручне клинування), або за рахунок керованого гідравлічного тиску, що створюється гідросистемою гідроклина. У більшості виробничих схем клини розміщують у шпурах круглого поперечного перерізу; рідше застосовують овальні шпури, сформовані спеціалізованим інструментом (рис. 1), що може підвищувати ефективність передачі зусилля та керованість розвитку тріщини в окремих гірничо-геологічних умовах.



Рис. 1. Загальний вигляд буроклинового способу відділення природного каменю

За наявності в масиві чітко виражених природних тріщин і коли природні окремісті мають форму, що близька до прямокутної, а їх габарити відповідають вимогам до стандартних блоків, клинові елементи в окремих випадках допускається встановлювати безпосередньо в площини розкритих тріщин, використовуючи їх як вже готові поверхні відділення (відколювання). Такий підхід, з одного боку, зменшує обсяг буріння, а з іншого – сприяє збереженню цілісності декоративного каменю за умови коректного вибору напрямку розколу.

Для буроклинового способу принципово важливою технологічною передумовою є наявність не менше трьох площин відслонення (вільних поверхонь) у вибої, що знижує необхідні зусилля відриву та підвищує

керованість процесу відокремлення моноліту. Найсприятливіші умови відколювання реалізуються тоді, коли постіль блоку, що відокремлюють, збігається з площиною горизонтальної природної системи тріщини, а одна з бічних чи торцевих граней уже відслонена (тобто має вихід на вільну поверхню). Просторову орієнтацію самого блоку доцільно узгоджувати зі структурною будовою масиву: одну з довгих граней орієнтують паралельно системі подовжніх тріщин, тоді як торцеву – паралельно поперечним тріщинам. Узгодження площини розколювання з напрямом найкращої розколюваності породи, що визначається її анізотропною структурно-текстурною будовою та орієнтацією систем природної тріщинуватості, забезпечує формування поверхонь відколу з мінімальними нерівностями. Такий підхід знижує інтенсивність концентрації напружень і, як наслідок, зменшує ймовірність техногенно індукованих дефектів (мікротріщин, сколів, відшарувань), а також скорочує потребу в додатковому пасеруванні (допрацюванні) блоків. У підсумку досягається зменшення втрат декоративного каменю та підвищення виходу кондиційної блочної продукції за рахунок більш керованого руйнування моноліту.

Виробничі спостереження свідчать, що, незважаючи на технологічні переваги гідроклинового розколювання (керованість процесу, зниження динамічних навантажень, підвищення безпеки робіт), у реальних умовах можливі суттєві втрати та утворення відходів природного каменю, що пов'язані з явищем так званого «зносу площини відколу» – відхиленням або нестабільністю траєкторії магістральної тріщини від проектної площини (рис. 1–2). Наявність даного ефекту зумовлює необхідність науково обґрунтованого визначення граничної висоти моноліту, для якої забезпечується стабільне формування поверхні розколу без небажаних сколів та відхилень. Зазначена гранична висота є функцією комплексу факторів: структурної будови каменю (зернистість, текстура, наявність природних площин послаблення), ступеня анізотропії фізико-механічних властивостей, інтенсивності та конфігурації послаблення площини розколу системою шпурів перфораторного буріння (так зване питоме послаблення), а також геометрії та схеми розміщення шпурів у площині розколювання.

