

<https://doi.org/10.15407/mineraljournal.41.04.031>

УДК 549:622.7(510)

**Зінь Ченгуй¹, Ван Шоулунь¹,
О.Ю. Палкіна², Т.Д. Піддубна³, В.В. Іванісов³**

¹ Сіностил. Тяньцзіньська геологічна академія Ко., Лтд
300061, м. Тяньцзінь, Китайська Народна Республіка, пр-т Юй, 42
E-mail: jingcg@sinosneel.com, wangsholun@sohu.com

² Українське мінералогічне товариство
03142, м. Київ, Україна, пр-т Акад. Палладіна, 34
E-mail: e_leyka@ukr.net

³ Академія гірничих наук України
50002, м. Кривий Ріг, Україна, вул. Пушкіна, 37
E-mail: poddub.t@gmail.com, ivanisov-v@gmail.com

ЗНАЧЕННЯ МІНЕРАЛОГІЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ДЛЯ РОЗРОБКИ ТА УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ПЕРЕРОБКИ РУД (НА ПРИКЛАДІ РОДОВИЩ КИТАЮ)

Дослідження колективу лабораторії збагачення мінеральної сировини Тяньцзіньської геологічної академії (ТГА, Китайська Народна Республіка), тривали у співпраці з українськими вченими понад два десятиліття і були спрямовані на розробку ефективних методів збагачення різних видів мінеральної сировини — золотовмісних, поліметалевих, залізних та марганцевих руд родовищ Китаю. Ці дослідження показали реальну можливість оптимізації відомих технологічних процесів під час переробки руди. За останні чотири роки робота була виконана на матеріалі із родовищ заліза і золота. Для переробки залізної руди родовища Аньшань було запропоновано комплексне технологічне рішення, яке базується на використанні магнітної сепарації, класифікації та гравітаційних методах переробки руди. У результаті одержано концентрат високої якості з мінімальним вмістом шкідливих домішок. Для золотовмісних руд родовища Яндзекон було запропоновано схему технологічної переробки, яка дала змогу скоротити втрати золота на 20—30 %. Автори впевнені, що подальше великооб'ємне технологічне випробування корінних руд і відходів їх збагачення допоможе повністю відмовитися від витрат на подрібнення та від флотаційних реагентів і, в результаті, розробити екологічно чисті, ресурсоощадні та економічно ефективні схеми збагачення. Головний здобуток виконаних досліджень — реальна можливість найближчим часом упровадити розроблені схеми переробки руд у виробництво.

Ключові слова: збагачення мінеральної сировини, окиснені залізні руди, золотовмісні руди, технологічна переробка, відходи збагачення, ресурсоощадні технології.

Вступ. Спільні науково-дослідні роботи колективу лабораторії збагачення мінеральної сировини Тяньцзіньської геологічної академії (*Sinosteel. Tianjin Geological Academy Co., Ltd Tianjin, China* — ТГА, Китайська Народна Республіка (КНР)) і фахівців Українського державного Інституту мінеральних ресурсів (УкрДІМР, пізніше — Кримське відділення Українського державного геологорозвідувального

інституту (КВ УкрДГРІ)) тривали у 1998—2012 рр. Ці дослідження були організовані з метою розробки ефективних методів збагачення різних видів мінеральної сировини — золотовмісних, поліметалевих, залізних, марганцевих і бокситових руд ряду родовищ КНР. Спираючись на традиційні прямі науково-технічні зв'язки, наш авторський колектив у вказаній лабораторії збагачення мінеральної сировини протягом 2014—2017 рр. одержав нові цікаві результати зі створення ефективних технологій переробки залізо- та золотовмісних руд.

© ЗІНЬ ЧЕНГУЙ, ВАН ШОУЛУНЬ, О.Ю. ПАЛКІНА,
Т.Д. ПІДДУБНА, В.В. ІВАНІСОВ, 2019

Мета досліджень. Сучасна тенденція розвитку мінерально-сировинної бази КНР основана на залученні до переробки і руд, і гірничопромислових відходів, які характеризуються доволі складними технологічними властивостями. Нетрадиційні типи руд і родовищ, розробку яких раніше вважали нерентабельною, стають усе затребуванішими. Основним завданням багаторічних експериментальних робіт було розроблення нових, екологічно безпечних і економічно вигідних технологій для гірничодобувних підприємств. Ці технології повинні були забезпечити відповідним підприємствам замовника підвищення їхньої конкурентоспроможності на ринку КНР і допомогти посісти провідні позиції у галузі. Одночасно дослідницький колектив набув цінного досвіду, застосування якого дає можливість швидкого упровадження сучасних технологій, адаптації їх до конкретних умов і характеристик сировини. Ці знання та навички є надзвичайно необхідними для модернізації та розвитку мінерально-сировинної бази України.

Методи дослідження. Дослідження було виконано на стандартному технологічному обладнанні, що на нашу думку, є дуже важливим. Під час вибору схем збагачення руд було застосовано мінералого-технологічні дослідження, без яких створення технологій переробки руд на сьогодні неможливо.

