

УДК 622.73:553.31

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2026-7-28>

АНАЛІЗ СУЧАСНИХ НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ З ПРАКТИЧНОГО ЗАСТОСУВАННЯ ПІДХОДІВ ДО ПОДРІБНЕННЯ МАГНЕТИТОВИХ КВАРЦИТІВ

Олійник Тетяна Анатоліївна,

доктор технічних наук, професор,
завідувачка кафедрою збагачення корисних копалин та хімії
Криворізького національного університету
ORCID ID: 0000-0002-0315-7308

Гапоненко Роман Костянтинович,

аспірант кафедри збагачення корисних копалин та хімії
Криворізького національного університету
ORCID ID: 0009-0003-5057-1442

У статті проведено систематизований аналіз сучасних наукових досліджень у галузі подрібнення магнетитових кварцитів – одного з найбільш енергоємних процесів у циклі збагачення залізних руд. Розглянуто п'ять ключових напрямів: технологічний, мінералогічний, магнітомінералогічний, математично-модельний та екологічний. Встановлено, що застосування валків високого тиску (HPGR) у замкненому циклі з віброгрохотом забезпечує вищий ступінь розкриття рудних зерен при нижчих питомих витратах електроенергії порівняно з традиційним кульовим подрібненням. Показано, що тривале подрібнення супроводжується деградацією магнітних властивостей магнетиту внаслідок порушення доменної структури та часткового окиснення з утворенням маггеміту і гематиту. З позиції наноструктурного підходу обґрунтовано, що зазначена деградація є закономірним наслідком переходу мінеральних зерен у нанодіапазон (1–100 нм) при надмірному механічному диспергуванні. Введено в науковий обіг концепцію вибухової підготовки руди як наноструктурно орієнтованого методу попереднього диспергування – зокрема, метод удосконаленого каналного бойовика (УКБ), захищений патентами України. Доведено, що підвищення інтенсивності вибухового імпульсу в 40 разів порівняно зі стандартним підриванням забезпечує попереднє мікротріщиноутворення по межах зростання зерен магнетиту і кварцу ще на стадії кар'єрних робіт, що дозволяє скоротити тривалість наступного млинового подрібнення, зберегти магнітні властивості рудного мінералу та зменшити екологічне навантаження на хвостосховища.

Ключові слова: магнетитові кварцити, подрібнення, валки високого тиску, магнітні властивості, наноструктурний підхід, вибухова підготовка руди, удосконалений каналний бойовик, рудопідготовка.

Oliinyk Tetiana, Haponenko Roman. Analysis of modern scientific research on practical application of approaches to grinding magnetite quartzites

The article presents a systematic analysis of modern scientific research in the field of grinding magnetite quartzites – one of the most energy-intensive processes in the iron ore beneficiation cycle. Five key directions are considered: technological, mineralogical, magnetomineralogical, mathematical-modeling, and ecological. It is established that the use of high-pressure grinding rolls (HPGR) in a closed circuit with a vibrating screen ensures a higher degree of ore grain liberation at lower specific energy consumption compared to conventional ball milling. It is shown that prolonged grinding is accompanied by degradation of the magnetic properties of magnetite due to disruption of the domain structure and partial oxidation with the formation of maghemite and hematite. From the standpoint of the nanostructural approach, it is substantiated that the observed degradation is a natural consequence of the transition of mineral grains into the nanoscale range (1–100 nm) under excessive mechanical dispersion. The concept of explosive ore preparation as a nanostructurally oriented pre-dispersion method is introduced into scientific use – in particular, the improved channel detonator (ICD) method, protected by Ukrainian patents. It is proven that increasing the explosive impulse intensity by 40 times compared to standard blasting ensures preliminary microcracking along the grain boundaries of magnetite and quartz at the quarry stage, which allows reducing the duration of subsequent mill grinding, preserving the magnetic properties of the ore mineral, and reducing the environmental load on tailings storage facilities.

Key words: magnetite quartzites, grinding, high-pressure grinding rolls, magnetic properties, nanostructural approach, explosive ore preparation, improved channel detonator, ore preparation.

Вступ. Подрібнення залізних руд є однією з найбільш енергоємних і технологічно відповідальних операцій у циклі збагачення магнетитових кварцитів. На збагачувальних фабриках

витрати на рудопідготовку становлять від 40 до 60 % загального енергоспоживання підприємства [1]. У зв'язку з цим вдосконалення схем подрібнення, обґрунтування оптимальних

режимів подрібнення та оцінка мінералогічних трансформацій, що відбуваються у процесі механічного диспергування руди, набувають першочергового науково-практичного значення.

Магнетитові кварцити є основною рудною сировиною чорної металургії України. Їх переробка на залізорудний концентрат із вмістом заліза не менше 68 % передбачає послідовне подрібнення руди до тонини, що забезпечує достатній ступінь розкриття рудних зерен, та подальшу магнітну сепарацію. При цьому якість концентрату та ефективність збагачення визначаються не лише крупністю кінцевого продукту подрібнення, а й мінералогічним станом магнетиту, його магнітними характеристиками та морфологією зерен.

Методи та методики дослідження. Проблематика подрібнення магнетитових кварцитів активно досліджується у вітчизняній та світовій наукових спільнотах. Аналіз сучасних публікацій дозволяє виявити декілька напрямів: технологічний (оптимізація схем і обладнання), мінералогічний (вивчення фазових перетворень у процесі переробки), магнітомінералогічний (зміни магнітних властивостей рудних мінералів), математично-модельний (математичний опис і оптимізація процесів класифікації та подрібнення) та екологічний (оцінка впливу продуктів подрібнення на довкілля).

Метою цієї статті є систематизація та порівняльний аналіз ключових досліджень у зазначених напрямках, обґрунтування концепції вибухової підготовки руди як наноструктурно орієнтованого методу попереднього диспергування, здатного суттєво підвищити енергоефективність усього циклу рудопідготовки.

Аналіз літературних джерел. Одним із найбільш актуальних технологічних напрямів сучасної рудопідготовки є впровадження у дробленні руд валків високого тиску (HPGR – High Pressure Grinding Rolls). Вони використовуються як альтернативні конусним дробаркам дрібного дроблення або як додаткове обладнання до традиційного кульового подрібнення. Дослідженню цього питання присвячена робота, в якій розглянуто технологію рудопідготовки залізистих кварцитів Первомайського родовища із застосуванням HPGR у замкненому циклі з віброгрохотом [1]. Авторами здійснено порівняльний аналіз двох промислових схем: традиційного чотирістадійного дроблення з попереднім грохоченням до класу -25 мм та запропонованої трьохстадійної схеми із застосуванням HPGR до крупності -16 мм. Встановлено, що використання валків високого тиску забезпечує вищий ступінь розкриття рудних

зерен при еквівалентних витратах енергії, що пояснюється принципово іншим механізмом руйнування матеріалу - переважно за межами зростання мінеральних зерен, а не крізь тіло зерна. Зменшення крупності живлення кульових млинів до -16+0 мм сприяє підвищенню ефективності наступної стадії магнітної сепарації та дозволяє досягти цільового показника вмісту заліза в концентраті на рівні не менше 68 %. Практична значущість наведеного дослідження визначається його безпосередньою орієнтованістю на умови реального виробництва. Запропонована технологічна схема може бути застосована при модернізації збагачувальних фабрик, що переробляють руди Криворізького залізорудного басейну. Водночас слід зазначити, що результати отримані для конкретного родовища – Первомайського, і тому потребують додаткової адаптації при перенесенні на інші об'єкти, які переробляють руди з іншими структурно-текстурними характеристиками.

