

## ФІЗИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ СЛАБОМАГНІТНИХ МІНЕРАЛІВ ОКИСЛЕНИХ КВАРЦИТІВ КРИВБАСУ

**Мета.** З метою зменшення втрат металу після подрібнення, в процесі збагачення, проведено вивчення магнітних властивостей мінералів і визначена здатність до флокуляції мономінеральних фракцій слабомагнітних породоутворюючих мінералів окислених кварцитів Кривбасу.

**Методи.** Досліджено мономінеральні фракції гематиту, мартиту, гетиту, сидериту і кварцу, які не є абсолютно чистими, а містять включення інших мінералів, включаючи тонковкраплений магнетит, який не розкривається навіть у класі -5 мкм. Так, кварц може містити від 0,03 до 0,7% магнетиту. Залишкова намагніченість і коерцитивна сила тонких частинок кварцу розміром 5 мкм в два рази більше, ніж той же показник у частинок гетиту. Це є однією з причин засмічення магнітних продуктів. Проведені експериментальні дослідження підтвердили наявність процесу флокулоутворення в процесі збагачення.

**Наукова новизна.** У продуктах з підвищеною масовою часткою магнетиту в полях напруженості до 800 кА/м утворюються флокули з частинки магнетиту. Тяжіння слабомагнітних частинок до них незначно. При збільшенні індукції поля флокули притягуються між собою, на них поступово налипають частинки слабомагнітних мінералів, особливо при напруженості понад 400 кА/м, а при 800 кА/м це вже більш об'ємні агрегати-флокули, побудовані паралельними ланцюжками в напрямку поля.

**Практична значимість.** Зі зменшенням розмірів частинок гематиту, мартиту і гетиту тяжіння в флокули відбувається при менших відстанях між ними. Спільне намагнічування великих і дрібних частинок полегшує флокулоутворення, особливо в полі 800 кА/м.

**Результати.** Результати досліджень пояснюють порівняно низькі показники магнітного збагачення окислених кварцитів, а дані по флокуляції слабомагнітних мінеральних часток допомагають поліпшити показники збагачення.

**Ключові слова:** окислені кварцити, намагніченість, магнітна сила, коерцитивна сила, флокулоутворення.

doi:10.31721/2306-5435-2022-1-110-27-32

**Проблема та її зв'язок з науковими і практичними завданнями.** У теперішній час основною сировиною для виробництва залізородних концентратів в Україні є магнетитові кварцити. Але поглиблення кар'єрів і погіршення якості сировини приводить до зростання собівартості видобутку і збагачення не тільки руди, а й агломерату, окатишів, чавуну та сталі.

Як відомо, верхня частина розрізів п'ятого, шостого та сьомого залізистих горизонтів продуктивної саксаганської світи в родовищах Криворізького басейну є зоною інтенсивних гіпергенних змін. Утворена вона так званими окисленими кварцитами - мартитовими, залізнослюдко-мартитовими, мартит-залізнослюдковими, дисперсно-гематит-мартитовими. На початку роботи гірничо-збагачувальних комбінатів (ГЗК) Кривбасу, запаси на окислені кварцити були підраховані лише на Південному, Новокриворізькому, АрселорМіттал Кривий Ріг (колишній Ново-Криворізький ГЗК) та Центральному ГЗК. На перших двох комбінатах вони складувались в окремі відвали, а на Центральному ГЗК - збагачувались за випал-магнітною схемою. Але в зв'язку екологічними і економічними чинниками це збагачення було зупинено. Тому крім затверджених запасів окислених кварцитів у надрах, на балансі підприємств рахуються запаси окислених кварцитів, які заскладовано в відвалах. Опубліковані дані, з яких випливає, що в Криворізькому басейні зосереджено понад 50 млрд тонн цього типу руд [1].