Сучасні дослідження, спрямовані на розробку ефективних технологій збагачення руд, дали змогу чітко визначити відповідні завданням напрямки і методи технологічної мінералогії. Основні цілі, завдання і комплекс мінералогічних досліджень у ході розробки технологій збагачення також загалом відомі [6]. Можливі методи і область їх застосування прямо залежать від виду сировини, ступеня її вивченості та стадії геологорозвідувальних робіт, тобто від конкретної технологічної задачі. При цьому завжди особливої актуальності набувають питання, пов'язані з тривалістю та вартістю досліджень.

У процесі робіт ми досліджували технологічні властивості мінералів, співвідношення мінералів у руді, з'ясовували особливості структури руд і, головне, поведінки мінералів у процесах переробки. Вивчено мінеральний склад проб загалом і по різних класах і фракціях, отриманих у процесі збагачення. Паралельно виконано хімічний аналіз проб і визначення вмісту в них корисного компонента. Зістав-

лення отриманих результатів й аналіз даних призвели до виявлення мінералів-носіїв корисного компонента, можливих мінералів носіїв небажаних компонентів, установлення їхнього співвідношення і взаємозв'язків, а також дали змогу з'ясувати необхідний ступінь подрібнення, за якого можна отримати кондиційну сировину.

Необхідність швидкого вирішення питань і вибору технологічних рішень у процесі розробки технології збагачення, особливо під час експресних технологічних випробувань, змусила нас мінімізувати комплекс досліджень проблемних руд і мінералів, що їх складають, і обмежитися названими вище методами аналізу.

Природно, що за повного комплексу необхідних видів досліджень, згаданих у роботі [1], можна розраховувати на максимально коректне вирішення питань. Водночас, як свідчить практичний досвід, застосування мінімального комплексу мінералогічних досліджень, поєднаних із хімічним аналізом, є достатньо об'єктивним, але дає змогу суттєво скоротити час та фінансові витрати, і, головне, визначити напрям подальших робіт [3, 4].

Отримані результати та обговорення. Окиснені залізні руди Аньшаньського (*Anshan*) родовища (КНР) із загальним вмістом заліза 36,5 % (TFe 36,5 %) традиційно вважають важкозбагачуваними. Основним рудоутворювальним мінералом є гематит, представлений як власне гематитом, що часто зберігає форму сплюснених псевдогексагональних кристалів, так і перетвореним із магнетиту шляхом мартитизації. Такий гематит у більшості випадків зберігає октаедричну форму і має магнітні властивості з широким діапазоном магнітної сприйнятливості $-0,05$ — $1,2$ Тл. Гематит представлений як окремими зернами, так і агрегатами у вигляді псевдоморфоз по магнетиту. Розмір зерен — від 1 мм (зрідка) до 0,005 мм і дрібніше.

Таким мінеральним утворенням властивий дефіцит заліза (монофракції рудних мінералів містять TFe від 67,0 до 70,0 %), що не дає підстав сподіватись на отримання залізних суперконцентратів із даного типу руд. Магнетит присутній у незначній кількості (не більше 5 %). Широко розвинуті зростання рудних мінералів із кварцом; навіть у матеріалі крупністю 0,005 мм і менше відмічено тонке зростання мінералів заліза з кварцом, що надає останньому магнітних властивостей. Вміст TFe у монофракціях кварцу складає 5—7,9 %.

Зерна рудних мінералів розбиті системою тріщин, які мають звивисті, східчасті контури, часто по напрямках спайності магнетиту. Тріщини заповнені кварцом і, значно рідше, кальцитом та глинистими мінералами. Усе це свідчить про суттєву неоднорідність рудних мінералів і є наслідком процесів метасоматозу і рекристалізації.

Установлено також незначну кількість сидериту (до 0,4 %) і поодинокі зерна піриту. Останній вдалося зафіксувати тільки під час вивчення немагнітної фракції, у якій наявні поодинокі зерна кальциту в зростанні з сидеритом. Слюди представлені біотитом.

Основний нерудний мінерал — кварц. Мінералом-носієм сірки є пірит. Мінерал-носієм фосфору не був визначений, вірогідно, фосфор існує у складі комплексу $[\text{PO}_4]^{2-}$, який заміщує $[\text{CO}_3]^-$ у карбонатних мінералах (кальциті та сидериті). Ми припускали також, що фосфор може знаходитись у апатиті, який утворює дуже тонкі зростання з карбонатними мінералами, але за результатами рентгенівського дослідження апатит встановлений не був. А припущення про зв'язок фосфору з карбонатними мінералами підтвердили результати хімічного аналізу монофракції карбонатних мінералів, відібраних із немагнітної фракції. Така локалізація фосфору дала можливість суттєво скоротити його кількість у отриманому концентраті.

З основними рудними мінералами (магнетитом та гематитом) пов'язаний 81 % заліза від його загальної кількості в руді (табл. 1), 19 % заліза знаходиться у кварці і гідроксидах заліза. Ця частка заліза (19 %) — неминучі втрати, тобто корисний компонент, який неможливо вилучити, що є наслідком особливостей мінерального складу окиснених залізних руд.