Апарат HPGR використовує принцип міжчастинкового стиснення в шарі матеріалу між валками, що зумовлює утворення мікротріщин всередині зерен та зменшуючи питоме енергопоживання на наступних стадіях подрібнення. Схема пропрацювала понад 7000 годин без заміни валків, що підтверджує її надійність для умов реального промислового виробництва [2].

Енергетичну методологію розрахунку та вибору HPGR для схем дроблення у твердих породах розробив Morrell [3]. Рівняння методу Morrell прогнозують питомі витрати енергії схеми з похибкою не більше 6,5 %. Аналіз підтвердив, що нижчий питомий тиск подрібнення покращує ефективність HPGR, а продуктивність кульових млинів у складі схеми з HPGR може бути підвищена на 20 % за рахунок оптимізації умов роботи млина [3].

Нова схема рудопідготовки, а саме - HPGR + одностадійне подрібнення + двостадійна безперервна класифікація впроваджена на вольфрамівій збагачувальній фабриці. Вона дозволила змінити не тільки крупність дробленого продукту, але й знизила кількість шламових класів у продуктах подрібнення і збільшила ефективність класифікації за класом -0,044 мм у замкненому циклі [4].

Для дрібнозернистих магнетитових руд енергоємність подрібнення до крупності нижче 0,030 мм може перевищувати 30 кВт·год/т, а це на порядок більше, ніж для гематитових руд, що обумовлює першочергову актуальність пошуку енергоощадних схем подрібнення. Принципово нову схему переробки залізної руди, у якій традиційне багатастадійне дроблення з флотацією

замінено на комбінацію подрібнення з одностадійною магнітною або гравітаційною сепарацією у рефлюкс-класифікаторі розроблено у роботі і це виключає необхідність дешламації (сотні гідроциклонів) і флотаційних реагентів, що суттєво знижує капітальні та операційні витрати і зменшує екологічне навантаження порівняно з традиційними схемами збагачення залізних руд [5].

При обстеженні золото- і мідь видобувних підприємств було встановлено, що подрібнення споживає від 35 до 50 % загальних витрат шахти, а сукупне енергоспоживання галузі для цих металів становить 0,2 % світового і 1,3 % австралійського електроспоживання. Аналіз показав, що вміст металу в руді є вагомим фактором питомого енергоспоживання на подрібнення, а не твердість руди чи крупність подрібнення. Найбільший потенціал для зниження енерговитрат криється у попередній концентрації або збагаченні руди до стадії подрібнення, що є теоретичним обґрунтуванням методів попереднього збагачення, включаючи вибухову підготовку [6].

Результати інших досліджень показали, що механохімічний синтез наночастинок оксиду заліза у кульовому млині дозволяє отримувати нанорозмірні фази зі структурою шпінелі при розмірах частинок 6–12 нм, при цьому присутність Fe у вихідній суміші відіграє вирішальну роль у формуванні магнітних шпінельних фаз. Синтезовані наночастинки продемонстрували намагніченість насичення 55–57 е.м.о./г і дуже малу коерцитивну силу (12–19 E), що є характерними ознаками суперпарамагнітного стану. Отримані результати показали, що у ході тривалого кульового подрібнення зерна магнетиту переходять у нанодіапазон, набуваючи суперпарамагнітних властивостей, що фіксуються як деградація намагніченості у продуктах збагачення [7].

Певний аналіз ME, XRD і VSM, в ході якого встановлено, що вибір тривалості подрібнення дозволяє регулювати розмір наночастинок і склад порошку. Дипольна магнітна взаємодія між суперпарамагнітними наночастинками індукує магнітне блокування. Цей підкреслює, що надмірне подрібнення неминуче переводить зерна магнетиту у суперпарамагнітний стан з різко зниженою намагніченістю, що погіршує ефективність магнітної сепарації на збагачувальних фабриках [8].

Метод дисперсійного аналізу (ANOVA) і методологію поверхні відгуку (RSM) застосували науковці, які встановили, що валки з більшим співвідношенням ширини до діаметра

забезпечують кращі показники подрібнення та нижче питоме енергоспоживання. Побудована модель прогнозування показників HPGR через регресійний аналіз відкриває можливість оптимізації конструктивних і технологічних параметрів апарата без необхідності дорогостоячих фізичних випробувань [9].

Дослідники Бразилії проводили серію обстежень чотирьох промислових HPGR різного діаметра (1,4–2,25 м) та співвідношення розмірів (0,88–1,45), що працюють на заводах компанії Vale (Бразилія) для перевірки моделі Торреса–Касалі. Встановлено, що оригінальна модель занижує потужність приблизно на 60 %. Модифікація рівняння із введенням машинно-залежного коригувального коефіцієнта для кута захоплення дозволила суттєво підвищити точність прогнозування для промислових масштабів. Результати довели необхідність спеціального калібрування моделей при перенесенні з дослідного на промисловий масштаб. І цей висновок є загальнометодологічним застереженням для всіх математичних моделей рудопідготовки [10].

Про екологічну загрозу через можливу присутність у хвостах природних радіоактивних матеріалів (NORM) йдеться в роботі, автори якої розробили інноваційні підходи до реінтеграції хвостів у виробничі ланцюжки, що дозволило зменшити обсяги накопичення токсичних відходів. Такий підхід є стратегічно важливим напрямом та відповідає принципам циркулярної економіки [11].

Іншим напрямом зниження енергоспоживання при рудопідготовці є підвищення рівня вибухової енергії, яке призводить до дрібнішого дроблення і збільшення кількості мікротріщин у первинних фрагментах. Хоча витрати на буріння і підривання при цьому зростають, загальні витрати «від кар'єру до готового продукту» знижуються. Дослідження на гірничій масі типу таконіт показало, що збільшення кількості детонівних шнурів зменшує P80 продуктів подрібнення з 2,91 мм до 0,73 мм і знижує індекс роботи Бонда з 14,4 до 3,9 кВт·год/т, що є прямим кількісним підтвердженням ефективності попереднього мікротріщиноутворення [12].