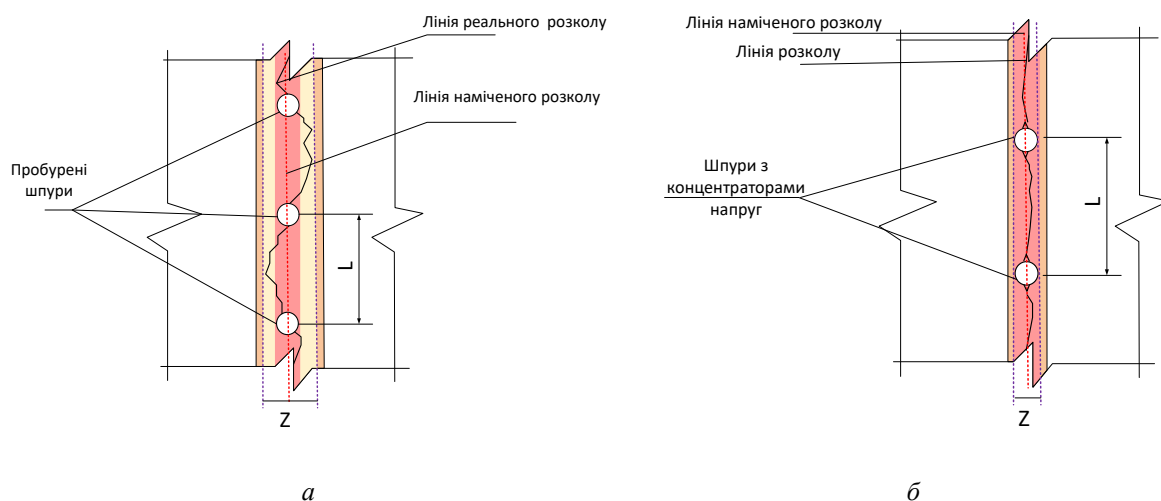


Рис. 2. Схема відхилення лінії розколу від лінії наміченого розколу грані блока; Z , Z_1 – ширина зони відхилення лінії розколу: а) без концентратора напруг, б) з концентратором напруг

Експериментально встановлено, що зі зростанням висоти монолітів підвищується ймовірність формування діагонального сколу, що є одним із типових проявів неконтрольованого розвитку тріщини та погіршення якості блочної продукції. Тому було проведено серію вимірювань та досліджень оптимального значення висоти блоку (моноліту) для габроїдних порід, що були представлені лабрадоритом та габро-норитом. Дослідження здійснювались в межах діючих кар'єрів.

Як показано на рисунку 3, частота діагонального сколу зростає прямо пропорційно висоті моноліту і в досліджуваному діапазоні адекватно описується поліноміальними залежностями (1 та 2).

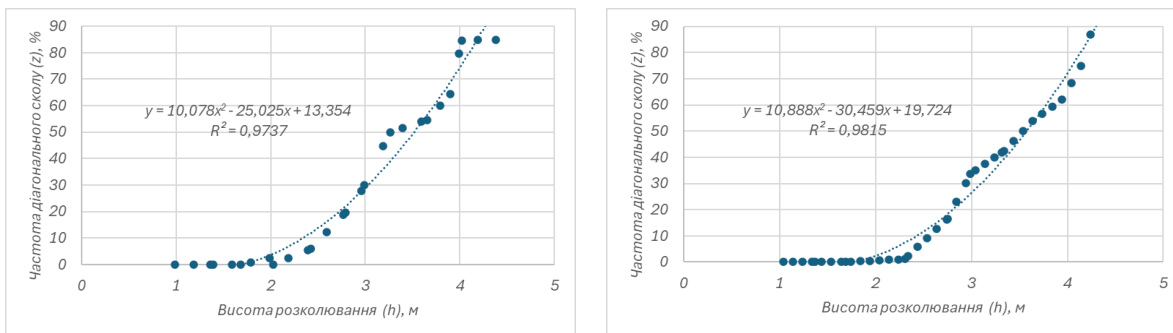
Для конкретних родовищ ці залежності можна формалізувати у вигляді рівнянь, де частоту дефекту подають у відсотках, що дає змогу використовувати їх як інженерний інструмент для прогнозування ризику дефектів і вибору раціональних параметрів гідроклинового розколювання.

$$y = 10,078x^2 - 25,025x + 13,354, \quad (1)$$

при $R^2 = 0,9737$;

$$y = 10,888x^2 - 30,459x + 19,724, \quad (2)$$

при $R^2 = 0,9815$.