З огляду на сказане, буде доцільно приступити до розвідки і більш детального вивчення окислених кварцитів, дати їм техніко-економічну оцінку й переходити до проектування і експлуатації цих руд. Технічні можливості для збагачення окислених кварцитів мають на чотирьох з п'яти ГЗК, за рахунок наявності двох збагачувальних фабрик, одна з яких може бути переобладнана під такі цілі.

Збагачення окислених крупно- й тонко-вкраплених залізних руд здійснюється в Бразилії, США та Австралії із 70-х років минулого століття.

Чисельні дослідження збагачення тонко-вкраплених окислених кварцитів в сильному магнітному полі вказують на труднощі, які не дозволяють отримати високосортні концентрати [1-8].

Авторами даної публікації виконано роботу щодо додаткового вивчення магнітних властивостей мінералів в полях високої напруженості й досліджено їх флокуляційні властивості.

**Аналіз дослідження і публікації.** Для крупновкраплених руд застосовується, в основному, мокромагнітна сепарація в сильному магнітному полі, для тонко- й вельми тонко-вкраплених - флотація.

Для магнітного збагачення в Австралії використовують сепаратори продуктивністю 250 т/год.

Такі високоградієнтні сепаратори з «киплячим шаром», що розроблені в Польщі, можуть виготовлятися продуктивністю 400, 800 і 1400 т/год. Всі вони мають головну особливість, а саме, на переробку спрямовується грубозернистий знешламлений багатий матеріал. З іншого боку, відомо досвід роботи підприємства Тілден в штаті Міннесота (США), де є значні запаси окислених таконітів, для яких досліджували різні методи збагачення, у тому числі поліградієнтну магнітну сепарацію, флотацію і випал-магнітний метод, але всі вони не дали позитивних результатів. І лише технологія Гірничого бюро США, що полягає у застосуванні селективної флокуляції в поєднанні із зворотною катіонною флотацією, привела до успіху. В цьому процесі використовують такі реагенти як аміни і крохмаль.

Складність збагачення руди Тілдена полягає в тому, що задля розкриття мінеральних частинок руди необхідно подрібнення до 75-80 % класу крупності <20 мкм, тобто перетворювати її в високошлавний матеріал. Прецедентів в збагаченні руд такої крупності механічними способами до цього не було.

Гематито-мартитові руди Кривбасу - слабомагнітні породи, які містять до 40-42 % заліза. За розмірами рудної вкрапленості вони відносяться до тонко вкраплених та досить тонковкраплених залізистих порід.

У результаті досліджень мокрої поліградієнтної магнітної сепарації інститутом «Механобрчормет» (м. Кривий Ріг) розроблено технологію збагачення гематитових кварцитів. За цією схемою передбачалось одержання концентрату з масовою часткою заліза 62-62,5 % і витягу металу 70 %.

Результати промислового випробування на Центральному ГЗК показали, що масова частка заліза в концентраті склала тільки 61 % при вилученні 70 %.

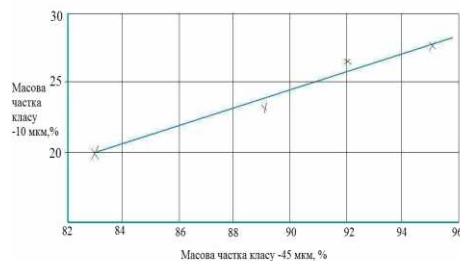
Міжциклове виділення концентрату при магнітному і флотаційному збагаченні приводить до підвищення якості до 64,1 %, при витягу заліза 70,5 %.

**Мета статті** - дослідження намагніченості тонких класів крупності та процесу селективної флокуляції окислених залізних руд Кривбасу для поліпшення показників їх магнітного збагачення в сильному магнітному полі.

**Матеріали та методи дослідження.** Робота виконувалась в лабораторних умовах. Мономінеральні фракції виділялись за допомогою вібраційного подрібнювача (КИД-60); гравітаційного аналізатора з полем, що біжить; гравітаційного і седиментаційного аналізів. Магнітні властивості мономінеральних фракцій вивчались за допомогою вібромагнітометра MicroMag 3900. Процес флокуляції і сталості флокул досліджувався на установці, що включає електромагніт (ФЛ-1) і дозволяє отримати магнітне поле з напруженістю до 1600 кА/м та мікроскопом з вбудованим фотоапаратом.

