

Т.А. ОЛІЙНИК, д-р техн. наук,

Л.В. СКЛЯР, канд. техн. наук, **М.О. ОЛІЙНИК**

(Україна, Кривий Ріг, Державний ВНЗ "Криворізький національний університет")

ДОСЛІДЖЕННЯ УМОВ СЕЛЕКТИВНОГО РУЙНУВАННЯ МІНЕРАЛЬНИХ КОМПЛЕКСІВ ПРИ ЗБАГАЧЕННІ ГЕМАТИТ-ІЛЬМЕНІТОВИХ РУД

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями

Сучасний стан мінерально-сировинної бази країни й об'єктивно сформовані тенденції розвитку металургійного виробництва зумовлюють необхідність створення та широкого застосування технологій для комплексного й більш повного вилучення корисних компонентів у процесах переробки рудної сировини. Ефективність процесу збагачення залежить від того, наскільки повно при рудопідготовці вдалося забезпечити розкриття видобутих мінералів при мінімальному їх переподрібненні. Особливо ця проблема актуальна для складних полікомпонентних титанових руд, що відрізняються не тільки складністю речовинного складу, але й нерівномірною вкрапленістю та крупністю корисних компонентів, тісним взаємним проростанням цінних і породоутворюючих мінералів. Організація маловідходних технологій переробки мінеральної сировини пов'язана з вибіркоким руйнуванням. Не є винятком і титанова галузь України, при розвитку якої не менш важливо розв'язувати питання не тільки комплексності використання сировини, але й розширення сфери впливу України у світі за рахунок розроблення технологій збагачення комплексних титанових руд корінних родовищ як власних, так і світових. Тому розроблення технологій направлено селективного руйнування мінеральних комплексів унаслідок температурно керованих окислювальних реакцій зі зміненням магнітних властивостей рудних мінералів, що призведе до підвищення ефективності магнітного збагачення складних полікомпонентних титанових руд, є актуальним науково-практичним завданням.

Аналіз досліджень і публікацій

Практика руйнування руд показує, що лише невелика частина витраченої на руйнування енергії перетворюється в корисну роботу. Тобто для одержання необхідного гранулометричного складу руди обмін енергією між джерелом і тілом, що руйнується, не завжди здійснюється адекватно поставленому завданню.

Так, лише 0,5-2% енергії вибуху при видобутку руд витрачається на утворення нових поверхонь руйнування [1], при подрібненні руд ця частка ще менша.

Розкриття мінералів – це результат послідовних трансформацій зовнішніх деформацій у складну структуру напружено-деформованого стану між мінералами, що зрештою утворюють поверхню руйнування. Буде це розкриття селективним чи ні, залежить від того, наскільки параметри напруження сприятимуть створенню зсувного або розтягуючого напруження на міжкристалічних поверх-

Підготовчі процеси збагачення

нях розділення мінералів, що розкриваються, а величина енергії зовнішніх деформацій відповідатиме рівню "необхідності й достатності" для формування переважно міжкристалічних тріщин. Остання умова пов'язана з енергетичною теорією зростання тріщин: при недоліку енергії тріщина просто не буде рости, а надлишок енергії призведе до неконтрольованого зростання безлічі тріщин, у тому числі й транскристалічних [2].

Для реалізації селективного руйнування важливі не стільки власне фізико-механічні властивості мінералів, скільки їх співвідношення, особливо співвідношення міцності меж зрощення мінералів, що контактують.