Дослідження на таконіті показали, що вибухове підривання індукує у фрагментах гірничої маси внутрішні мікротріщини вибуху, які знижують їх міцність порівняно з непошкодженою породою і полегшують усі наступні операції, включаючи дроблення і подрібнення. Будь-яке збільшення рівня вибухової енергії через підвищення коефіцієнта порошку підвищує подрібнюваність мінералів, додавання детонівного

шнура як основного заряду збільшує густину мікротріщинної мережі всіх типів у фрагментах. Вибір типу вибухової речовини є окремим інструментом керування процесом мікротріщиноутворення: різні ВР забезпечують різну щільність і морфологію мікротріщин, що відкриває можливість цілеспрямованої оптимізації вибухопідготовки з урахуванням мінералогічних цілей наступного подрібнення – зокрема, збереження доменної структури магнетиту [13].

Розуміння мінералогічних трансформацій, що відбуваються на різних стадіях подрібнення, є необхідною умовою для науково обґрунтованого управління технологічними режимами збагачення. Цьому аспекту присвячено дослідження науковців [14], у якому простежено мінеральні та фізико-хімічні зміни магнетитових кварцитів Валявкинського та Новокириворізького родовищ Кривбасу впродовж усього технологічного ланцюжка - від руди у природному заляганні до кінцевого концентрату [14]. Авторами встановлено, що вже після першої стадії подрібнення відбувається часткове розкриття зерен магнетиту і кварцу, однак ступінь розкриття залишається недостатнім для ефективною магнітної сепарації. Після третьої стадії ступінь розкриття наближається до максимальних значень, однак водночас фіксується погіршення кристалічної впорядкованості магнетиту, що виражається у розширенні рефлексів на дифрактограмах РФА та зменшенні величини питомої намагніченості насичення. Дешламація після другої стадії подрібнення дозволяє видалити тонкі шламові фракції, збагачені карбонатами і хлоритами, що позитивно впливає на якість концентрату.

Особливу наукову цінність має порівняльний характер дослідження: паралельний аналіз руд двох родовищ виявив суттєві відмінності у поведінці мінералів під час переробки. Зокрема, магнетитові кварцити Валявкинського родовища характеризуються дрібнозернистою будовою і вищим початковим ступенем замагніченості, тоді як руди Новокириворізького родовища мають більш неоднорідну текстуру і потребують тонкішого подрібнення для досягнення аналогічного ступеня розкриття. Ці відмінності свідчать про необхідність індивідуального підходу до проектування технологічних схем для кожного з родовищ, що є практично важливим висновком для проектних організацій.

Поряд із суто технологічними і мінералогічними аспектами, подрібнення магнетитових кварцитів породжує низку екологічних проблем, пов'язаних із утворенням значних об'ємів дрібнодисперсних відходів. Ця проблематика

є предметом дослідження авторів, присвяченого вивченню потенційного впливу продуктів диспергування магнетитових кварцитів на довкілля на прикладі ПРАТ «Центральний гірничо-збагачувальний комбінат» [15]. Із застосуванням рентгенофазового аналізу, термогравіметрії та седиментаційного аналізу авторами встановлено, що в ході механічного подрібнення відбувається переважно руйнування другорядних мінералів – карбонатів, хлоритів, амфіболів, сульфідів. Основним продуктом їхньої деструкції у хвостах збагачення є кварц у дисперсному стані. Фракція дисперсного кварцу крупністю менше 5 мкм становить значну частку хвостосховищних матеріалів і є потенційно небезпечною при вдиханні – через добре відомий фіброгенний ефект вільного діоксиду кремнію. Крім того, у хвостах ідентифіковано субмікронні частинки магнетиту і маггеміту, здатні до тривалого аерозольного перенесення і проникнення у підземні водоносні горизонти при вищелочуванні хвостосховищ атмосферними опадами.

Дослідження також показало, що у хвостосховищах тривають процеси вторинного механічного і хімічного вивітрювання, які збільшують вміст пилоактивних фракцій з часом. Це свідчить про потребу у систематичному геоecологічному моніторингу відповідних об'єктів і впровадженні заходів із пилозакріплення поверхні хвостосховищ. Зазначене дослідження займає важливе місце в системі наукових знань про подрібнення залізних руд, оскільки вводить у поле аналізу екологічний вимір, що є обов'язковим компонентом сучасної оцінки гірничо-збагачувальних виробництв.

Питання деградації магнітних властивостей магнетиту в процесі подрібнення є критично важливим для визначення оптимальних параметрів подрібнення, оскільки саме від цих властивостей залежить ефективність магнітної сепарації – основного методу збагачення залізних руд. Зазначена проблематика детально розглядається у публікації, де на матеріалі магнетитових кварцитів Ігулецького родовища Кривбасу колективом авторів встановлено, що тонке подрібнення в кульових млинах супроводжується поступовим і статистично достовірним зниженням питомої намагніченості насичення магнетиту [16]. Цей процес обумовлений двома одночасно діючими механізмами. По-перше, ударні та стираючі навантаження у млині порушують доменну структуру магнетиту, що веде до переходу частини зерен від полідоменного до псевдоодоменоного або суперпарамагнітного стану з нижчою результуючою намагніченістю. По-друге, відбувається часткове окиснення

магнетиту з утворенням магеміту ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$), а при більш тривалому подрібненні – гематиту і мартиту, намагніченість яких на порядок нижча порівняно з вихідним магнетитом. Ці трансформації виявляються термомагнітометричним методом за характерними зміщеннями точки Кюрі та зменшенням площі петлі гістерезису.

Практичний висновок наведеного дослідження полягає у тому, що надмірне подрібнення є контрпродуктивним навіть при досягненні достатнього ступеня розкриття рудних зерен: деградація магнітних властивостей призводить до погіршення витягнення заліза в концентрат і збільшення його втрат з хвостами магнітної сепарації. Це визначає існування оптимального діапазону крупності подрібнення, який є специфічним для кожного родовища.

Суміжну проблематику досліджено у роботі, де основна увага зосереджена на методологічних засадах діагностики ступеня окиснення магнетиту в реальних продуктах збагачення [17]. Авторами запропоновано методику поєданого застосування рентгенофазового аналізу та термомагнітометрії з попереднім фракціонуванням матеріалу за магнітними властивостями. Встановлено, що в межах однієї технологічної проби одночасно присутні зерна незміненого магнетиту (у сильномагнітній фракції) і значно окиснені фрагменти з переважаючим магеміту (у слабомагнітній фракції). Нерівномірність окиснення посилюється зі збільшенням питомої поверхні матеріалу, тобто дрібніші класи крупності зазнають більш інтенсивного окиснення, що узгоджується з фізичними уявленнями про поверхнево-активні процеси. Запропонована методика може бути використана для оперативного контролю якості на збагачувальних фабриках.