лабрадорит

габро-норит

Рис. 3. Залежність частоти діагонального сколу природного каменю (z) від висоти блоку, що відколюють (h)

Втрати декоративного каменю, пов’язані з нерівністю бокової грані блоку, здебільшого обумовлені відхиленням магістральної тріщини від заданої (проектної) лінії відбійки, яка в ідеалізованому випадку розглядається як горизонтальна вісь розколювання (рис. 2). Геометрія та просторове положення магістральної тріщини безпосередньо визначають якість бокової поверхні отриманого блоку (ступінь хвилястості, локальні виступи й западини, клиноподібні зони втрат), а отже – впливають на фактичний вихід кондиційної продукції.

Форма магістральної тріщини формується як результат взаємодії систем локальних тріщин, що виникають в зоні кожного шпура. Зокрема, під час відокремлення моноліту в окремих шпурах виникають радіальні (розвантажувальні) тріщини, які поширюються в масиві та з часом з’єднуються, утворюючи суцільну площину розколу. Кінцева траєкторія магістральної тріщини значною мірою залежить від кута зближення і взаємного «зустрічання» даних радіальних тріщин, а також від неоднорідності й анізотропії породи, відхилення осей шпурів, нерівномірності прикладання зусилля клинів і наявності природних площин послаблення. За несприятливих умов магістральна тріщина набуває криволінійного характеру та відхиляється від розрахункової осі, що призводить до погіршення якості граней і, у ряді випадків, робить необхідним виконання додаткового пасерування (механічного допрацювання) бокової поверхні блоку для приведення її до нормативних габаритів і геометричної правильності.

У загальному випадку об’єм каменю, який втрачають під час пасерування внаслідок відхилення магістральної тріщини від осі шпурів (або проектної осі відколювання), визначають за відповідною розрахунковою залежністю:

$$V_M = \frac{l_{ш}^2 \sin \alpha_2 \sin \alpha_1 h_{ш}}{2 \sin(180 - \alpha_1 - \alpha_2)}, \text{ м}^3 \tag{3}$$

де $l_{ш}$ – міжшпурова відстань (крок розміщення шпурів), м;

α_1 і α_2 – кути відхилення магістральної тріщини від горизонтальної осі відколювання відповідно в зоні першого і другого шпура, град.;

$h_{ш}$ – глибина пробурених шпурів, м.

Як ключовий технологічний параметр, що найбільш суттєво впливає на ступінь порушення монолітності природного декоративного каменю під час буроклинового відокремлення, у даному дослідженні обрано міжшпурову відстань (крок буріння). Такий вибір є обґрунтованим, оскільки саме крок шпурів визначає характер розподілу напружень у приконтактній зоні, умови ініціації та злиття локальних (радіальних) тріщин у єдину магістральну тріщину, а також масштаби розвитку мікротріщин і зони вторинного руйнування. Зі збільшенням відстані між шпурами зростає імовірність нерівномірного поширення тріщини, локальних концентрацій напружень і формування більш широкої зони пошкодження, що безпосередньо відображається на якості поверхонь відколу та виході кондиційних блоків.

Експериментальні результати та їх кількісні характеристики подано в таблиці 1, де наведено значення ширини зони порушення монолітності для різних варіантів міжшпурової відстані. За підсумками статистичної обробки встановлено, що залежність ширини зони порушення від кроку шпурів у досліджуваному діапазоні з достатньою точністю апроксимується лінійними моделями, які мають загальний вигляд:

без концентратора напруги: $Z = 0,3396l - 0,0007,$
 з концентратором напруги: $Z1 = 0,2667l - 0,036,$ (4)
 де l – відстань між шпурами, м.

Результати дослідження відхилення лінії розколу

№ з/п	Відстань між шпурами, м	Ширина зони порушення масиву, м, без концентратора	Ширина зони порушення масиву, м, з концентратором
1	0,21	0,077	0,022
2	0,24	0,088	0,033
3	0,31	0,121	0,044
4	0,36	0,132	0,066
5	0,42	0,143	0,088
6	0,45	0,176	0,099
7	0,52	0,198	0,11
8	0,56	0,209	0,121
9	0,63	0,22	0,143
10	0,65	0,253	0,154

Графічна залежність ширини зони порушення масиву від відстаней між шпурами наведена на рисунку 4.