Ураховуючи багатоступінчастий характер дезінтеграції титанових руд корінних родовищ і неоднорідність розподілу мінералів в об'ємі, структуру руди можна представити у вигляді деякої масштабної ієрархії: системи взаємозв'язаних структурних елементів різного масштабного рівня. Будь-який структурний елемент руди є елементом масштабної ієрархії: кожен елемент нижчого рівня, простіше за рудне тіло за текстурою та структурою, не відтворює всі його властивості й у той же час є його складовою частиною. Такий підхід дозволяє розглядати руду у вигляді неоднорідного утворення об'ємом V , що складається з випадково розподілених у просторі мікронеоднорідностей об'ємом V_1 . Причому, ці об'єми можуть відрізнятися як розмірами, так і структурою. Прикладами подібних областей у руді, наприклад, можуть слугувати структурні елементи розкриття з деяким набором і розміром мінеральних компонентів, які є об'єктом розкриття й вилучення. Відповідно до механіки руйнування твердих тіл, характер руйнування багатокомпонентних матеріалів визначається розподілом напруження в структурних елементах відповідного масштабу (рівня), і результат руйнування залежить як від структури тіла, що руйнується, так і від умов навантаження (деформації). Відповідно до законів руйнування гетерогенних матеріалів, руйнування на кожному структурному рівні відбувається при появі в тому або іншому елементарному об'ємі розтяжного (чи зсувного) напруження, що перевищує деякий поріг для цього структурного елемента.

Під селективним руйнуванням, що включає дезінтеграцію матеріалу при дробленні або подрібненні, прийнято розуміти виборчу (цілеспрямовану) та керовану зміну розмірів, форми об'єкта або фізичне розділення компонентів на окремі складові [3-5].

Селективне розкриття припускає звільнення мінералів переважно за межами їх зрощення та збереження початкового гранулометричного складу або ж звільнення мінералу від сторонніх включень, що містяться в ньому, при руйнуванні мінералу-матриці знову ж таки по межах розділення. Порушення будь-якого з цих умов може свідчити про неселективне або неповне селективне руйнування. Слід зазначити, що в силу величезної структурної різноманітності руд ідеальне селективне розкриття (у його теоретичному розумінні) – рідкісне явище, тому на практиці можна говорити лише про міру наближення до ідеального результату [6, 7].

Кероване руйнування може мати декілька напрямів: або вибір режимів механічної дії на кожному рівні структурної ієрархії відповідно до властивостей

Підготовчі процеси збагачення

структурного елемента розкриття; або дії на матеріал зовнішніх фізичних полів: теплових, магнітних, електричних, електромагнітних та інших, або їх комбінацію з механічним руйнуванням. Зрештою, завдання попередньої дії зовнішніх полів повинне зводитися до знеміцнення або меж зрощення мінералів, або до знеміцнення мінералів вміщуючих порід.

Підвищити енергоефективність переробки титановмісних руд корінних родовищ можна за рахунок використання технології направленою селективного руйнування полімінеральних комплексів шляхом дії високих температур для розміщення меж зрощувань мінералів унаслідок прискореної дифузії атомів різних мінералів до цих меж. При цьому селективне (кероване) руйнування є процесом послідовного перетворення початкової структури тіла, що руйнується, до індивідуальних фракцій, шляхом спрямованого формування й розвитку мікро– та макротріщин у її різних елементах на відповідних структурних рівнях.

Постановка задачі

Тому в якості основної мети проведених досліджень є розробка технології селективного руйнування мінеральних комплексів при збагаченні гематит-ільменітових руд корінних родовищ.

Викладення матеріалу та аналіз результатів досліджень

На технологічні дослідження, з метою перевірки технологій збагачення, направлено технологічні проби ЕТ-1 та ЕТ-2 корінної гематит-ільменітової руди родовища Абу-Галага, як модельної. Аналіз мінерального складу показав, що ільменіт має пластинчасто-тонкі нановключення гематиту – 31,53 об.%, розміром, що вимірюється одиницями мікрометрів [8]. Більш того, ці включення носять переривчастий характер, субпаралельне орієнтування та різну густоту – все це характеризує сировину таку, що важко розкривається, тобто в процесі механічного руйнування одержати моноуламки ільменіту і гематиту важко – істотна частина уламків ільменіту буде "засмічена" включеннями гематиту навіть при дуже малих розмірах. Це висновок обґрунтовано тим, що навіть пластина завтовшки 0,005 мм для свого розкриття вимагає зменшення крупності руйнування мінімум, як удвічі, тобто до 0,0025 мм і менше. Вивільнення гематитових включень утруднено також відсутністю ослаблених зон на межі розділення "гематит-ільменіт". Пов'язане це з природою формування комплексного гематит-ільменітового рудного включення в породу. У руді також встановлено наявність домішкових елементів: кремнію, сірки, фосфору, магнію, хрому, сконцентрованих у силікатах типу олівіну, піроксену й актиноліту – 16,4%, а також плагіоклазу – 8,2%. Сірка сконцентрована в мінералах-сульфідах (пірит, халькопірит, піротин), вміст яких – 7,5%. Частина нерудних мінералів представлена у вигляді тонких включень у рудних зернах на рівні 0,002 мм.