Окреме місце у системі наукових знань про подрібнення залізних руд займають фундаментальні теоретичні та навчально-наукові праці, що узагальнюють здобутки галузі та формують концептуальну основу для прикладних досліджень. У цьому контексті особливої уваги заслуговують роботи науковців, які висвітлили теоретичні та прикладні засади усіх основних процесів збагачення: підготовчих (дроблення, подрібнення, грохочення), основних (гравітаційне, флотаційне, магнітне, електричне збагачення) та заключних (зневоднення, фільтрування, хвостове господарство). Розділи, присвячені подрібненню, містять класифікацію видів і методів подрібнення, аналіз конструкцій млинів, методики розрахунку схем подрібнення та критерії вибору оптимального режиму подрібнення. Саме у цьому дослідженні автори

сформулювали системні підходи до проектування відділень рудопідготовки на збагачувальних фабриках Криворізького басейну, що безпосередньо визначає його значення для практики; в роботі систематизовано та критично проаналізовано сучасні математичні моделі процесу грохочення – ключової операції, що визначає ефективність замкнених циклів подрібнення. Автори застосували модель О.М. Тихонова для опису щільності розподілу підрешіткової сепараційної характеристики як випадкової величини та провели імітаційне моделювання з використанням розподілу RRSB (Rosin–Rammler–Sperling–Bennett). Результати підтвердили адекватність запропонованого математичного опису реальним технологічним процесам збагачення магнетитових кварцитів [18; 19].

Значення цих праць для розуміння процесів подрібнення є багатоаспектним. По-перше, вони забезпечують теоретичну базу для інтерпретації результатів прикладних досліджень – зокрема, пояснюють математичні закономірності, що лежать в основі ефектів, задокументованих у роботах науковців. По-друге, математичне моделювання процесів класифікації за крупністю є інструментом для оптимізації замкнених циклів подрібнення з HPGR та гідроциклонами, що дозволяє знизити надлишкове подрібнення і пов'язану з ним деградацію магнітних властивостей магнетиту. По-третє, системний виклад технологій рудопідготовки у навчальному посібнику слугує методологічною основою для навчання спеціалістів і формує спільну термінологічну та концептуальну платформу для всіх наступних досліджень у галузі.

Розглянуті дослідження характеризуються тематичною комплементарністю: кожне з них охоплює окремий аспект проблеми подрібнення магнетитових кварцитів, і лише у сукупності вони формують цілісне наукове уявлення про цей процес. З методологічного погляду, переважна більшість розглянутих робіт спирається на рентгенофазовий аналіз (РФА) та термомагнітометрію як базові аналітичні інструменти. Це відображає загальноприйнятий стандарт у дослідженнях залізорудної мінералогії і забезпечує зіставність результатів між окремими публікаціями.

Окремої уваги заслуговує наноструктурний вимір процесу подрібнення, який у вітчизняній літературі з рудопідготовки залізних руд висвітлено недостатньо. Сучасні дослідження в галузі матеріалознавства переконливо демонструють, що механічне подрібнення є не лише технологічною операцією зменшення крупності, а й методом цілеспрямованого синтезу

наноматеріалів – структур із розміром частинок у діапазоні 1–100 нм [20]. При тривалому або високоенергетичному подрібненні частинки мінералів неминуче переходять у нанодіапазон, що супроводжується якісною зміною їхніх фізико-хімічних та магнітних властивостей. Розуміння цих закономірностей є необхідною передумовою для наукового обґрунтування меж оптимального подрібнення магнетитових кварцитів. Зафіксоване у хвостах збагачення субмікронних та нанорозмірних фракцій оксидів заліза є не випадковим побічним продуктом, а закономірним результатом механічних процесів, що розгортаються на нанорівні під час подрібнення. Осмислення цих процесів потребує звернення до досягнень сучасного матеріалознавства у галузі механічного синтезу наноматеріалів. У сучасному матеріалознавстві механічне подрібнення розглядається як один із найбільш доступних і масштабованих методів синтезу наноматеріалів за принципом «згори вниз» (top-down), при якому вихідна сировина макроскопічних розмірів послідовно диспергується до нанодіапазону. На відміну від хімічних методів синтезу наночастинок, механічне подрібнення не потребує застосування токсичних реагентів і реалізується безпосередньо в промислових млинах, що робить його особливо актуальним для аналізу збагачувальних процесів [20].

Механізм переходу частинок у нанодіапазон при кульовому подрібненні описується чотирма послідовними стадіями [21]. На першій – *стадії стиснення* – частинки зазнають пластичної деформації та сплющуються без руйнування. На другій – *стадії холодного зварювання* – сплющені частинки зліплюються між собою під дією локального тиску. На третій – *стадії фрактури* – накопичені внутрішні напруження призводять до розтріскування та фрагментації агломератів. Нарешті, на четвертій – *стадії динамічної рівноваги* – швидкості зварювання та руйнування вирівнюються, і система досягає стабільного нанорозмірного стану з розміром частинок у межах 1–100 нм. Саме ця стадія відповідає умовам тривалого або надмірного подрібнення на збагачувальних фабриках.

Практична значущість цього підходу для розуміння поведінки магнетитових кварцитів підтверджується прямими експериментальними даними. Зокрема, науковці задокументували, що кульове подрібнення порошку $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ (гематиту) у атриторному млині протягом 100 годин зменшує розмір частинок від вихідних ~1 мм до ~15 нм. Цей результат є принципово важливим у контексті переробки магнетитових

кварцитів: оксиди заліза – структурно споріднені мінерали – демонструють аналогічну поведінку при інтенсивному механічному диспергуванні, переходячи з полікристалічного у нанокристалічний стан.

Перехід у нанодіапазон супроводжується не лише зменшенням розміру частинок, а й глибокою перебудовою мікроструктури. Автори показали, що зі збільшенням тривалості подрібнення розмір кристалітів закономірно зменшується, а щільність дефектів і внутрішні напруження зростають [22]. Для магнетиту це означає прогресивне порушення доменної структури: у міру того, як зерна зменшуються до нанометрових розмірів, вони переходять із полідоменного стану через псевдоододомений до суперпарамагнітного, при якому результуюча намагніченість різко знижується. Цим пояснюється статистично достовірна деградація питомої намагніченості насичення магнетиту, зафіксована у роботах вітчизняних дослідників – вона є прямим наслідком наноструктурних перетворень, що відбуваються у млині [22].

Таким чином, наноструктурний підхід надає фізично обґрунтоване пояснення явищам, задокументованим у попередніх розділах цього огляду: деградація магнітних властивостей магнетиту при надмірному подрібненні та утворення нанорозмірних фракцій у хвостах збагачення є не незалежними ефектами, а двома проявами єдиного механізму – переходу мінеральних зерен у нанодіапазон під дією механічної енергії. Це, своєю чергою, підтверджує актуальність встановлення оптимального діапазону крупності подрібнення як завдання, що має вирішуватися не лише на технологічному, а й на фізико-хімічному рівні.