**Викладення матеріалу та результати.** Труднощі збагачення слабомагнітних залізних руд пов'язані з їх посиленням шламванням. Аналіз продуктів збагачення показав, що основні втрати заліза доводяться на класи крупності менше 10-20 мкм.

На рис. 1 наведено залежність утворення класу -10 мкм від крупності подрібнення.



**Рис. 1.** Утворення класу -10 мкм в подрібнених окислених кварцитах, залежності від крупності подрібнення

З підвищенням ступеню подрібнення, збільшенням масової долі класу -45 мкм, підвищується масова доля класу -10 мкм, що призводить до збільшення ступеню зашламування, яке ускладнює процес збагачення будь-яким механічним способом.

На рис. 2 показано залежність магнітної сили  $F_m$  від крупності часток мартиту і гідроксидів

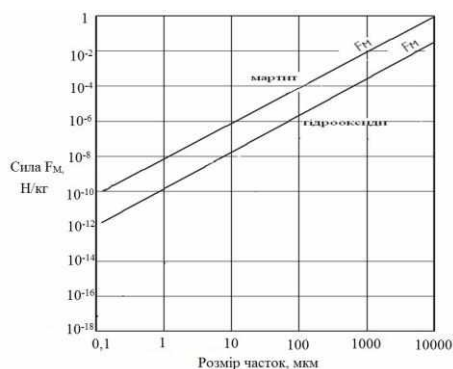


Рис. 2. Залежність магнітної сили FM від розмірності часток мартиту і гідроксидів

Магнітна сила слабомагнітних мінералів підвищується зі збільшенням розміру частинок мінералів у даному діапазоні крупності. Причому, магнітна сила тяжіння у мартиту вища, ніж у гідроксидів заліза. Дрібні частинки при їх утворенні в процесі подрібнення, закріплюються на більш крупних, що призводить до зменшення магнітних властивостей і зниження селективності розділення мінералів (див. рис. 1).

У даній роботі наведено результати досліджень слабомагнітних мономінеральних фракцій гематиту, мартиту, гетиту, сидериту і кварцу. При цьому необхідно враховувати, що як природні мінерали, так і підготовлені мономінеральні фракції не є чистими. Вихідний кварц вміщує значну кількість елементів-домішок, серед яких домінує залізо. Присутній тонковкраплений магнетит, який не розкривається навіть у класі  $-5\div+0$  мкм вносить свою частку в магнітні властивості мінералів. Наприклад, в природному кварці містяться включення магнетиту в кількості від 0,03 до 0,7 % [9]. Саме цим, на нашу думку, пояснюється те, що намагніченість насичення тонких класів ( $< 10$  мкм) кварцу більше, ніж той самий показник мартиту й гетиту. Залишкова намагніченість і коерцитивна сила тонких класів кварцу порівняна з тими ж показниками гетиту і сидериту. Причому залишкова намагніченість частинок кварцу розміром  $-5$  мкм у два рази більше, ніж цей же параметр частинок гетиту такого ж розміру. Це може бути однією з причин засмічення магнітних продуктів тонкоподрібненим кварцом при магнітному збагаченні руди.

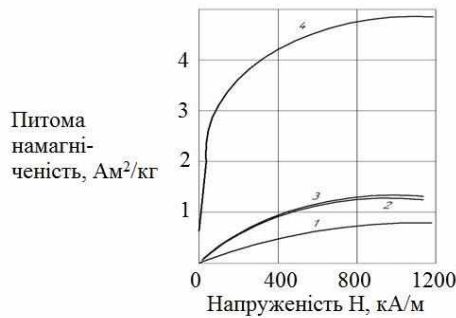
Дані дослідження вказують на неоднозначність залежності властивостей досліджених мінералів від їх крупності (табл. 1).