Отже, розкрити тверду субстанцію "гематит-ільменіт" з пластинчастою вкрапленістю гематиту механічними методами практично неможливо. Тому в технології рудопідготовки запропоновано застосовувати високотемпературну

Підготовчі процеси збагачення

обробку (ВТО) сировини.

З вихідних проб було відібрано по п'ять наважок. Кожна наважка піддавалася ВТО при температурі 1000 °С протягом різного часу – 10, 20, 30, 40, 60 хвилин. Дослідження процесу високотемпературної обробки ільменіт-гематитової руди виконували з використанням муфельної печі з автоматичним терморегулятором і таймером часу та аналітичних вагів.

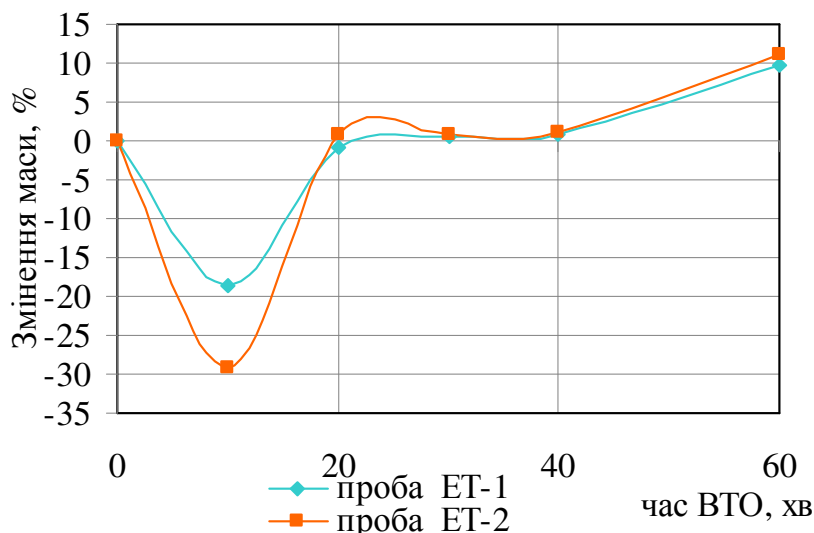


Рис. 1. Змінення маси руди в процесі ВТО

При проведенні досліджень знято термограми процесів ВТО гематит-ільменітової руди. ВТО проводилася на повітрі при нагріванні до 1000°C зі швидкістю 10 град/хв. Потім знімали кінетику ВТО, витримуючи проби руди 10, 20, 30, 40, 60 хвилин. Результати досліджень наведено на рис. 1. Для підтвердження результатів досліджень було виконано серію експериментів витримки проб вихідної руди в печі при температурі 1000 °С протягом 60 хвилин.

Збільшення маси зразків визначається окисленням заліза Fe^{2+} до Fe^{3+} . Результати дериватографічних досліджень окислення ільменіту дозволяють кількісно розрахувати ступінь окислення $\alpha_{ок}$ залежно від температури. З урахуванням цього результату розрахунку, ступені окислення наведено на рис. 2. Як бачимо, ільменіт з помітною швидкістю починає окислюватися при температурах близько 400 °С, а при ≈ 1000 °С ступінь окислення близький до 100%. При дії температур понад 800 °С у результаті дифузії іонів індивід ільменіту виникає як єдиний, який захоплює своєю кристалічною решіткою тривалентне залізо. Підвищення температура призводить до незворотного входження окисного заліза в решітку ільменіту. Цей процес можливий, виходячи з правил кристалохімії (заміщення титану й закисного заліза окисним залізом).