Тобто, частка вилученого заліза у концентраті за повного вилучення рудних мінералів не перевищить 81 %. Теоретичний вихід концентрату з повним вилученням основних рудних мінералів (магнетит та гематит) складає не більше 42,8 %.

Завдяки досвіду роботи зі збагачення окиснених залізних руд Криворізького залізорудного басейну (Україна) фахівцями УкрДІМР (І.Є. Палкін, Т.Д. Піддубна, Л.О. Маклакова) 2009 року була розроблена принципово нова технологія збагачення, заснована на гравітаційних методах. Результати цих робіт довели, що отримання високоякісних залізних концентратів із окиснених залізних руд є можливим і без застосування флотаційних методів. Масове упровадження у промислове використання високоефективного тонкого грохочення (325 mesh) та гравітаційного обладнання для шламового матеріалу дають змогу залучати до експлуатації руди, аналогічні рудам Аньшаньського родовища.

В основу технологічної схеми було покладено магнітно-гравітаційні методи з послідовним двостадійним подрібненням до крупності 0,125 і 0,045 мм. Розроблена схема вигідно відрізняється простотою технічних рішень. У результаті первинного збагачення, базованого на двостадійній магнітній сепарації подрібненням і тонким грохоченням (класифікація), було одержано: залізистий продукт із вмістом $T\text{Fe}$ 57,33 % (вихід 49,17 %, вилучення $T\text{Fe}$ 77,27 %) і відвальні хвости зі вмістом $T\text{Fe}$ 16,31 % (вихід 50,83 %, вилучення $T\text{Fe}$ 22,73 %).

Шляхом основної і контрольної гравітації одержано та виведено з процесу значний об'єм залізистого концентрату. За розробленою схемою отриманий залізний концентрат висо-

Таблиця 1. Розподіл заліза ($T\text{Fe}$) за основними залізистими мінералами і фракціями, %

Table 1. Distribution of iron ($T\text{Fe}$) by main iron-contained mineral and fractions, %

Мінерал	Вміст мінералу у руді ¹	Вміст $T\text{Fe}$ у мінералі ²	Розподіл $T\text{Fe}$ за мінералами у руді ³	Мінерал	Вміст мінералу у руді ¹	Вміст $T\text{Fe}$ у мінералі ²	Розподіл $T\text{Fe}$ за мінералами у руді ³
Магнетит	4,8	72,0	9,4	Гідроксида заліза	10,1	32,7	9,1
Гематит	38,0	69,0	71,6	Інші	1,1	Сл.	—
Кварц	46,0	7,9	9,9	Σ	100,0		100,0

Примітка. ¹ частка залізистого мінералу у руді; ² вміст $T\text{Fe}$ у мінералі (розрахунковий для магнетиту і гематиту, визначений за результатами хімічного аналізу для кварцу та гідроксидів заліза); ³ наведено частку заліза у руді, пов'язану з відповідним мінералом. Сл. — сліди.

Note. ¹ proportion of iron bearing mineral in ore; ² content of $T\text{Fe}$ in mineral (calculated for magnetite and hematite, determined by the results of chemical analysis for quartz and iron hydroxides); ³ iron fraction in ore associated with the corresponding mineral. Сл. — traces.

кої якості із вмістом заліза TFe 65,2 % та з мінімальним вмістом шкідливих домішок — сірки і фосфору. Вилучення заліза склало 63,7 %, тобто 79 % гранично досяжного. Одержання вищих показників є можливим лише за умови використання сучасного гравітаційного обладнання нового покоління — гвинтових шлюзів, шламових столів, центробіжних сепараторів.

Золотовмісні руди. КНР є одним із мирових лідерів у видобутку золота. Однак останнім часом значно зросли вимоги до екологічної безпеки розробки золоторудних родовищ, зокрема і до технології його вилучення. Це примушує надрокористувачів суттєво міняти як систему розробки родовищ, так і методи збагачення золотовмісних руд, які традиційно передбачали використання високотоксичних реагентів.

Мінералогічний супровід технологічних випробувань золотовмісних руд Китаю дав можливість визначити мінеральний склад і структуру досліджуваних руд, з'ясувати зв'язок мінералів між собою та приналежність їх до певних генерацій. Це дало підстави змінити схему збагачення й установити необхідну та достатню крупність подрібнення породи для ефективної обробки.

Руди декількох родовищ, які ми вивчали, є сульфідними. Мінерали-носії золота — пірит і арсенопірит, звичайно знаходяться у зростаннях із кварцом, карбонатами та, часто, сульфідами кольорових металів.

Наприклад, для золотовмісного родовища Лінбао (*Linbao*) (провінція Хенань) зіставлення даних мінералогічного аналізу і визначення вмісту золота і срібла, виконане за класами крупності вихідної проби, допомогло виявити закономірності їх розподілу.