Таблиця 1  
Залишкова питома намагніченість та коерцитивна сила мінералів криворізьких окислених кварцитів

Класи крупності, мкм	Мінерали				
	Мартит	Гематит	Гетит	Сидерит	Кварц
Залишкова питома намагніченість, Ам/кг					
-250÷+160	0,089	0,136	0,013	0,022	0,006
-160÷+100	0,104	0,101	0,003	0,018	0,004
-100÷+74	0,106	0,093	0,007	0,006	0,005
-74÷+45	0,164	0,108	0,01	0,007	0,006
-45÷+20	0,237	0,152	0,017	0,038	0,088
-20÷+10	0,223	0,173	0,026	0,064	0,033
-10÷+5	0,190	0,27	0,015	0,051	0,043
-5÷+0	0,145	0,3	0,03	0,00	0,069
Коерцитивна сила, кА/м					
-250÷+160	1,9	20,6	6,2	1,2	15,90
-160÷+100	2,8	3,15	3,8	1,4	5,6
-100÷+74	4,2	3,0	3,0	1,1	5,6
-74÷+45	7,45	8,7	2,9	1,0	3,2
-45÷+20	27,5	5,5	3,6	2,8	5,2
-20÷+10	43,5	10,3	4,2	3,7	4,2
-10÷+5	55,0	7,8	4,5	6,0	4,1
-5÷+0	64,0	16,8	4,9	...	4,2

Дані таблиці засвідчують, що залишкова питома намагніченість для мартиту, гематиту, гетиту і сидериту має найбільші значення в класах крупності  $-45\div+20$  мкм та  $-20\div+10$  мкм, а для кварцу - в класах крупності  $-45\div+20$  мкм і найдрібнішій фракції  $-5\div+0$  мкм.

Найбільш яскраво ця залежність проявляється для гематиту (рис. 3).

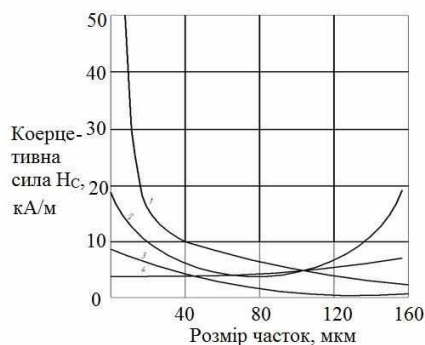


**Рис. 3.** Залежність питомої намагніченості насичення гематиту від напруженості магнітного поля для різної крупності гематиту: 1 -  $160\div+45$  мкм; 2 -  $45\div+20$  мкм; 3 -  $20\div+10$  мкм; 4 -  $10\div+0$  мкм

Гематит різної крупності починає насичуватися після 1000-1200 кА/м. Магнітні властивості гематиту мають свій пік в класі  $-10\div+5$  мкм. При подальшому зменшенні крупності частинок магнітні властивості гематиту, крім коерцитивної сили зменшуються.

Це свідчить про те, що розміри однодомної структури гематиту знаходяться в межах 10 мкм. У всіх класах крупності, крім  $-5\div+0$  мкм, наростання магнітних властивостей пов'язано зі збільшенням масової частки магнетиту в гематиті. І тільки в класі  $-5\div-0$  мкм відбувається різке зниження магнітних властивостей, що пов'язано з руйнуванням однодомної структури часток мінералу при подрібненні.

Дослідження залежності коерцитивної сили від крупності показали, що тільки у мартиту вона яскраво виражена. Зі зменшенням розміру частинок цей параметр досягає найбільшого для всіх мінералів значень (рис. 4).