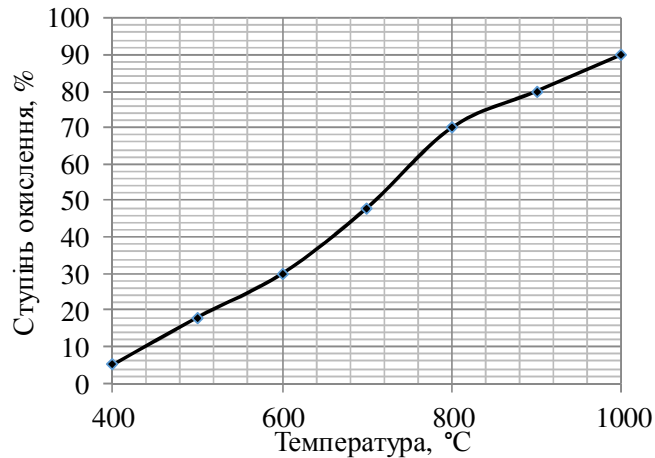
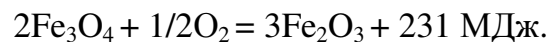


Рис. 2. Залежність ступеня окислення ільменіту від температури

Хімічний аналіз проб після ВТО показав, що в результаті дії високих температур утворюється змінений ільменіт, який є основною мінеральною фазою поряд з гематитом, магнетитом і псевдобрукітом. Середню емпіричну формулу зміненого ільменіту визначено за допомогою хімічного аналізу: $(\text{Fe}_{1,080}\text{Mg}_{0,129}\text{Mn}_{0,004}\text{Cr}_{0,002}\text{V}_{0,002})\text{Ti}_{0,890}\text{O}_3$. Вона близька до вихідної формули ільменіту в руді. При цьому в зерна ільменіту перейшла більша частина марганцю й магнію, а сліди ванадію та хрому присутні в основному через наявність остаточних крихітних включень гематиту.

Збільшення маси зразка визначається не тільки окисленням Fe^{2+} до Fe^{3+} , які присутні в ільменіті, а й окисленням магнетиту до гематиту, що супроводжується помітним виділенням тепла:

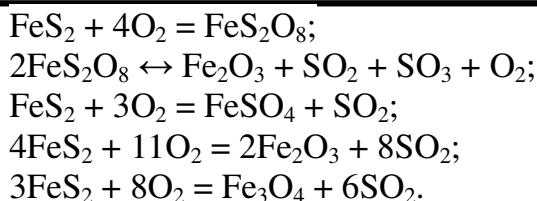


Зменшення маси зразка викликане видаленням сірки й окисленням піриту.

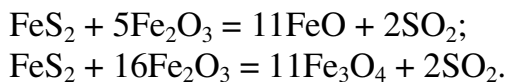
При порівнянні мінерального складу проб до і після високотемпературної обробки виявлено присутність магнетиту в рудних мінералах у пробах після ВТО, поодинокі зерна якого були у вихідній руді. Установлено, що кількість магнетиту в пробі 1, залежно від часу витримки в печі, коливається від 8,2 до 10,03% і від 4,18 до 4,75% у пробі 2. Магнетит, який утворився в межах мінеральних матриць "ільменіт-гематит" у результаті окислення піриту, має емпіричну формулу: $(\text{Fe}_{0,968}\text{Cr}_{0,010}\text{Ti}_{0,007}\text{Mg}_{0,004}\text{V}_{0,003}\text{Al}_{0,003}\text{Ni}_{0,002})_3\text{O}_4$. Крім цього, нові мінеральні форми магнетиту після ВТО можна розглядати як твердий розчин між чистим магнетитом і мінералом, що має структуру шпінелі. До останніх відносимо магнезіоферит MgFe_2O_4 , ульвошпінель FeTi_2O_4 , герцініт FeAl_2O_4 , коулсоніт FeV_2O_4 , ферит марганцю MnFe_2O_4 , ферит нікелю NiFe_2O_4 та ферит кобальту CoFe_2O_4 , елементи яких в малих кількостях присутні у вихідній руді.