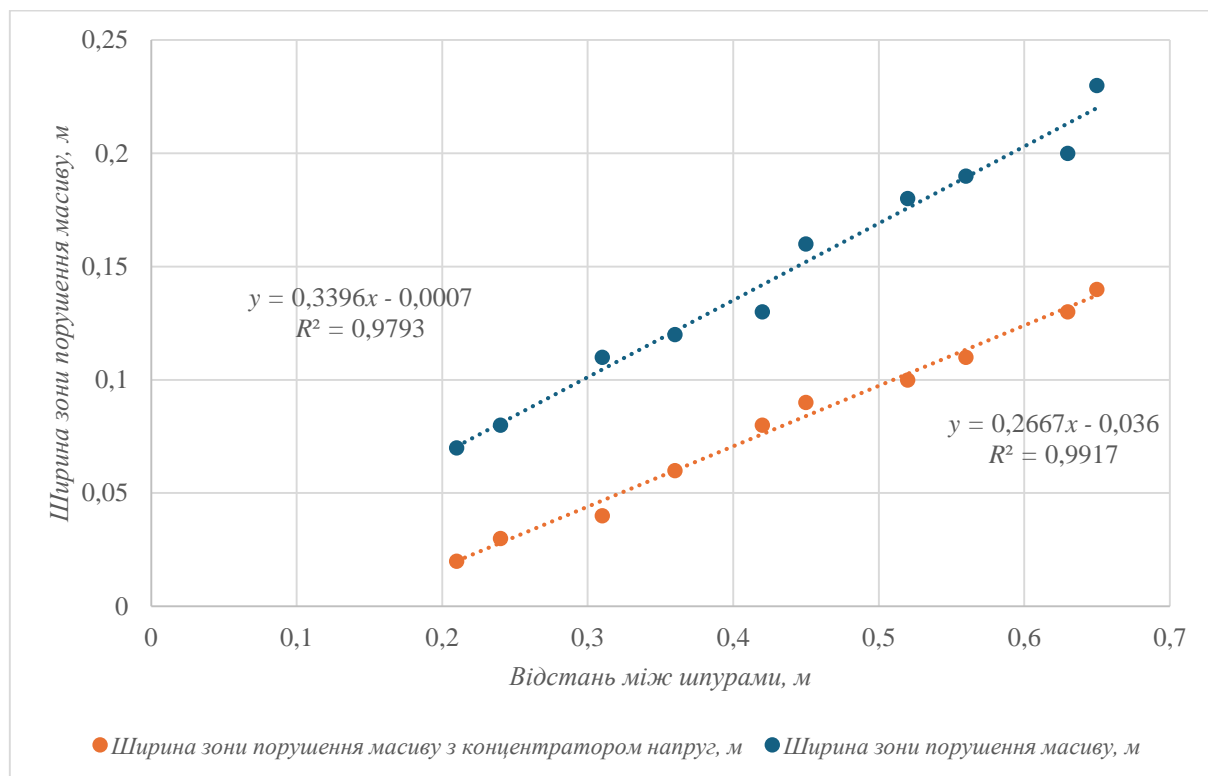


Рис. 4. Графічна залежність ширини зони порушення масиву від відстаней між шпурами

Аналіз експериментальних даних, наведених у таблиці, свідчить про наявність вираженого (досить тісного) статистичного зв'язку між досліджуваними параметрами буроклинового відокремлення та показниками порушення монолітності і якості поверхонь відколу. Це підтверджує, що керування ключовими технологічними параметрами дає змогу цілеспрямовано впливати на ширину зони пошкодження та, відповідно, на вихід кондиційної блочної продукції з природного каменю.

З огляду на механіку процесу розколювання, для зменшення порушення масиву під час буроклинових робіт доцільно зменшувати міжшпурову відстань (крок шпурів), оскільки вона визначає умови зближення та злиття локальних тріщин у магістральну площину розколу і впливає на інтенсивність концентрації напружень між шпурами. Водночас крок шпурів є не лише «якісним», а й економічно значущим параметром: його зменшення призводить до зростання обсягів буріння, витрат часу та ресурсів, а отже – до підвищення собівартості видобутку блоків. Тому вибір оптимальної відстані між шпурами слід

виконувати на основі компромісу між втратами від погіршення якості сировини (зростання відходів, необхідність пасерування, зниження виходу кондиційних блоків) і додатковими витратами на бурові роботи, тобто в межах техніко-економічної оптимізації.