**Рис. 4.** Залежність коерцитивної сили мінералів несокислених кварцитів від крупності: 1 - мартит; 2 - гематит; 3 - сидерит; 4 - гетит

Така залежність характерна для феромагнетиків, наприклад, магнетиту. У гематиту такої залежності немає, а у сидериту зі зменшенням крупності, починаючи з 40 мкм, коерцитивна сила збільшується

З метою поліпшення показників магнітного збагачення окислених кварцитів в сильному полі, авторами цієї статті вивчався процес флокуляції мономінеральних фракцій породоутворюючих слабوماгнітних мінералів. Процес флокулоутворення досліджувався під мікроскопом в однорідному магнітному полі напруженістю до 800 кА/м на частинках тонких класів крупності.

У продуктах з підвищеною масовою часткою магнетиту (в основному, сидерит і гематит крупністю 0,01 мм) утворюються флокули з частинок магнетиту. Тяжіння до них слабوماгнітних частинок незначне. При збільшенні індукції поля ці флокули притягуються між собою, а на них поступово налипають частинки основних слабوماгнітних мінералів, особливо при напруженості вище 400 кА/м, а при напруженості 800 кА/м - це вже об'ємні агрегати - флокули з магнетитових частинок, оточені частинками основних мінералів, збудовані паралельними ланцюжками в напрямку поля. Чим менше масова частка магнетиту, тим менше цих флокул і агрегатів і тим менше їх довжина.

Флокулоутворення частинок слабوماгнітних мінералів вивчено на окремих частинках і їх сукупності при відстані між центрами частинок, що дорівнює 1,3-2,2 діаметру частинок, що відповідає в 0-20 % твердої фази в пульпі. При напруженості 40-80 кА/м відбувається розгорнення частинок легкої вісі намагнічування вздовж напрямку поля. Причому, частки гематиту і гетиту встановлюються переважно за довжиною осі перпендикулярно напрямку поля, що говорить про існуючий напрямок легкої осі намагнічування. Для частинок гематиту розміром 10 мкм у полі напруженістю 400 кА/м тяжіння починається при відстані близько 1,5 діаметру частинки. В полі напруженістю 640-800 кА/м тяжіння у флокули починається з відстані близько 2 діаметра частинки. Частинки гетиту розміром 100 мкм притягуються приблизно з тих же відстаней, незважаючи на більш низьку намагніченість, що обумовлено кращим зважуванням у важкій рідині і меншими силами тертя з дном кювети. Частинки мартиту притягуються з відстаней, приблизно на 30 % більшим. Зі зменшенням розмірів частинок гематиту, мартиту і гетиту тяжіння у флокули відбувається при менших відстанях між ними. Так, для частинок крупністю 50 мкм відносна відстань тяжіння приблизно на 40 % менше, ніж для частинок роз-

міром 100 мкм. Для мартиту і гетиту крупністю більше 25 мкм відносна відстань приблизно в два рази менше, ніж для крупності 200 мкм. Для частинок гематиту розміром 25 мкм відносна відстань тяжіння тільки на 10 % менше, ніж для крупності 100 мкм, що обумовлено зростанням намагніченості дрібних частинок.

Слід зауважити, що деякі частинки не притягуються під флокули в полі 800 кА/м навіть з відстані  $\frac{1}{3}$  діаметра частинки. Вважаємо, що це зумовлено поверхневим магнетизмом.

Спільне намагнічування крупних частинок з дрібними, трохи полегшує флокулоутворення для дрібних частинок, за рахунок утворення їх флокул з крупними, особливо у полі 800 кА/м.

Наведені результати досліджень свідчать про реальність флокулоутворення і були використані для створення флокулятора і знаходження оптимальних умов магнітного збагачення на поліградієнтних сепараторах з використанням попередньої флокуляції.

**Висновки.** Проведені дослідження дозволили зробити такі висновки:

1. Залишкова намагніченість і коерцитивна сила тонких частинок кварцу розміром 5 мкм в два рази більше, ніж той же показник у частинок гетиту за рахунок домішок магнетиту у кварці та монофракціях у подрібненому продукті. Намагніченість насичення тонких класів (менше 10 мкм) кварцу більше, ніж той самий показник у мартиту й гетиту, що є однією з причин за-смічення магнітних продуктів.