Появу магнетиту в пробі обґрунтовано реакцією окислення піриту. У присутності кисню при температурах 850-1050 °C відбуваються такі реакції окислення піриту:

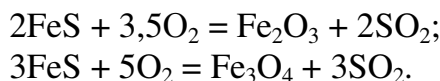
Підготовчі процеси збагачення



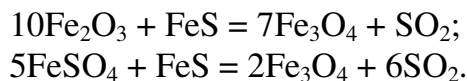
Далі відбувається взаємодія піриту з продуктами його окислення:



При цьому сульфід заліза (II) окислюється до оксиду заліза (III) або магнетиту:

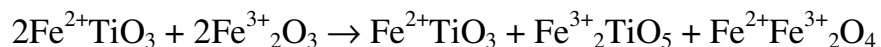


Утворення останнього можливе за реакціями:



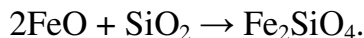
При цьому розкладання піриту може, з одного боку, сприяти виникненню переважно гематитових облямівок (периферійні зони), а з іншого – привести до утворення в центральних частинах рудних включень магнетиту, збагаченого титаном.

Поява останнього може відбуватися за такою схемою:

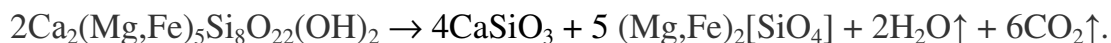


За рахунок окислення сульфідів при ВТО кількість сірки з руди видалено до мінімуму: з 0,32 до 0,000008%.

Крім утворення в змінених пробах магнетиту, у них відзначається збільшення силікатів: у пробі 1 на 6,75-10,53%, у пробі 2 – на 3,99-4,69%, за рахунок утворення силікатів з актиноліту та фаяліту, який є немагнітним, унаслідок дифузії катіонів заліза при високих температурах:



Відсутність актиноліту в пробах пояснюється тим, що актиноліт при температурі понад 850°C термічно розкладається за реакцією:



Підготовчі процеси збагачення

У результаті мінералогічного аналізу проб встановлено, що:

1. Навколо рудних зерен (рис. 3) виникають декрепітаційні облямівки (периферійні зони розтріскування). Мінеральний склад таких облямівок представлено сумішшю "ільменіт + гематит" з переважанням гематиту; товщина самих облямівок, а також кількість гематиту в них збільшуються зі збільшенням часу витримки проби при ВТО.

2. Центральні частини рудних зерен не схильні до розтріскування (рис. 3). Однак, зміни вони теж зазнали: не виявлено гематитових пластинчастих включень, які є типовими для вихідної руди. Ймовірно, гематит розпадається й рудні включення виглядають гомогенно. Як виняток у них спостерігаються рідкісні реліктові залишки гематиту. Після ВТО зерна гематиту можна описати формулою: $(\text{Fe}_{0,791}\text{Ti}_{0,135}\text{Mg}_{0,024}\text{V}_{0,005}\text{Cr}_{0,004}\text{Al}_{0,0035}\text{Mn}_{0,001})_2\text{O}_3$.

3. Включення гемоільменіту вихідної руди без домішки піриту, після ВТО дають суміш ільменіту, псевдобрукіту і магнетиту. Емульсійні виділення псевдобрукіту відзначено в руді після ВТО протягом 60 хвилин.

4. Уламки силікатів (олівін, піроксен) зазнають часткового окислення й набувають червонуватого (розвиток на поверхні уламка дисперсного гематиту) і бурого (розвиток дисперсного гематиту) відтінку. Уламки плагіоклазу та кварцу набувають рожевого й жовтуватого відтінку, що обумовлено наявністю в цих мінералах мікродомішок заліза у вигляді самостійної фази.

5. Відбувається змінення текстури руди через утворення мережі зародкових тріщин усередині нанозростків, а також відбувається змінення структури руди за рахунок гомогенізації вихідних рудних включень та утворення нових мінеральних фаз (гематиту, магнетиту, ільменіту, псевдобрукіту, фаяліту та інших).