Ширину пошкодження поверхні блока, зумовлену технологією розколювання, доцільно оцінювати за залежністю:

$$N_{\text{пош}} = b + Z, \text{ мм}, \quad (5)$$

де Z – ширина зони – технологічного пошкодження поверхні декоративного каменю внаслідок розколювання (типово 80–180 мм);

b – припуск (ширина шару) 15–55 мм, який під час подальшого розпилювання або доведення блока відрізається разом із порушеною поверхнею (технологічно необхідне зняття дефектного шару).

За результатами досліджень встановлено, що сумарна ширина пошкодження поверхні блоку природного декоративного каменю при розколюванні становить:

$$N_{\text{пош}} \approx 110\text{--}200 \text{ мм}.$$

Відповідно, експлуатаційні втрати (об'єм матеріалу, який вилучається під час доведення блока до кондиційних параметрів) можуть складати 0,1–0,7 м³, що еквівалентно приблизно 3–25 % від об'єму блока залежно від його габаритів (площини відколу), конфігурації дефектної зони та ступеня відхилення поверхні розколу.

А от застосування концентраторів напружень (елементів чи певних прийомів, які підсилюють керованість ініціації тріщини та стабілізують її розвиток уздовж заданої площини) дає змогу зменшити нерівності поверхонь відколу приблизно у 2 рази, а сумарні втрати – в 1,5–2 рази. Це підтверджує ефективність заходів, спрямованих на підвищення керованості руйнування та зниження техногенно індукованої дефектності, що є критичним для забезпечення стабільної якості товарної продукції у блочному каменедобуванні.

Висновки та перспективи подальших досліджень.

1. Встановлено наявність вираженого взаємозв'язку між технологічними параметрами буроклинових робіт (насамперед міжшпуровою відстанню) та показниками порушення монолітності, нерівності поверхонь відколу і виходу кондиційних блоків, що підтверджує можливість керування якістю товарної продукції шляхом оптимізації режимів буріння та розклинювання.

2. Обґрунтовано, що зменшення кроку шпурів сприяє звуженню зони пошкодження та зниженню інтенсивності вторинного тріщиноутворення, однак супроводжується зростанням обсягів бурових робіт і витрат, тому вибір параметрів має здійснюватися на основі техніко-економічно збалансованого підходу «якість – собівартість».

3. Показано, що ширина технологічного пошкодження поверхні блока при розколюванні визначається сумою зони пошкодження та технологічного припуску і для досліджуваних умов становить орієнтовно 120–250 мм, що може зумовлювати експлуатаційні втрати порядку 0,1–0,7 м³ (приблизно 3–32 %) залежно від габаритів блока та якості відколу.

4. Встановлено, що застосування елементів керування руйнуванням (концентраторів напружень) підвищує стабільність формування магістральної тріщини, зменшує нерівності сколу приблизно вдвічі та дозволяє скоротити втрати матеріалу в 1,5–2 рази, що підвищує вихід кондиційної продукції.

5. Підтверджено, що частота діагонального сколу природного каменю зростає зі збільшенням висоти монолітів, які розколюють, і в досліджуваному діапазоні описується лінійною залежністю, що може бути використано як інженерний критерій для обґрунтування граничної висоти розколювання та оцінювання ризику дефектів.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на розширення експериментальної бази для різних порід (граніт, габро, лабрадорит) і структурних умов із накопиченням статистично репрезентативних даних щодо впливу кроку, глибини та орієнтації шпурів, а також послідовності й рівномірності розклинювання на показники дефектності й вихід кондиційних блоків. Перспективним є формування прогнозних моделей, які кількісно описуватимуть ймовірність діагонального сколу, «зносу площини відколу» та ширину зони порушення як функцію висоти моноліту, анізотропії порід і параметрів послаблення площини розколу системою шпурів.