Таблиця 2. Вміст золота і срібла у відібраних фракціях піриту I генерації, силікатів і кварц-пірит-слюдисто-карбонатних зростків II генерації

Table 2. Contents of gold and silver selected in pyrite fractions of the I generation and silicates and quartz-pyrite-mica carbonate intergrowths of II generation

Мінеральні фракції	Au	Ag
	%, у перерахунку на масу фракції	
Пірит, I генерація	90,5	85,2
Силікати	0,2	10,3
Кварц-пірит-слюдисто-карбонатні зростки, II генерація	9,3	4,5
Σ	100	100

Крупність мінералів-носіїв золота (піриту і арсенопіриту) змінюється дискретно, а розкриття зростків відбувається у два етапи — для матеріалу сульфідно-кварц-карбонатних прожилків на рівні 1—0,5 мм і для основної маси породи у класах крупності $-0,1...+0,071$ мм. Повне розкриття зростків відбувається у класі $-0,071...+0,041$ мм. У результаті вивчення монофракцій встановлено, що сульфідні з кварц-карбонатних прожилків мають нижчий вміст золота, ніж сульфідні, які знаходяться в основній масі породи.

Основний мінерал-носіє золота — пірит — утворює кристали та зростки кристалів (3,0—0,1 мм). Форма кристалів — куби, пентагондодекаедри, кубооктаедри, октаедри. Пірит представлений двома генераціями — крупно- та дрібнозернистий. Крупнозернистий пірит утворює суцільні маси, прожилки та вкрапленість у кварці, а дрібнозернистий — суцільні маси у зростаннях із карбонатами, кварцом і слюдами.

Зростки відмічені двох типів, переважно — кварц і пірит у пропорції 60—90 % кварцу і 10—40 % піриту. Це перша генерація (I). Менша частка зростків складена піритом, кальцитом, біотитом, серицитом і глинистими мінералами. Ці зростки віднесені нами до другої генерації (II), вони заповнюють тріщини в породі, складені кварц-піритовими зростками.

Для уточнення розподілу мінералів-носіїв золота і срібла було здійснено відбір мономінеральних і однотипових фракцій. У результаті виділено: фракцію крупнозернистого піриту I генерації; зростки сульфідів із кварцом, біотитом і карбонатами — II генерація, а також зростки кварцу та інших силікатів із кальцитом без піриту.

Аналіз фракції крупнозернистого піриту показав, що в ній зосереджено понад 90 % золота. Таким чином, це дослідження підтвердило висловлене раніше припущення, що практично все золото, яке знаходиться в руді, пов'язано саме із I генерацією піриту. Золото знаходиться як у зв'язаному (в піриті), так і у вільному стані, вірогідно, у проміжках між зернами піриту, або піриту і кварцу. Аналіз концентратів флотації з високим вмістом піриту I генерації показав у ній і високий вміст срібла.

Фракція зростків кварцу та інших силікатів з карбонатами без піриту була проаналізована на вміст золота та срібла. Було встановлено, що в ній золото практично відсутнє, а срібла значно менше, ніж у вихідній руді.

Додатково було проаналізовано силікати, в яких визначено найнижчий вміст благородних металів.

Друга генерація, представлена зростками дрібнозернистого піриту, кварцу, біотиту і карбонатів, суттєво збіднена на благородні метали порівняно не тільки з I генерацією, але й із вихідною рудою (табл. 2).

Зіставлення даних розподілу піриту I генерації з вмістом золота у фракціях дає змогу припустити зв'язок золота з піритом (рис. 1), аналогічне зіставлення вмісту зростків піриту із кварцом зі вмістом срібла вказує на зв'язок срібла саме з цими зростками (рис. 2).

Розподіл золота за класами крупності загальною повторює розподіл піриту, за винятком класу $-0,044$ мм, де вміст піриту зростає, а вміст золота падає. Виходячи з цих даних, можна стверджувати, що золото генетично зв'язано з піритом. Падіння вмісту золота в класі $-0,044$ за зростання відсоткового вмісту піриту можна пояснити тим, що у руді пірит представлений двома генераціями — крупно- і дрібнозернистий. У класі $-0,044$ мм пірит є переважно дрібнозернистим і належить до II генерації. Вміст золота в піриті II генерації суттєво нижчий за вміст у крупнозернистому піриті I генерації.

Розподіл срібла корелює з розподілом зростків піриту з кварцом, тому ми передбачили, що срібло знаходиться не в самому піриті, а у проміжках між зернами піриту, кварцу й інших мінералів. Можливо, основна маса золота і срібла у дрібних класах потрапила туди за рахунок дроблення крупнозернистого матеріалу, а не за рахунок дезінтеграції дрібнозернистих зростків.

Виконаний експеримент, спрямований на виділення мінеральних фракцій, підтвердив ці ідеї та передбачення: пірит I генерації містить 90,5 % золота; силікати — 0,2 % і кварц-пірит-слюдисто-карбонатні зростки II генерації — 9,3 %. Розподіл срібла частково відрізняється від розподілу золота за фракціями: пірит I генерації містить 85,2 % срібла; силікати — 10,3 % і кварц-пірит-слюдисто-карбонатні зростки II генерації — 4,5 % (табл. 2). Вірогідно, це пов'язано з тим, що золото знаходиться у вільному і зв'язаному стані у піриті I генерації, а срібло в зростках кварцу та інших мінералів зв'язано з сульфідами. Максимальний вміст срібла так само, як і золота, знаходиться в класах крупності понад 0,1 мм.