2. З підвищенням ступеню подрібнення підвищується масова доля класу -10 мкм, що призводить до збільшення ступеню зашламування, а це ускладнює процес збагачення будь-яким механічним способом.

3. Магнітна сила слабомагнітних мінералів підвищується в діапазоні 0,1-10000 мкм. Магнітна сила тяжіння у мартиту вища, ніж у гідроксидів заліза.

4. Залежність коерцитивної сили від крупності подрібнення мінералів показали, що тільки у мартиту вона яскраво виражена. Зі зменшенням розміру частинок цей параметр досягає найбільшого значення для всіх мінералів.

5. Зі зменшенням розмірів частинок гематиту, мартиту і гетиту тяжіння у флокули відбувається при менших відстанях між ними. Спільне намагнічування великих часток з дрібними трохи полегшує флокулоутворення особливо у полі 800 кА/м.

6. Магнітні властивості залежать як від магнітних властивостей основних мінералів, так і від присутності в них магнетиту. Отримано неоднозначну залежність магнітних характеристик від крупності частинок. Визначено відстані, починаючи з яких відбувається тяжіння частинок у флокули.

#### *Список літератури*

1. **Николенко Е.М.** О стратегии развития геолого-разведочных работ в Криворожском железорудном бассейне // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. - 2013. - №7. - С.115-117.
2. **Грицай Ю.Л., Герасимова З.Ф., Богданова И.П.** Исследование изменения магнитных свойств минералов окисленных железных руд после намагничивания. Обогащение руд черных металлов. М. «Недра». - 1976. - С. 73-81.
3. Применение высокоинтенсивных магнитных сепараторов для доизвлечения слабомагнитных окислов железа из хвостов обогащения // *Экспресс-информация УНИИТЭН ЧМ. Серия Обогащение руд*. Вып.11 - М., 1982. - С.1-5.
4. Селективная флокуляция шламов окисленных железистых кварцитов Михайловского месторождения с применением активной кремнекислоты / **Л.А. Барский, Э.А. Шрадер, С.А. Степанов** и др. // *Комплексное освоение месторождение бассейна КМА*. Сб. науч. Тр. Ин-та проблем компл. освоения недр АН СССР. - М., 1990. - С.129-138.
5. **Бартник Е.А., Висмут Г.Д.** Обогащение мартитизированной железной руды с применением высокоинтенсивных сепараторов Джонс, работающих в мокром режиме. // *Erzmetall*, 1985. - №5. - С. 243-249.
5. **Ширяев А.А., Величко Ю.В., Ботвинников В.В.** Особенности технологии подготовки и обогащения окисленных железистых кварцитов со стадийным выделением концентрата / *Металлургическая и горнорудная промышленность*, 2005. - №4. - С. 86-88.
6. **Соколова В.П., Зима С.Н., Воробьев Н.К.** Исследование раскрытия минеральных фаз окисленных железных руд в связи с выбором рациональной технологии обогащения / *Разработка рудных месторождений*, 2003. - Вып. 83. - С.105-109.
7. **Соколова В.П., Габура А.В.** К вопросу обогащения окисленных железных руд Ингулецкого месторождения / *Разработка рудных месторождений*, 2003. - Вып. 84. - С.153-158.
8. *Минералогия Криворожского бассейна*. Под ред. **Е.К. Лазаренко**. - К.: Наукова думка, 1977. - 541 с.
9. *Наладка и освоение техники и технологии обогащения окисленных железных руд на реконструированной секции №4 ЦГОКа с целью повышения производительности и качества концентрата: Отчёт о НИР/Рук. работы Нотович Г.И., Механобрчермет, Кривой Рог, 1993. - 63 с.*
10. *Испытания в полупромышленных условиях магнитно-флотационной технологии обогащения окисленных руд КГОКОРа (заключительный). Отчёт о НИР/ «Механобрчермет»; Руков. работы Т.Б.Гадзенко. - Кривой Рог, 1993. - 53 с.*