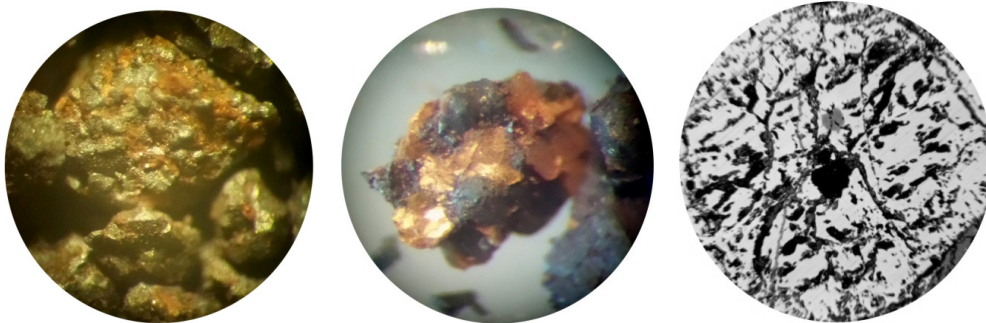


Рис. 3. Мінеральні комплекси гематит-ільменітової руди після ВТО

6. Під час ВТО більшість плагіоклазів і польового шпату, поряд зі слюдою флогопіту і шпінеллю залишаються в новому продукті, про що свідчить їх емпірична формула після ВТО: $\text{Na}_{0,515}\text{Ca}_{0,450}\text{K}_{0,480}\text{Si}_{2,575}\text{Al}_{1,414}\text{O}_8, \text{K}_{0,965}(\text{Mg}_{2,013}\text{Fe}_{0,484})\text{Si}_{2,712}\text{Al}_{1,384} \text{O}_{10}(\text{OH}_{0,927})_2$.

7. При високотемпературній обробці гематит-ільменітової руди відбувається прискорена дифузія атомів різних мінералів до площин зрощувань і меж концентрацій локальних дефектів, перекристалізація зерен та гомогенізація рудних включень. Це підтверджують результати мікрозондового аналізу та міцнісні характеристики сировини після ВТО.

Збагачення корисних копалин, 2015. – Вип. 60(101)

Підготовчі процеси збагачення

На наступному етапі було проведено експерименти з розкриття новоутворених мінеральних зростків. Результати експериментів наведено на рис. 4. Аналіз результатів експериментів розкриття змінених мінералів обох проб показав ідентичність одержаних результатів: зі збільшенням часу коефіцієнт розкриття мінералів збільшується, залежно від мінералу та часу подрібнення, з 12-22% (вихідна руда) до 92-99% (при 40 хв). Подальше подрібнення продуктів не доцільне, оскільки призводить до утворення великої кількості шламових частинок.

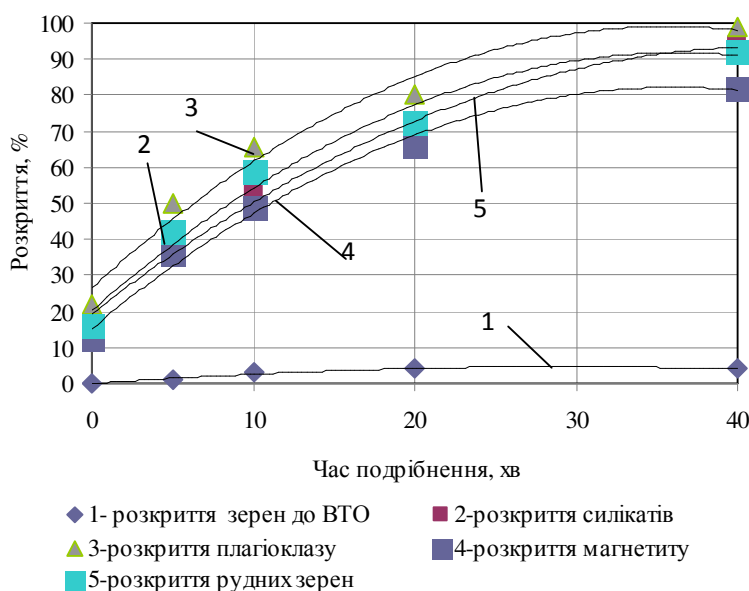


Рис. 4. Зрівняльна кінетика розкриття мінералів до та після високотемпературної обробки (ВТО)

При порівнянні результатів подрібнення вихідної руди до та після ВТО слід зазначити, що розкриття мінералів на рівні 12-22% ми не одержали у вихідній руді навіть при часі її подрібнення понад 7 годин 48 хвилин. Результати подрібнення знеміщеної руди свідчать про те, що вона подрібнюється значно швидше за вихідну. Незалежно від режиму подрібнення, попереднє знеміщення руди забезпечує збільшення ефективності магнітного збагачення рудних мінералів у порівнянні зі збагаченням вихідної руди на 16,57-17,42% [9].