Тому ми дійшли висновку, що підвищення вмісту золота і срібла у концентраті можна до-

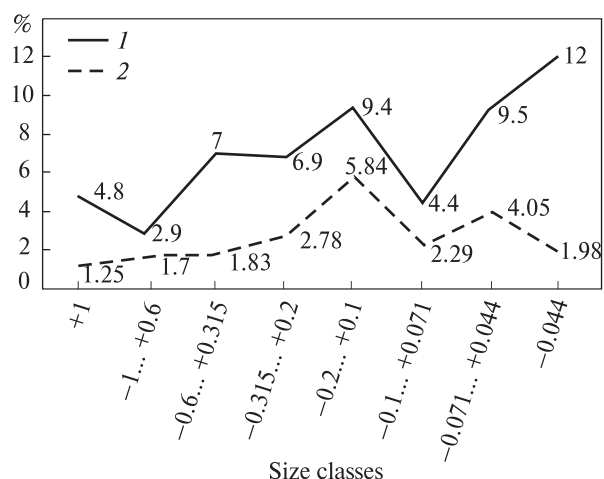


Рис. 1. Співвідношення вмісту золота і піриту в руді. Вміст: 1 — пірит, 2 — золото

Fig. 1. Content ratio between gold and pyrite in ore. Contents: 1 — pyrite, 2 — gold

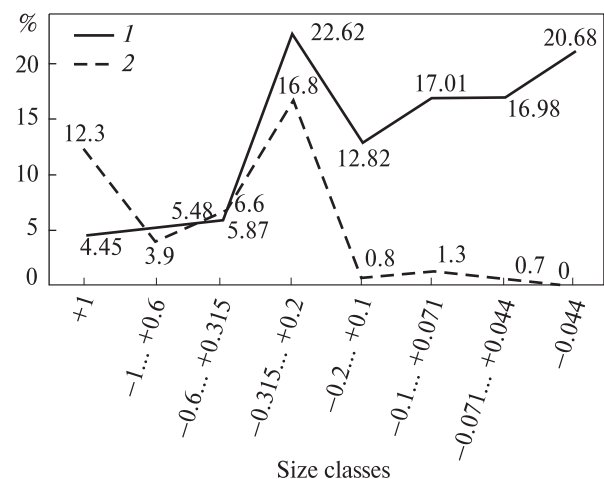


Рис. 2. Співвідношення вмісту в руді кварц-піритових зростків із вмістом срібла в руді. Вміст: 1 — зростків піриту з кварцом, 2 — срібла

Fig. 2. Content ratio between silver and quartz-pyrite intergrowths in ore. Contents: 1 — quartz pyrite intergrowths, 2 — silver

могтися, залучаючи у процес збагачення максимально можливі крупні класи, оскільки повне розкриття зростків відбувається вже у класі крупності понад 0,1 мм. Цей висновок був згодом підтверджений низьким вмістом золота і срібла у хвостах збагачення.

Таким чином, дослідження, які були обмежені тільки виконанням мінералогічного аналізу вихідної проби за класами крупності і вивченням монофракцій та однотипних за складом фракцій із визначенням золота і срібла у них, дали змогу чітко встановити мінерали-

носії корисного компонента. При цьому стало очевидним, що збагачення класу $-0,044$ мм через низький вміст золота в ньому є економічно недоцільним. У результаті була обрана найефективніша схема збагачення, яка одночасно дає можливість суттєво знизити вартість переробки руди завдяки скороченню процесу її подрібнення.

У родовищі Яндзекон (*Yangdzekon*) золоте зруденіння приурочене до карбонатної метаморфічної породи, яка містить кальцит, кварц і рудні мінерали. На золотовидобувній фабриці з переробки цих руд технологічний процес заснований на флотаційному методі збагачен-

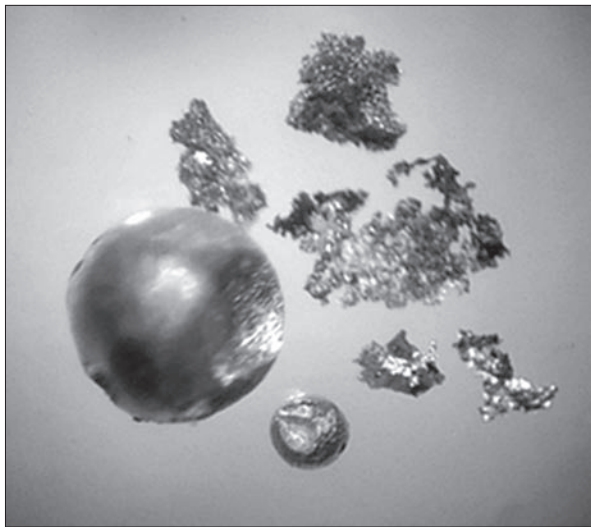


Рис. 3. Морфологія зерен золота, яке було вилучено шляхом розчинення гетиту і гідрогетиту із конкрецій, відібраних у крупних класах матеріалу проби

Fig. 3. Morphology of gold grains of sampled from goethite and hydrogoethite nodules by dissolution, selected from the large classes of sample material

Таблиця 3. Розміри і розрахована маса зерен золота, вилучених із конкрецій гетиту та гідрогетиту

Table 3. Sizes and calculated mass of gold grains, selected from goethite and hydrogoethite nodules

Зерна золота	Розмір, мм	Маса, мг
Пластини	$0,7 \times 0,4$	0,2
	$0,4 \times 0,2$	0,05
	$0,4 \times 0,2$	0,05
	$0,3 \times 0,3$	0,05
	$0,3 \times 0,10$	0,03
	$0,15 \times 0,10$	0,002
Кульки (діаметр)	0,60	2,0
	0,2	0,13

ня, який передбачає подрібнення руди до крупності $0,074$ мм.