Важливим напрямом є метрологічно верифіковане впровадження 3D-контролю (TLS/SLAM/фотограмметрія) для об'єктивного оцінювання геометричної точності блоків, нерівностей поверхонь відколу та об'ємних втрат із подальшою стандартизацією методики порівняння результатів.

Доцільно також виконати техніко-економічну оптимізацію параметрів буроклинових робіт на основі цільової функції «якість – витрати», що враховує вартість буріння, частку браку, обсяг пасерування та ціну кондиційної продукції.

Окремої уваги потребує узгодження напрямів відокремлення й розкрою блоків з анізотропною будовою масиву та орієнтацією систем природної тріщинуватості, а також оцінювання ефективності концентраторів напружень і їх оптимальних схем застосування для мінімізації втрат декоративного каменю.

Список використаної літератури:

1. *Бакка М.Т.* Гірничо-геометричне планування гірничих робіт на родовищах облицювального каменю для збільшення коефіцієнту виходу блочної сировини / *М.Т. Бакка, В.В. Котенко* // Вісник КТУ. – 2005. – Вип. 9. – С. 20–23.
2. Аналіз структурних особливостей та геометризація якісних властивостей габроїдних порід східної частини Володарськ-Волинського масиву основних порід Коростенського плутону / *А.О. Криворучко, В.В. Котенко, С.А. Горикальов, Г.В. Бруй* // Технічна інженерія. – 2024. – № 1 (93). – С. 372–382. DOI: 10.26642/ten-2024-1(93)-372-382.
3. Визначення анізотропності та механічних властивостей природного каменю за допомогою інформаційно-комп'ютерних технологій обробки відеозображень (на прикладі габроїдних порід Коростенського плутону) / *А.О. Криворучко, Ю.О. Подчашинський, О.О. Ремезова, В.О. Шлапак* // Вісник ЖДТУ. Технічні науки. – 2005. – № 4 (35). – С. 128–134.
4. *Коробіичук В.В.* Удосконалення системи поточного планування видобування блоків природного каменю / *В.В. Коробіичук* // Вісник ЖДТУ. Технічні науки. – 2012. – № 3 (62). – С. 122–125.
5. *Іськов С.С.* Геометризація якісних показників покладів гранітоїдних і габроїдних декоративних каменів : дис. ... к.т.н. : 05.15.01 / *С.С. Іськов*. – Житомир, 2008. – 202 с.
6. *Котенко В.В.* Розробка методики оцінки кількісних і якісних параметрів лабрадоритових покладів з метою їх геометризації : дис. ... к.т.н. : 05.15.01 / *В.В. Котенко*. – Житомир, 2007. – 219 с.
7. *Levytskyi V.* The optimization of technological mining parameters in a quarry for dimension stone blocks quality improvement based on photogrammetric techniques of measurement / *V.Levytskyi, R.Sobolevskiy, V.V. Korobiichuk* // *Rudarsko-geološko-naftni zbornik*. – 2018. – Vol. 33, № 2. – P. 83–90.
8. Peculiarities of natural stone extraction technology with the help of diamond wire machines / *I.Korobiichuk, V.Korobiichuk, S.Iskov and other* // *Exploration and Mining : 16 th International Multidisciplinary Scientific GeoConference Science and Technologies in Geology, 30.06–6.07.2016*. – Albena, Bulgaria, 2016. – Vol. 2. – P. 649–656.
9. Використання методів цифрової фотограмметрії в умовах підземних гірничих виробок / *Л.В. Долгих, С.В. Діхтяр, А.О. Томашевська* // Вісник Криворізького національного університету. – 2021. – Вип. 52. – С. 85–89. DOI: 10.31721/2306-5451-2021-1-52-85-90.
10. Автоматизація визначення геометричних параметрів блоків природного каменю на основі фотограмметричного аналізу за допомогою віДос RTK Rover / *В.В. Котенко, М.А. Скорик, О.М. Гнітецький, І.А. Піскун* // Мінеральні ресурси України. – 2026. – № 1. – С. 59–65. DOI: 10.31996/mru.2026.1.59-65.
11. Методика застосування slam-технології у топографічному картографуванні / *Д.О. Кінь, Н.Ю. Лазоренко, Ю.О. Карпінський та ін.* // Геодезія та землевпорядкування. – 2025. – С. 610–626. DOI: 10.32347/2786-7269.2025.15.610-626.
12. Застосування наземного лазерного сканування (SLAM R100) в умовах відкритих гірничих виробок / *В.Котенко, Л.Дорош, В.Ковтун та ін.* // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. – 2025. – Вип. II (50). – С. 135–143. DOI: 10.33841/1819-1339-2-50-135-143.