Результати досліджень. Проведений нами систематичний аналіз наукових підходів до подрібнення магнетитових кварцитів дозволяє не лише узагальнити здобутки різних напрямів, а й обґрунтувати оригінальний метод вибухової підготовки руди - удосконалений каналний бойовик (УКБ) - як практичну реалізацію концепції наноструктурно орієнтованого попереднього диспергування [23].

В основі методу УКБ лежить каналний ефект: випереджаюча ударна хвиля збуджує в каналі наростаючу детонацію, інтенсивність якої може зростати в n разів. Удосконалення полягає у тому, що дві зустрічні ударні хвилі запускаються у трубі, розміщеній всередині свердловинного заряду вибухової речовини. Труба відділена оболонкою від основної вибухової речовини, що дозволяє повністю наситити канал високотемпературною плазмою

без провокування неконтрольованої детонації заряду. Внаслідок цього детонація збуджується одночасно по всій висоті свердловинного заряду менш ніж за 1 мкс, а вектор детонації змінюється з вертикального на горизонтальний. Конструкція свердловинного заряду з УКБ включає такі елементи: забійку свердловини (1), хвилевод (2), детонуючий шнур ДШЕ-12 (3), власне УКБ (4) – циліндр з інертного матеріалу, патрон-бойовик (5) та свердловину (6) (рис.1).

Фізичне обґрунтування підвищення ефективності розкриття зерен ґрунтується на наступному. Приймавши критичний діаметр вибухової речовини (емоніт – 120 мм) як площу одночасної незатухаючої детонації у стандартному заряді, у якому фронт детонації рухається вертикально на відстань ~10 м, і порівнявши це з конструкцією УКБ, де детонація розповсюджується горизонтально на відстань ~0,4 м, отримуємо скорочення шляху руху детонаційного фронту у 25 разів. Відповідно, руйнівний тиск продуктів вибуху діє на корпусулу магнетитової руди у 40 разів інтенсивніше ($1000 \text{ см} : 25 = 40$), утворюючи в ній необоротні деформації – мікротріщини по межах зростання зерен магнетиту та кварцу. Саме цей механізм є наноструктурно орієнтованим: на відміну від класичного підривання, при якому мікротріщиноутворення є побічним, нерівномірним ефектом, УКБ цілеспрямовано формує щільну мережу мікротріщин ще на стадії кар'єрних робіт – переважно по міжзерновим межах, тобто там, де згодом має відбуватися розкриття рудного мінералу.

Для перевірки запропонованих технічних рішень на Центральному гірничо-збагачувальному комбінаті (ПрАТ «ЦГЗК», м. Кривий Ріг) проведено промисловий експеримент на блоці №32, горизонт –302 м. Загальний об'єм підірваної гірничої маси склав 51,5 тис. м³ (49,1

тис. м³ руди + 2,4 тис. м³ скелі); кількість відбурених свердловин – 121 шт., погонаж – 1569 м. Міцність порід за шкалою проф. Протодеяконова: руда – 16, скеля – 12. Блок поділено на три частини з різними схемами підривання: південна частина (сітка 6×6 м, 40 свердловин), центральна (сітка 5×5 м, 55 свердловин) та північна (сітка 6×6 м з застосуванням УКБ-2, 26 свердловин).

Порівняльний аналіз питомих витрат вибухової речовини між частинами блоку демонструє принципову перевагу УКБ: у північній частині з УКБ-2 при сітці свердловин 6×6 м досягнуто питомих витрат ВР руда – 1,012 кг/м³ при виході гірничої маси з 1 п.м. свердловини 37,27 м³/м і виході з однієї свердловини – 473 м³. Для порівняння, у південній частині (класична сітка 6×6 м без УКБ) питомі витрати ВВ склали 1,081 кг/м³ при виході 485 м³ з однієї свердловини. Центральна частина (щільніша сітка 5×5 м) при витратах 1,375 кг/м³ забезпечила лише 360 м³ виходу з однієї свердловини. Таким чином, застосування УКБ дозволяє за меншого питомого споживання ВР зберегти кількісний вихід гірничої маси на рівні стандартної схеми, суттєво підвищуючи якість фрагментації.

Результати гранулометричного аналізу гірничої маси, визначеного за фотознімками поверхні розвалу, наведено у табл. 1.

Отримані дані свідчать про кардинальне покращення якості фрагментації: застосування УКБ-2 при сітці 6×6 м забезпечило розмір середнього куска 50,0 мм проти 130,8 мм при класичному підриванні за тією самою сіткою – зменшення у 2,6 раза. При порівнянні з ділянкою, де класична схема дала середній кусок 489,7 мм, перевага УКБ є ще разючою: більш ніж дев'ятиразове зменшення середнього куска. Частка фракції 0–100 мм при УКБ склала 63,5%–

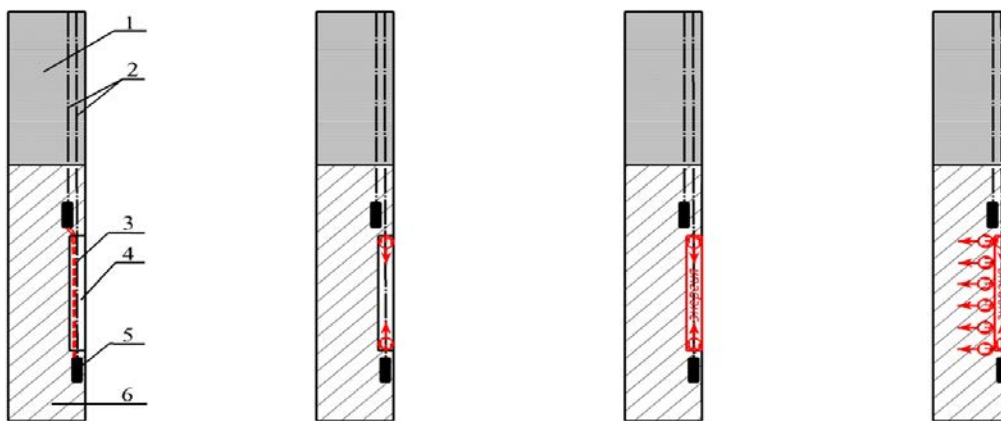


Рис. 1. Конструкція свердловинного заряду з УКБ

Таблиця 1

Гранулометричний склад гірничої маси на горизонті – 302 м, блок №32, м.о. 150–170 (сітка свердловин 6×6 м)

Схема підривання	Вихід фракцій, %						Розмір середнього куска, мм
	0-100 мм	100-200 мм	201-300 мм	301-400 мм	401-500 мм	>500 мм	
З УКБ – 2 (пн. Частина)	63,5	29,8	4,0	1,9	0,8	0,0	50,0
Класична (пн. Частина)	45,8	21,9	18,4	8,6	2,4	2,9	130,8
Класична без УКБ	4,4	5,2	3,3	4,9	4,9	58,5+19,3 (>1200)	489,7

майже вдвічі більше, ніж при стандартному підриванні (45,8 %), і у 14 разів більше порівняно з найгіршим варіантом (4,4 %).