Основними завданнями нашого технологічного дослідження тут були:

1 — збільшення вилучення золота у концентрат за наявною технологічною схемою;

2 — розробка оптимальної технологічної схеми з метою забезпечення максимально можливого вилучення золота з використанням ресурсоощадних і екологічно безпечних методів збагачення.

Для вирішення цих завдань було детально вивчено речовинний склад руд, особливості їхнього мінерального складу, технологічні властивості породоутворювальних мінералів.

У процесі аналізування відібраних монофракцій було встановлено, що основними золотовмісними мінералами є гетит, гідрогетит і магнетит, а також суміш цих гідратованих мінералів (лімоніт). З ними пов'язано 63 % золота. Золото, яке знаходиться в мінералах заліза, видиме, крупне (табл. 3). Конкреції гетиту і гідрогетиту мають розміри $0,03$ — $2,0$ мм. Зовнішній шар конкрецій представлений гетитом і гідрогетитом, а центральна частина утворена або кульками золота, або глинистим матеріалом із включеннями зерен кварцу і кальциту. У таких конкреціях золото знаходиться у вигляді ажурної плівки на межі між мінералами заліза та глинистими мінералами (рис. 3). Деяка частина золота, вірогідно, існує у вигляді дрібних зерен у зростках із землистими агрегатами лімоніту.

Наступними за значенням є сульфіди — пірит і арсенопірит, з якими пов'язано 37 % золота. Золото, пов'язане з сульфідами, є тонкодисперсним. Установити однозначно характер його входження в сульфіди на даному етапі досліджень не було можливим.

На основі вивчення особливостей технологічних властивостей мінералів із урахуванням технологічного процесу на діючому руднику ми розробили три схеми виконання лабораторних випробувань:

- флотаційно-гравітаційна схема із подрібненням руди до крупності 200 mesh;
- гравітаційно-магнітно-флотаційна схема із подрібненням руди до крупності 200 mesh;
- гравітаційно-магнітна схема зі стадійним подрібненням руди до крупності $0,5$ мм.

Перша і друга схеми були розроблені з метою покращення процесу збагачення руди, впровадженого на цій золотовидобувній фаб-

риці. Третя схема базована на принципово новому рішенні, яке суттєво здешевило процес збагачення руди і дало змогу відмовитися від флотації.

Зміст цих схем є таким. Перша та друга схеми припускали подрібнення руди до 200 *mesh* із застосуванням флотаційних і гравітаційних методів збагачення. При цьому друга схема передбачала здійснення магнітної сепарації. Уведення у процес збагачення гравітаційних методів і магнітної сепарації суттєво покращило показники вилучення та якість отриманих концентратів.

Однак найкращим рішенням, заснованим на результатах вивчення речовинного складу породи, була третя схема, гравітаційно-магнітна, з подрібненням руди до крупності 0,5 мм. Вона передбачала процеси стадійного подрібнення та гравітації з подальшою магнітною сепарацією хвостів гравітації. Ці технологічні операції допомогли одержати концентрат із вищим вмістом золота і вилученням у концентрат 85,27 % металу. Таким чином, із хвостами втрачається 14,73 % золота.

Виконані дослідження за цією гравітаційно-магнітною схемою збагачення руди, подрібненої до 0,5 мм, показали високу ефективність гравітаційного збагачення, яке дає змогу на початковій стадії отримати концентрат із високим вмістом золота і вилученням 41,46 %. А стадійне подрібнення хвостів гравітації до крупності –0,125 мм забезпечило одержання якісного концентрату із вмістом золота 37,48 %. Подальше подрібнення хвостів гравітації до крупності 0,074 мм дає можливість отримати гравітаційний концентрат, в якому міститься 2,82 % золота. За допомогою магнітної сепарації можна додатково вилучити 3,51 % золота.

Висновки. Багаторічні роботи з укладання технологічних схем збагачення, заснованих на ретельному мінералогічному й хімічному вивченні руд конкретних залізо- і золоторудних родовищ Китайської Народної Республіки дають змогу дійти таких висновків.

Розроблена схема переробки залізної руди Аньшаньського родовища характеризується простотою технічного рішення. На першому етапі це двостадійна магнітна сепарація з подрібненням і тонким грохоченням (класифікація). На другому етапі поєднання основної і контрольної гравітації дало змогу одержати і вивести з процесу значний об'єм залізорудного концентрату. У результаті отримані залізні

концентрати високої якості (TFe 65,2 %) із мінімальним вмістом шкідливих домішок — сірки і фосфору. Одержання вищих показників є можливим лише із використанням сучасного гравітаційного обладнання нового покоління — гвинтових шлюзів, шламових столів, центробіжних сепараторів.