Пояснимо ці результати.

При підведенні енергії для руйнування у вигляді високих температур твердої розчини гематиту й ільменіту можуть утворювати комплекс, що формується, як було зазначено в розділі 1 за типом евтектичних структур. Залежно від умов подальшого розпаду та складу гомогенного невпорядкованого твердого розчину, виділяється одна або кілька впорядкованих фаз, що відрізняються за складом і структурою, або ж виникають проміжні фази, кристалічна решітка яких істотно відрізняється від структури материнської фази.

Характерними структурами розпаду при високотемпературній обробці є епітаксичні зрощення в ході високотемпературних процесів кристалізації. Усі

Підготовчі процеси збагачення

межі зрощення, які є об'єктом аналізу для селективного руйнування, сформовані в ході кристалоутворення шляхом наростання вторинного мінералу з розплаву або газової фази на первинний мінерал. При високотемпературній обробці руди родовища Абу-Галага – це утворення гематитових облямівок біля ядра ільменіту.

В агрегатах типу "гематит-ільменіт" при високих температурах між різними мінералами виникають когерентні границі. Атоми вздовж когерентних границь належать у рівній мірі обом сусіднім мінералам. Основна частка енергії межі зумовлена відхиленнями від рівноважних величин – відстаней між сусідніми атомами на межі. Додаткова, але менша частка енергії межі зумовлена незгодженістю в розташуванні інших і більш віддалених шарів атомів. Тому межа, що має більший кут, володіє більшою енергією, а двійникові межі та границі меж з когерентними фазами – меншою. З теорії поверхневих явищ [10] відомо, що потенційна енергія поверхні (поверхнева енергія) визначається різницею натягу біля меж мінералів (напруженістю міжмолекулярних сил). Зрозуміло, що при руйнуванні по поверхні зрощення мінералів ми повинні витратити таку енергію, яка як мінімум дорівнює поверхневій енергії цього утворення. Відмінність можна охарактеризувати величиною, що дорівнює різниці між енергією розриву та середньою енергією хімічного зв'язку.

Відомо, що при русі тріщини в її вершині при розриві зв'язку адіабатично виділяється тепло. Температура в цій зоні може досягати декількох сотень градусів. Виділення тепла створює термічні напруження, градієнт яких також визначає подальшу траєкторію тріщини. Звідси випливає, що внутрішні або зовнішні теплові потоки можуть стати істотним чинником керування ростом тріщини.

Закономірності квазістатичного й динамічного руйнування руди після високотемпературної обробки (ВТО) показують: фізична структура ієрархії нових комплексів така, що їх дезінтеграція здійснюється послідовно, починаючи з розриву нетривких зв'язків, ліквідації піриту, і практично не зачіпає на перших стадіях руйнування структурних елементів третього рівня ієрархії (блоки рудної речовини). В основі якості руди покладено структуру нової мінеральної матриці.

Висновки та напрямки подальших досліджень

Отже, аналіз результатів проведених експериментів довів наступне.

У гематит-ільменітових рудах селективне розкриття зростків забезпечується за рахунок попереднього зменшення зміцнення зв'язків у зонах контакту мінеральних включень "гематит-ільменіт" і нерудних мінералів унаслідок дії на мінеральну матрицю температур у межах 1000-1050°C. При цьому частина енергії витрачається не на утворення нової поверхні, а на створення мережі зародкових тріщин усередині нанозростків.