Формування щільної мережі мікротріщин по межах зростання зерен магнетиту та кварцу ще на стадії кар'єрного підривання доводить, що попередня структурна підготовка матеріалу на гірничому переділі суттєво знижує опір руди на всіх наступних стадіях дробарно-млинового циклу. Зменшення розміру середнього куска у 2,6–9,8 раза означає пропорційне зниження питомого навантаження на щелепні та конусні дробарки, а також скорочення тривалості помелу в кульових млинах для досягнення заданої тонини продукту. З позицій наноструктурного підходу, обґрунтованого у цьому дослідженні, скорочення тривалості помелу є принципово важливим: саме цим досягається збереження доменної структури зерен магнетиту в межах полідоменного або псевдооднодоменного стану з максимальною питомою намагніченістю насичення, що безпосередньо підвищує ефективність магнітної сепарації та вихід концентрату.

Метод УКБ, захищений патентами України та апробований на Центральному ГЗК, є конкретною технічною реалізацією цього підходу, адаптованою до умов залізородних родовищ України [23].

Висновки. Проведений аналіз наукових досліджень з практичного застосування підходів до подрібнення магнетитових кварцитів дозволяє сформулювати такі висновки.

1. Застосування валків високого тиску (HPGR) у замкненому циклі з віброгрохотом є перспективним напрямом модернізації рудопідготовки залізистих кварцитів Криворізького залізородного басейну. Завдяки принципово іншому механізму руйнування – переважно по міжзерновим межах – HPGR забезпечує вищий ступінь розкриття рудних мінералів при нижчих питомих витратах електроенергії, що дозволяє досягти вмісту заліза у концентраті на рівні 68 % і вище.

2. Кожна стадія подрібнення супроводжується специфічними мінералогічними перетвореннями: поступовим розкриттям рудних зерен, механохімічними змінами кристалічної структури магнетиту, а також диференційованим руйнуванням другорядних мінералів. Ці зміни мають враховуватися при проектуванні та оптимізації технологічних схем, оскільки вони безпосередньо впливають на ефективність наступних операцій збагачення.

3. Існує оптимальний діапазон крупності подрібнення, перевищення якого призводить до деградації магнітних властивостей магнетиту внаслідок порушення доменної структури та часткового окиснення з утворенням гематиту і гематиту. Зазначена деградація знижує ефективність магнітної сепарації, збільшуючи втрати заліза з хвостами, а отже, надмірне подрібнення є не лише марнотратним з енергетичного погляду, а й технологічно шкідливим.

4. Продукти подрібнення магнетитових кварцитів – насамперед дисперсний кварц і тонкодисперсні оксиди заліза у хвостах збагачення – становлять потенційну екологічну та санітарно-гігієнічну небезпеку, що обумовлює необхідність систематичного геоекологічного моніторингу хвостосховищ і впровадження заходів із мінімізації пилоутворення.

5. Перспективними напрямками подальших досліджень є: розширення географії вивчення на родовища поза межами Кривбасу; розробка комплексних міждисциплінарних методик, що поєднують технологічний і мінералогічний аналіз у рамках єдиного дослідження; а також розроблення систем автоматизованого контролю ступеня подрібнення на основі онлайн-вимірювання магнітних характеристик пульпи.

6. Наноструктурний аналіз процесу подрібнення дає фізично обґрунтоване пояснення деградації магнітних властивостей магнетиту: при тривалому подрібненні зерна переходять у нанодіапазон (1–100 нм), що супроводжується порушенням доменної структури та переходом

у суперпарамагнітний стан із суттєво зниженою намагніченістю. Цей підхід відкриває перспективу для обґрунтування меж оптимального подрібнення не лише на основі технологічних критеріїв (ступінь розкриття рудних зерен), а й із урахуванням мікроструктурних змін на нанорівні.

7. Сукупний ефект від застосування методу УКБ у циклі рудопідготовки магнетитових кварцитів може бути описаний у чотирьох взаємопов'язаних вимірах: *енергетичний*: скорочення питомих витрат електроенергії на стадіях дроблення та помелу за рахунок зменшення міцності гірничої маси після якісної вибухопідготовки; *технологічний*: підвищення ступеня розкриття рудних зерен при меншій тривалості помелу; збереження магнітних властивостей магнетиту внаслідок запобігання надмірному переходу зерен у нано-діапазон; підвищення виходу концентрату; *ресурсний*: зменшення витрат дробильних куль, запасних

частин та інших витратних матеріалів унаслідок зниження навантаження на дробарно-млинове обладнання; *екологічний*: зменшення обсягів шламових фракцій нанорозмірного діапазону у хвостах збагачення, що знижує екологічне навантаження на хвостосховища.