Дослідження золотовмісної руди родовища Лінбао було обмежене у часі — для виконання робіт ми мали тільки 30 днів. Результати, отримані шляхом мінералогічного аналізування вихідної проби за класами крупності та монофракцій з визначенням вмісту золота і срібла у них, забезпечили встановлення мінералівності золота. Аналіз руди, виконаний із поділом на класи крупності, дав змогу поліпшити схему переробки руди, виключивши з циклу збагачення клас –0,044 мм через низький вміст золота в ньому. Запропонована схема збагачення руди виявилась значно ефективнішою й економічнішою за діючу.

Для золотовмісного родовища Яндзекон тільки з поточних хвостів флотації з використанням гравітаційного та магнітного методів збагачення можна забезпечити скорочення втрат золота на 20–30 %. Ми впевнені, що подальші крупнооб'ємні технологічні випробування корінних руд і відходів їх збагачення сформують підстави для розробки екологічно чистої, ресурсоощадної, економічно ефективної технології збагачення. Вона повинна базуватись на запропонованій нами схемі, яка дає змогу повністю відмовитися від витрат на тонке подрібнення і шкідливі для довкілля та людини флотореагенти. Важливо, що завдяки таким дослідженням є можливими не тільки оцінка ступеня економічної вигоди у разі застосування розробленої схеми переробки руди, а й упровадження її у виробництво у найближчий час.

Основними нашими результатами є такі. Випробування, виконані на лабораторних пробах, показали реальну можливість оптимізації діючих технологічних процесів на залізорудних і золотовидобувних фабриках. Також отримано певні дані щодо необхідності переходу до наступного рівня випробувань — укрупнених (пілотних).

Проілюстровано й доведено надзвичайну важливість і перспективність вивчення особливостей мінерального складу руди, адже саме завдяки йому було чітко виявлено проблеми, які можуть виникати у процесі переробки кон-

кредитних руд. Визначення мінералів-носіїв корисного компонента, їхніх зростків із іншими мінералами, приуроченість до певних класів крупності, установлення підвищених концентрацій небажаних елементів є необхідним як для корегування технологічного процесу, так і для розробки нових технологій, передовсім для

забезпечення успішного виконання робіт із залучення до технологічного переділу важкозбагачувальних руд.

Автори вдячні за консультації й обговорення результатів різних етапів дослідження, а також тексту цієї статті канд. геол.-мін. наук І.Є. Палкіну.

ЛІТЕРАТУРА

1. Гинзбург А.И., Кузьмин В.И., Сидоренко Г.А. Минералогические исследования в практике геологоразведочных работ. М.: Недра, 1981. 237 с.
2. Изоитко В.М. Технологическая минералогия и оценка руд. СПб.: Наука, 1997. 582 с.
3. Палкин И., Палкина Е., Ван Шоулунь. Главные этапы минералогических исследований при проведении лабораторных и пилотных испытаний золотосодержащих, полиметаллических и марганцевых руд (на примере месторождений КНР). *Минералогія: сьогодні і майбуття. Матеріали VIII наук. читань ім. акад. Є. Лазаренка (Львів-Чинадієве, 11–14 верес. 2014 р.)*. Відп. ред. О.І. Матковський. Львів: Вид-во Львів. нац. ун-ту, 2014. С. 128–132.
4. Палкина Е.Ю. Некоторые вопросы изучения минерального состава труднообогатимых руд. Актуальные проблемы геологии, прогноза, поисков и оценки месторождений твердых полезных ископаемых. Судакские геологические чтения. *Материалы междунар. науч.-практ. конф. (Симферополь-Судак, 17–23 сент., 2012 г.)*. Киев: Академперіодика, 2012. С. 131–133.
5. Пирогов Б.И. Современные проблемы технологической минералогии. *Технологическая минералогия, методы переработки минерального сырья и новые материалы*. Петрозаводск: Карельский науч. центр РАН, 2010. С. 7–23.
6. Технологическая оценка минерального сырья. Опробование месторождений. Характеристика сырья: Справ. Ред. П.Е. Остапенко. М.: Недра, 1990. 272 с.

Надійшла 16.10.2019

REFERENCES

1. Ginzburg, A.I., Kuzmin, V.I. and Sidorenko, G.A. (1981), *Mineralogical studies in the practice of exploration*, Nedra, Moscow, RU, 237 p. [in Russian].
2. Isoitko, V.M. (1997), *Technological mineralogy and ore evaluation*, Nauka, St. Petersburg, RU, 582 p. [in Russian].
3. Palkin, I., Palkina, E. and Wang, Shoulun (2014), *Materialy 8 nauk. chytan' im. akad. Ye. Lazarenka, Lviv-Chinadiyevе, 11-14 veres. 2014*, in Matkovskiy, O.I. (ed.), I. Franko Lviv Univ., UA, pp. 128-132 [in Ukrainian].
4. Palkina, E.Yu. (2012), *Materials of the Intern. sci. and practical conf., Simferopol-Sudak, Septem. 17-23, 2012*, Akademperіodyka, Kyiv, UA, pp. 131-133 [in Russian].
5. Pirogov, B.I. (2010), *Modern problems of technological mineralogy. Technological mineralogy, mineral processing methods and new materials*, Karelian Sci. Center of Russian Academy of Sci., Petrozavodsk, RU, pp. 7-23 [in Russian].
6. Ostapenko, P.E. (ed.) (1990), *Technological evaluation of mineral raw materials. Field testing. Characteristics of raw materials: Handbook*, Nedra, Moscow, RU, 272 p. [in Russian].