Підвищення ефективності збагачення гематит-ільменітових руд на 16,57-17,42% забезпечується за рахунок змінення текстурних, структурних та магнітних властивостей мінералів та утворення нових мінералів унаслідок тем-

Підготовчі процеси збагачення

пературно керованих окислювальних реакцій.

Установлено, що при ВТО гематит-ільменітової руди відбувається прискорена дифузія атомів різних мінералів до площин зрощувань і меж концентрацій локальних дефектів, перекристалізація зерен та гомогенізація рудних включень, що призводить до можливості досягнення при рудопідготовці ступеня розкриття рудних мінералів до 82,3% нерудних – до 98,8%.

Установлено, що внаслідок впливу на мінеральну матрицю "гематит-ільменіт" температур у межах 850-1050 °С відбувається змінення текстури руди через створення мережі зародкових тріщин усередині нанозростків та виникнення декрипітаційних облямівок гематиту, товщина яких збільшується з подовженням часу навколо рудних зерен ільменіту, що дозволяє при подальшому руйнуванні підвищити на порядок селективність розкриття зростків і зменшити час подрібнення руди в 7,8 раза.

Встановлено, що при температурі 850-1050 °С відбувається змінення структури руди за рахунок гомогенізації вихідних рудних включень та утворення нових мінеральних фаз (гематиту, магнетиту, ільменіту, псевдобрукіту, фаяліту та інших), які відрізняються магнітними властивостями, що дозволяє при застосуванні магнітної сепарації сировини після високотемпературної обробки знизити в концентратному продукті масову частку шкідливих елементів: оксидів кремнію, алюмінію та кальцію з 11,89 до 1,2% та підвищити масову частку оксиду титану з 32,3 до 37,6%, а заліза загального – з 33,86 до 42,29%.

Список літератури

1. Разрушение горных пород под действием взрыва / Под ред. Е.И. Ефремова. – К.: Наук. думка, 1987. – 264 с.
2. Селективное разрушение минералов / В.И. Ревнивцев, Г.В. Гапонов, Л.П. Зарогатский и др. / Под ред. В.И. Ревнивецова. – М.: Недра, 1988. – 286 с.
3. Хопунов Э.А., Шатайлов Ю.Л. Исследования влияния физико-механических свойств руд и минералов на селективность их раскрытия при шаровом измельчении // Обогащение руд. – 1984. – № 4. – С. 36.
4. Хопунов Э.А. Некоторые аспекты теоретических и экспериментальных исследований разрушения руд и раскрытия минералов // Уралмеханобр. Деп. в ЦНИИ Черметинформация. – 1986. – № 3558. – 90 с.
5. Хопунов Э.А., Ворончихин С.Л., Первухин А.В. Некоторые вопросы теории и практики селективного разрушения руд // Состояние и перспективы развития теории и практики обогащения руд черных металлов. – М.: Недра, 1987. – С. 99-108.
6. Пилов П.И., Титов А.А. Проблемы развития теории дезинтеграции полезных ископаемых и совершенствования подготовительных процессов обогащения // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. – 2006. – Вип. 25(66)-26(67). – С. 44-49.
7. Селективное раскрытие минералов / В.И. Ревнивцев, Э.А. Хопунов, Ю.Л. Шатайлов, и др. // XII Международный конгресс по обогащению полезных ископаемых. – Сан-Пауло, 1977. – 42 с.
8. Олейник М.О. Изучение технологических свойств минералов и полиминеральных включений "гематит-ильменит" коренных титаносодержащих руд // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. – 2013. – Вип. 56(97). – С. 53-67.
9. Олейник М.О. Повышение контрастности магнитных свойств титаносодержащих минералов руд коренных месторождений // Комбинированные процессы переработки минералов руд коренных месторождений // Збагачення корисних копалин, 2015. – Вип. 60(101)

Підготовчі процеси збагачення

рального сир'я: теорія и практика: Сб. науч. тр. – С-Пб., 2015. – С. 90-92.

10. Финкель В.М Физика разрушения. – М.: Металлургия, 1970. – 375 с

© Олейник Т.А., Скляр Л.В., Олейник М.О., 2015

Надійшла до редколегії 20.03.2015

Рекомендовано до публікації д.т.н. П.І. Піловим