8 Світовий досвід застосування вибухопідготовки руди підтверджує реалістичність кожного з цих ефектів. Метод УКБ, захищений патентами України та апробований на Центральному ГЗК, є конкретною технічною реалізацією цього підходу, адаптованою до умов залізородних родовищ України. Технологія УКБ сумісна з широким спектром вибухових речовин – у тому числі з екологічно чистими та економічно доступними простими вибуховими речовинами: ігданітом, аміачною селітрою (NH_4NO_3) та їх похідними. Всі компоненти цих вибухових речовин наявні в Україні у повному асортименті, що знижує залежність від імпортих матеріалів і зменшує собівартість вибухопідготовки.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Стоялов В. В. Технологія рудопідготовки залізистих кварцитів Первомайського родовища із застосуванням валків високого тиску : дис. канд. техн. наук. Криворізький національний університет, 2024. URL: <http://ds.knu.edu.ua/jspui/handle/123456789/6824>
2. Li L., et al. Evaluating the performance of an industrial-scale high pressure grinding rolls (HPGR)-tower mill comminution circuit. *Minerals Engineering*. 2023. 183. 107592. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2022.107973>
3. Morrell S. Helping to reduce mining industry carbon emissions: A step-by-step guide to sizing and selection of energy efficient high pressure grinding rolls circuits. *Minerals Engineering*. 2022. 176. 107340. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2022.107431>
4. Caibin Wu, Junquan Lai et al. Energy saving and grinding circuit optimization in tungsten ore processing plant through high pressure grinding rolls and one stage grinding design: An industrial case study. *Minerals Engineering*. 2025. 224. 109228. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2025.109276>
5. Armando F. d. V. Rodrigues, Homero Delboni Junior, Klaydison Silva. Transforming iron ore processing – Simplifying the comminution and replacing reverse flotation with magnetic and gravity separation. *Minerals Engineering*, 2023. 198. 108115. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2023.108112>
6. Ballantyne G. R., Powell M. S. Benchmarking comminution energy consumption for the processing of copper and gold ores. *Minerals Engineering*. 2014. 65. 109–114. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2014.05.017>
7. Pedro A. Calderón Bedoya, Pablo M. Botta, María A. Fanovich. Influence of the milling materials on the mechanochemical synthesis of magnetic iron oxide nanoparticles. *Journal of Alloys and Compounds*. 2023. 938. 168527. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2023.168720>
8. Carvalho R. M. S., et al. Synthesis of magnetite nanoparticles by high energy ball milling. *Applied Surface Science*. 2013. 275. 84–87. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2013.01.118>
9. Jianbo Guo, Shuai Wang, Zhengbin Liu, Shuwei Wu, Wei Guan, Haoyan Zhang. Simulation and analysis of high-pressure grinding rolls performance based on DEM-PRM. *Minerals Engineering*. 2024. 218. 108963. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2024.109039>
10. Campos T. M. B., et al. Modeling comminution of iron ore concentrates in industrial-scale HPGR. *Powder Technology*. 2021. 383. 244–255. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.12.075>
11. Luis Felipe dos Santos Lara, Gustavo Filemon Costa Lima, Laís Resende, Augusto Cesar da Silva Bezerra. Recent advances and perspectives of eco-efficient building materials from iron ore tailing: characterization, performance, and consumption. *Journal of Cleaner Production*. 2025. 499. 145091. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.145488>
12. Nielsen K., Malvik T. Grindability enhancement by blast-induced microcracks. *Powder Technology*. 1999. 105(1–3). 52–56. [https://doi.org/10.1016/S0032-5910\(99\)00117-5](https://doi.org/10.1016/S0032-5910(99)00117-5)

13. Amir Khademian, Raheb Bagherpour (2017). Alteration of grindability of minerals due to applying different explosives in blasting operation. *Minerals Engineering*, 111, 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2017.06.016>
14. Губіна В. та ін. Мінеральні та фізико-хімічні зміни магнетитових кварцитів Валявкінського та Новокриворізького родовищ Кривбасу в процесах їх переробки. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*. 2024. 1(104). 36-48. DOI: <https://doi.org/10.17721/1728-2713.104.05>
15. Лавриненко О. М. та ін. Потенційний вплив продуктів диспергування магнетитових кварцитів на довкілля. *Вісник НТУУ «КПІ». Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження*. 2022. № 3. 85–93. DOI: <https://doi.org/10.20535/2617-9741.3.2022.265364>
16. Верховцев В. Г., Покалюк В. В., Губіна В. Г. та ін. Зміни магнітних властивостей магнетитових кварцитів Інгулецького родовища Кривбасу в процесі збагачення. *Геохімія техногенезу*. № 7. 42-46. DOI: <https://doi.org/10.32782/geotech2022.35.07>
17. Антоненко Т., Снісар В., Овсієнко В. Окиснення мінеральної фази магнетиту в процесі механічного подрібнення. *Scientific Collection «InterConf»*. 2024. № 188. С. 344–347. URL: <https://archive.interconf.center/index.php/conferenceproceeding/article/view/5428>
18. Білецький В. С., Олійник Т. А., Смирнов В. О., Скляр Л. В. Основи техніки та технології збагачення корисних копалин : навч. посіб. Київ : Ліра-К, 2020. 634 с.
19. Олійник Т. А., Невзоров В. В. Аналіз математичних моделей розділення матеріалу за крупністю з урахуванням властивостей обладнання, характеристик матеріалу та умов процесу грохочення. *Геотехнічна механіка*. 2024. Вип. 171. С. 47–58. DOI: [https://doi.org/10.26642/ten-2025-2\(96\)-259-272](https://doi.org/10.26642/ten-2025-2(96)-259-272)
20. Yadav T. P., Yadav R. M., Singh D. P. Mechanical Milling: a Top Down Approach for the Synthesis of Nanomaterials and Nanocomposites. *Nanoscience and Nanotechnology*. 2012. Vol. 2, No. 3. P. 22–48. DOI: <https://doi.org/10.5923/j.nn.20120203.01>
21. Joy J. та ін. Recent Developments on the Synthesis of Nanocomposite Materials via Ball Milling Approach for Energy Storage Applications. *Applied Sciences*. 2022. Vol. 12. P. 9312. DOI: <https://doi.org/10.3390/app12189312>
22. Zahid M. S., Alabdullah F. A., Bassyouni M. Sustainable Approaches to Nanomaterial Synthesis Using Mechanical Grinding Methods. *International Journal of Industry and Sustainable Development*. 2026. Vol. 7, No. 1. DOI: <https://doi.org/10.21608/ijisd.2026.446142.1094>
23. Гапоненко К. А., Бровко Д. А., Андрєєв Б. М., Кононенко В. В., Хворост В. В., Гапоненко Р. К., Олійник Т. А. Спосіб формування свердловинного заряду вибухової речовини. Патент на корисну модель №158695. МПК F42D 1/02, F42D 1/08, F42D 3/04, F42B 1/01, F42B 3/08, F42B 3/16, F42B 3/18. Номер заявки и 2024 04579. Дата подання заявки 23.09.2024. Дата опублікування 05.03.2025, Бюл.№10. 4 с.

REFERENCES:

1. Stoialov, V. V. (2024). *Tekhnolohiia rudopidhotovky zalizystykh kvartsytiv Pervomaiskoho rodovyshcha iz zastosuvanniam valkiv vysokoho tysku [Technology of ore preparation of ferruginous quartzites of the Pervomaysk deposit using high-pressure rolls]* (PhD thesis). Kryvorizky natsionalnyi universytet. <http://ds.knu.edu.ua/jspui/handle/123456789/6824> [in Ukrainian]
2. Li, L., et al. (2023). Evaluating the performance of an industrial-scale high pressure grinding rolls (HPGR)-tower mill comminution circuit. *Minerals Engineering*, 183, 107592. . <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2022.107973>
3. Morrell, S. (2022). Helping to reduce mining industry carbon emissions: A step-by-step guide to sizing and selection of energy efficient high pressure grinding rolls circuits. *Minerals Engineering*, 176, 107340. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2022.107431>
4. Wu, C., & Lai, J., et al. (2025). Energy saving and grinding circuit optimization in tungsten ore processing plant through high pressure grinding rolls and one stage grinding design: An industrial case study. *Minerals Engineering*, 224, 109228. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2025.109276>
5. Rodrigues, A. F. d. V., Delboni Junior, H., & Silva, K. (2023). Transforming iron ore processing – Simplifying the comminution and replacing reverse flotation with magnetic and gravity separation. *Minerals Engineering*, 198, 108115. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2023.108112>
6. Ballantyne, G. R., & Powell, M. S. (2014). Benchmarking comminution energy consumption for the processing of copper and gold ores. *Minerals Engineering*, 65, 109–114. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2014.05.017>
7. Calderón Bedoya, P. A., Botta, P. M., & Fanovich, M. A. (2023). Influence of the milling materials on the mechanochemical synthesis of magnetic iron oxide nanoparticles. *Journal of Alloys and Compounds*, 938, 168527. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2023.168720>