Received 16.10.2019

Зинь Ченгуй¹, Ван Шоулунь¹, Е.Ю. Палкина²,
Т.Д. Поддубная³, В.В. Иванисов³

¹ Синостил. Тяньцзиньская геологическая академия Ко., Лтд
300061, г. Тяньцзинь, Китайская Народная Республика, пр-т Юи, 42
E-mail: jingcg@sinosneel.com, wangsholun@sohu.com

² Украинское минералогическое общество
03142, г. Киев, Украина, пр-т Акад. Палладина, 34
E-mail: e_leyka@ukr.net

³ Академия горных наук Украины
50002, г. Кривой Рог, Украина, ул. Пушкина, 37
E-mail: poddub.t@gmail.com, ivaniso-v@gmail.com

ЗНАЧЕНИЕ МИНЕРАЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ И УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕРАБОТКИ РУД (НА ПРИМЕРЕ МЕСТОРОЖДЕНИЙ КИТАЯ)

Совместные исследования коллектива лаборатории обогащения минерального сырья Тяньцзиньской геологической академии (ТГА, Китайская Народная Республика) и украинских ученых продолжались более двух десятилетий с целью разработки эффективных методов обогащения различных видов минерального сырья — золотосодер-

жащих, полиметаллических, железных и марганцевых руд ряда месторождений КНР. Эти исследования показали реальную возможность оптимизации действующих технологических процессов переработки руд. В последние четыре года работы проводились на материале месторождений железа и золота. Для переработки железной руды Аньшаньского месторождения было предложено комплексное технологическое решение, основанное на применении магнитной сепарации, классификации и гравитационных методах переработки руды. В результате получен железный концентрат высокого качества с минимальным содержанием вредных примесей. Для золотосодержащих руд месторождения Яндзекон были предложены схемы технологической переработки, сокращающие потери золота на 20—30 %. Авторы уверены, что последующие крупнообъемные технологические испытания коренных руд и отходов их обогащения позволят полностью отказаться от затрат на тонкое измельчение и флотореагенты и, в результате, разработать экологически чистую, ресурсосберегающую и экономически эффективную схему обогащения. Главное достижение этих исследований — возможность в ближайшее время внедрить разработанные схемы переработки руд в производство.

Ключевые слова: обогащение минерального сырья, окисленные железные руды, золотосодержащие руды, технологическая переработка, отходы обогащения, ресурсосберегающие технологии.

Jing Chenggui¹, Wang Shoulun¹, O.Yu. Palkina²,
T.D. Poddubna³, V.V. Ivanisov³

¹ Sinosteel. Tianjin Geological Academy Co., Ltd
42, Youyi Road, Tianjin, China, 300061
E-mail: jingcg@sinosneel.com, wangsholun@sohu.com

² Ukraine Mineralogical Society
34, Acad. Palladin Ave., Kyiv, Ukraine, 03142
E-mail: e_leyka@ukr.net

³ Academy of Mining Sciences of Ukraine
37, Pushkin Str., Kryvyi Rig, Ukraine, 50002
E-mail: poddub.t@gmail.com, ivanisov-v@gmail.com

IMPORTANCE OF MINERALOGICAL RESEARCHES FOR THE DEVELOPMENT AND IMPROVEMENT OF ORE PROCESSING TECHNOLOGY (CHINA DEPOSITS AS AN EXAMPLE)

Joint studies between the Mineral Raw Materials Laboratory of the Tianjin Geological Academy (TGA, People's Republic of China) and Ukrainian scientists were carried out more than two decades and aimed at development of effective ore-dressing methods for various types of mineral raw materials – gold, polymetallic, iron and manganese ores from a number of Chinese deposits. The studies have shown a real potential for optimization of the existing technological processes of ore dressing. During the last four years, iron and gold deposits have been studied. A comprehensive technological solution based on application of magnetic separation, classification and gravitational methods was proposed for ore dressing of iron ore from the Anshan deposit. As a result, high-grade iron concentrates with minimal content of harmful impurities are obtained. Technological processing schemes which reduce the loss of gold by 20–30 % are proposed for gold ore from the Yangdzekon deposit. The authors are confident that further large-scale technological tests of primary ores and their waste enrichment will completely eliminate the costs of fine grinding and flotation reagents. As a result, environment-friendly, resource-saving and cost-effective enrichment scheme will be developed. The main achievement of these studies is the possibility of industrial commissioning of the developed ore processing schemes for in the near future.

Keywords: mineral enrichment, oxidized iron ores, gold ores, processing, enrichment waste, resource-saving technologies.