References:

1. Bakka, M.T. and Kotenko, V.V. (2005), «Hirnycho-heometrychne planuvannya hirnychykh robіt na rodovyshchakh oblytsiuvalnogo kameniu dlia zbilshennia koefitsiientu vykhodu blochnoi syrovyny», *Visnyk KTU*, Issue 9, pp. 20–23.
2. Kryvoruchko, A.O., Kotenko, V.V., Horshkalov, S.A. and Brui, H.V. (2024), «Analiz strukturnykh osoblyvostei ta heometryzatsiia yakisnykh vlastyvostei habroidnykh porid skhidnoi chasty ny Volodarsk-Volynskoho masyvu osnovnykh porid Korostenskoho plutonu», *Tekhnichna inzheneriia*, No. 1 (93), pp. 372–382, doi: 10.26642/ten-2024-1(93)-372-382.
3. Kryvoruchko, A.O., Podchashynskiy, Yu.O., Remezova, O.O. and Shlapak, V.O. (2005), «Vyznachennia anizotropnosti ta mekhanichnykh vlastyvostei pryrodnoho kameniu za dopomohoiu informatsiino-kompiuternykh tekhnolohii obrobky videozobrazhen (na prykladi habroidnykh porid Korostenskoho plutonu)», *Visnyk ZhDTU. Tekhnichni nauky*, No. 4 (35), pp. 128–134.
4. Korobiichuk, V.V. (2012), «Udoskonalennia systemy potochnoho planuvannya vydobuvannya blokv pryrodnoho kameniu», *Visnyk ZhDTU. Tekhnichni nauky*, No. 3 (62), pp. 122–125.
5. Iskov, S.S. (2008), «Heometryzatsiia yakisnykh pokaznykiv pokladiv hranitoidnykh i habroidnykh dekoratyvnykh kameniv», Ph.D. Thesis of dissertation, 05.15.01, Zhytomyr, 202 p.
6. Kotenko, V.V. (2007), «Rozrobka metodyky otsinky kilkisnykh i yakisnykh parametriv labradorytovykh pokladiv z metoiu yikh heometryzatsii», Ph.D. Thesis of dissertation, 05.15.01, Zhytomyr, 219 p.
7. Levytskyi, V., Sobolevskiy, R. and Korobiichuk, V.V. (2018), «The optimization of technological mining parameters in a quarry for dimension stone blocks quality improvement based on photogrammetric techniques of measurement», *Rudarsko-geološko-naftni zbornik*, Vol. 33, No. 2, pp. 83–90.
8. Korobiichuk, I., Korobiichuk, V., Iskov, S. et al. (2016), «Peculiarities of natural stone extraction technology with the help of diamond wire machines», *Exploration and Mining, 16 th International Multidisciplinary Scientific GeoConference Science and Technologies in Geology, 30.06–6.07.2016*, Albena, Bulgaria, Vol. 2, pp. 649–656.
9. Dolhikh, L.V., Dikhtiar, S.V. and Tomashevskaya, A.O. (2021), «Vykorystannia metodiv tsyfrovoi fotohrammetrii v umovakh pidzemnykh hirnychykh vyrobok», *Visnyk Kryvorizkoho natsionalnoho universytetu*, Issue 52, pp. 85–89, doi: 10.31721/2306-5451-2021-1-52-85-90.