8. Carvalho, R. M. S., et al. (2013). Synthesis of magnetite nanoparticles by high energy ball milling. *Applied Surface Science*, 275, 84–87. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2013.01.118>
9. Guo, J., Wang, S., Liu, Z., Wu, S., Guan, W., & Zhang, H. (2024). Simulation and analysis of high-pressure grinding rolls performance based on DEM-PRM. *Minerals Engineering*, 218, 108963. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2024.109039>
10. Campos, T. M. B., et al. (2021). Modeling comminution of iron ore concentrates in industrial-scale HPGR. *Powder Technology*, 383, 244–255. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.12.075>
11. Lara, L. F. d. S., Lima, G. F. C., Resende, L., & Bezerra, A. C. d. S. (2025). Recent advances and perspectives of eco-efficient building materials from iron ore tailing: characterization, performance, and consumption. *Journal of Cleaner Production*, 499, 145091. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.145488>
12. Nielsen, K., & Malvik, T. (1999). Grindability enhancement by blast-induced microcracks. *Powder Technology*, 105(1–3), 52–56. [https://doi.org/10.1016/S0032-5910\(99\)00117-5](https://doi.org/10.1016/S0032-5910(99)00117-5)
13. Khademian, A., & Bagherpour, R. (2017). Alteration of grindability of minerals due to applying different explosives in blasting operation. *Minerals Engineering*, 111, 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2017.06.016>
14. Hubina, V. et al. (2024). Mineralni ta fizyko-khimichni zminy mahnetyovykh kvartsytyv Valiavy'nskoho ta Novokryvorizkoho rodovyshch Kryvbasu v protsesakh yikh pererobky [Mineral and physicochemical changes of magnetite quartzites of Valiavkynske and Novokryvorizke deposits of Kryvbas during processing]. *Visnyk Kyivskoho natsionalnogo universytetu imeni Tarasa Shevchenka. Heolohiia – Bulletin of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 1(104), 36-48. <https://doi.org/10.17721/1728-2713.104.05> [in Ukrainian]
15. Lavrynenko, O. M. (2022). Potentsiinyi vplyv produktiv dysperhuvannia mahnetyovykh kvartsytyv na dovkillia [Potential environmental impact of magnetite quartzite dispersion products]. *Visnyk NTUU «KPI». Khimichna inzheneriia, ekolohiia ta resursozberezhennia – Bulletin of NTUU «KPI». Chemical Engineering, Ecology and Resource Conservation*, (3), 85–93. <https://doi.org/10.20535/2617-9741.3.2022.265364> [in Ukrainian]
16. Verkhovtsev, V. H., Pokaliuk, V. V., Hubin, V. H. et al. Zminy mahnitnykh vlastyvostei mahnetyovykh kvartsytyv Ihulets'koho rodovyshcha Kryvbasu v protsesi zbahachennia [Changes in magnetic properties of magnetite quartzites of the Inhuletz deposit of Kryvbas during beneficiation]. *Heokhimiia tekhnolohii – Geochemistry of Technogenesis*. 7, 42-46. <https://doi.org/10.32782/geotech2022.35.07> [in Ukrainian]
17. Antonenko, T., Snisar, V., & Ovsienko, V. (2024). Okysnennia mineralnoi fazy mahnetytu v protsesi mekhanichnogo podribnennia . Scientific Collection «Inter Conf», 188, 344-347. <https://archive.interconf.center/index.php/conferenceproceeding/article/view/5428> [in Ukrainian]
18. Biletskyi, V. S., Oliinyk, T. A., Smyrnov, V. O., & Skliar, L. V. (2020). Osnovy tekhniki ta tekhnolohii zbahachennia korysnykh kopalyn [Fundamentals of technique and technology of mineral beneficiation]. *Lira-K*. [in Ukrainian]
19. Oliinyk, T. A., & Nevzorov, V. V. (2024). Analiz matematychnykh modelei rozdilennia materialu za krupnistiu z urakhuvanniam vlastyvostei obladnannia, kharakterystyk materialu ta umov protsesu hrokhottannia [Analysis of mathematical models of material separation by particle size considering equipment properties, material characteristics and screening conditions]. *Heotek'hnichna mekhanika – Geotechnical Mechanics*, 171, 47–58. [https://doi.org/10.26642/ten-2025-2\(96\)-259-272](https://doi.org/10.26642/ten-2025-2(96)-259-272) [in Ukrainian]
20. Yadav, T. P., Yadav, R. M., & Singh, D. P. (2012). Mechanical Milling: a Top Down Approach for the Synthesis of Nanomaterials and Nanocomposites. *Nanoscience and Nanotechnology*, 2(3), 22–48. <https://doi.org/10.5923/j.nn.20120203.01>
21. Joy, J. et al. (2022). Recent Developments on the Synthesis of Nanocomposite Materials via Ball Milling Approach for Energy Storage Applications. *Applied Sciences*, 12, 9312. <https://doi.org/10.3390/app12189312>
22. Zahid, M. S., Alabdullah, F. A., & Bassyouni, M. (2026). Sustainable Approaches to Nanomaterial Synthesis Using Mechanical Grinding Methods. *International Journal of Industry and Sustainable Development*, 7(1). <https://doi.org/10.21608/ijisd.2026.446142.1094>
23. Haponenko, K. A., Brovko, D. V., Andrieiev, B. M., Kononenko, V. V., Khvorost, V. V., Haponenko, R. K., Oliinyk, T. A. (2026). Sposib formuvannia sverdlovyynnogo zariadu vybukhovoi rehovyny. *Patent na korysnu model* №158695. MPK F42D 1/02, F42D 1/08, F42D 3/04, F42B 1/01, F42B 3/08, F42B 3/16, F42B 3/18. Nomer zaiavky u 2024 04579. Data podannia zaiavky 23.09.2024. Data opublikuvannia 05.03.2025, Biul. №10. 4 s.



Стаття поширюється на умовах
ліцензії відкритого доступу
CC BY 4.0

Дата першого надходження статті до видання: 14.04.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 07.05.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.05.2026