10. Kotenko, V.V., Skoryk, M.A., Hnitetskyi, O.M. and Piskun, I.A. (2026), «Автоматизація визначення геометричних параметрів блоків природного каменю на основі фотogramетричного аналізу за допомогою відео RTK Rover», *Mineralni resursy Ukrainy*, No. 1, pp. 59–65, doi: 10.31996/mru.2026.1.59-65.
11. Kin, D.O., Lazorenko, N.Yu., Karpinskyi, Yu.O et al. (2025), «Metodyka zastosuvannya slam-tekhnologii u topografichnomu kartohrafuvanni», *Heodeziia ta zemlevporiadkuvannia*, pp. 610–626, doi: 10.32347/2786-7269.2025.15.610-626.
12. Kotenko, V., Dorosh, L., Kovtun, V. et al. (2025), «Zastosuvannya nazemnoho lazernoho skanuvannia (SLAM R100) v umovakh vidkrytykh hirnychkykh vyrobok», *Cuchasni dosiahnennia heodezychnoi nauky ta vyrobnytstva*, Issue II (50), pp. 135–143, doi: 10.33841/1819-1339-2-50-135-143.

Шишко Сергій Михайлович – аспірант кафедри маркшейдерії Державного університету «Житомирська політехніка».

Наукові інтереси:

- геометрія надр;
- видобування природного декоративного каменю.

E-mail: phd184233_shsm@student.ztu.edu.ua.

Криворучко Андрій Олексійович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри маркшейдерії Державного університету «Житомирська політехніка».

<https://orcid.org/0000-0003-3332-2631>.

Наукові інтереси:

- геометрія надр, видобування блочного каменю;
- геолого-економічна оцінка рудних та нерудних родовищ корисних копалин.

E-mail: km_kao@ztu.edu.ua.

Полонський Леонід Григорович – доктор технічних наук, професор Державного університету «Житомирська політехніка».

<https://orcid.org/0000-0002-4347-9088>.

Наукові інтереси:

- різальний інструмент;
- обробка матеріалів різанням.

E-mail: pol@ztu.edu.ua.

Шапочніков Олег Вячеславович – асистент кафедри маркшейдерії Державного університету «Житомирська політехніка».

Наукові інтереси:

- організація та планування гірничих робіт;
- маркшейдерська справа.

E-mail: km_shov@ztu.edu.ua.

Shyshko S.M., Kryvoruchko A.O., Polonsky L.G., Shapochnikov O.V.

The impact of drilling and splitting operations on the quality of extracted natural stone blocks

This article examines the impact of drilling operations on the quality of commercial products at a quarry specializing in the extraction of block-sized raw materials, from the perspective of controlled rock mass fragmentation and ensuring stable commercial characteristics of natural stone. The main technological parameters of drill-and-split separation – depth, drilling spacing, orientation of drill holes relative to natural fracture systems, and the sequence of splitting are considered – and their influence on the stress-strain state in the separation zone, the initiation and development of cracks, the formation of cleavage surfaces, and the occurrence of defects (diagonal chips and displacement of the cleavage plane) is analyzed. It is shown that in high-strength rocks (granite, gabbro, labradorite), the key factor in quality is the coordination of drilling parameters and wedging regimes with the anisotropy and structural heterogeneity of the rock mass, since technological deviations lead to the formation of additional fracturing and loss of block integrity.

A system of product quality assessment indicators is proposed, covering the yield of marketable blocks, the defect rate, geometric accuracy in meeting design dimensions, the nature and roughness of the split surfaces, as well as the orientation of process cracks. The results of a comparative analysis of block quality under various drilling and wedging conditions are presented, and critical factors affecting marketability are identified, including uneven application of wedge force, excessive hole spacing, deviation of drilling axes, drilling heterogeneity with depth, and local stress concentrations in the contact zone. Based on the identified patterns, practical recommendations have been formulated for optimizing drilling and wedging parameters, aimed at minimizing defects, increasing the yield of marketable products, and ensuring stable quality of block stone in open-pit mining conditions.

Keywords: open-pit mining; natural stone blocks; burklina technology; natural stone.

Стаття надійшла до редакції 02.01.2026.