

УДК 549:669.181.28

## ДЕЯКІ ОСОБЛИВОСТІ ОНТОГЕНІЇ ТЕХНОГЕННОГО МАГНЕТИТУ

С. Тиришкіна, В. Іванченко, Т. Нестеренко

*Криворізький технічний університет  
50002 м. Кривий Ріг, вул. Пушкіна, 44  
E-mail: evtekhov@mail.ru*

Наведено результати мікроскопічних досліджень морфології й анатомії кристалів магнетиту металургійного походження.

*Ключові слова:* магнетит, онтогенія, морфологічні різновиди, металургійний шлак, шлак, пил, техногенне мінералоутворення, Кривий Ріг.

Магнетит є одним з найпоширеніших природних мінералів. Він також кристалізується в умовах техногенного мінералоутворення, у тім числі в продуктах металургійного виробництва. Об'єктом дослідження стали шлаки і шлами металургійного комбінату ВАТ "Міттал Стіл Кривий Ріг". Спочатку їх складають у відвали і шламо-накопичувачі, а потім в обмежених обсягах використовують у виробництві агломерату. Шлаки попередньо збагачують магнітним способом для вилучення корольків заліза.

Проблема переробки вторинної металургійної сировини полягає у невідповідності її складу і властивостей вимогам агломераційного виробництва, розрахованого на спікання пухких природних руд і концентратів. Тому агломераційні фабрики значно обмежують споживання шламу і шлаку. Це приводить до надмірного накопичення невикористаних металургійних відходів і спричиняє численні екологічні проблеми.

Зазначимо, що у складі названих відходів є оксиди заліза, передусім магнетит. Природний магнетит використовують в агломерації як продукт збагачення залізистих кварцитів. Він також утворюється в агломерації як наслідок відновлення гематиту агломераційної руди. Тому нема технологічних обмежень щодо обсягів його використання у виробництві агломерату. Отже, додаткове вилучення й використання магнетиту дасть змогу значно збільшити використання металургійних відходів.

Магнетит – дуже поширений, але недостатньо вивчений мінерал металургійних продуктів. Не повністю досліджена онтогенія мінералу, взаємовідношення його індивідів і агрегатів з іншими рудними й нерудними складовими. Ці особливості мінералів повністю визначають їхні технологічні властивості й поведінку під час переробки та збагачення руд [2, 4, 5]. Виконані нами мікроскопічні дослідження частково висвітлюють генетичні ознаки цього мінералу, що сприятиме зростанню ефективності переробки техногенної сировини.

**Зародження** техногенного магнетиту має певні особливості. Більшість його кристалів зароджуються самовільно у масі розплавленого шлаку. Характер розподілу кристалів свідчить про утворення достатньо великої кількості центрів росту в об'ємі розплаву (рис. 1). Зародки кристалів у динамічних умовах металургійних

агрегатів рухалися, утворюючи сегрегації і зростки. На кінцевих етапах консолідації розплаву виникли видовжені скручені мікроліти й розгалужені сітчасті агрегати магнетиту (рис. 2). Наявність їх свідчить про швидке підвищення в'язкості та локальної напруженості середовища, зумовлене переходом шлаку до твердого стану після розвантаження його у відвал.

Простежується також зародження магнетиту й інших оксидів заліза на поверхні кристалів силікатів. Домінує вибіркоче зародження на уламкових зернах кварцу, які виникають унаслідок розтріскування індивідів тетрагонального  $\beta$ -кristобаліту під час поліморфного перетворення його у кварц, що супроводжується збільшенням об'єму кристалів [1]. Контакт магнетиту з названими мінералами чіткий, ясний.

Велика кількість центрів росту магнетиту виникає на поверхні розподілу рідкого шлаку і пухирців металургійних газів, достатньо насичених пиловими частками мікроскопічних розмірів (рис. 3). Гази, контактуючи з розплавом, помітно збільшують концентрацію кристалічних зародків магнетиту.

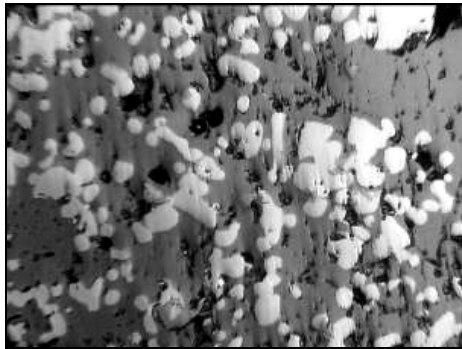


Рис. 1. Ізометричні зерна і гломерокристалічні зростки магнетиту (ясно-сіре) у силікатному склі (сіре). Шлак конверторного цеху. Полірований шліф.  $\times 200$ .

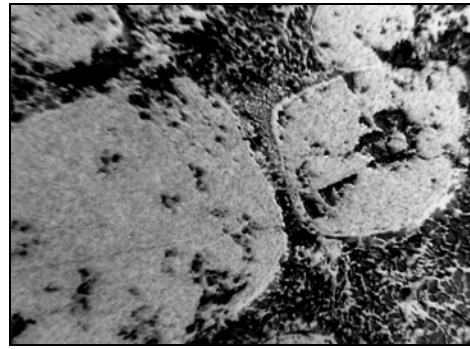


Рис. 2. Порфірові субевгедральні кристали і мікроліти магнетиту (ясно-сіре) у масі силікатного скла (чорне). Полірований шліф.  $\times 340$ .

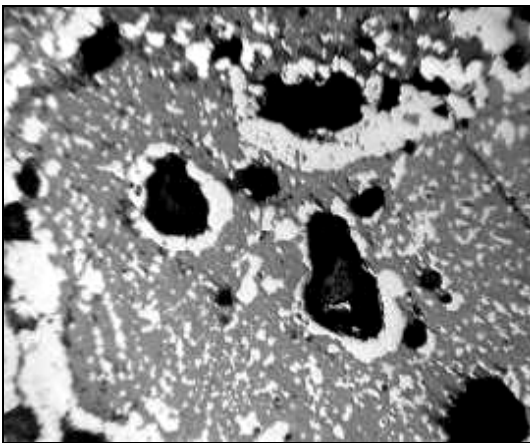


Рис. 3. Кристалізація магнетиту на поверхні газових порожнин. Шлак мартенівського цеху. Полірований шліф.  $\times 200$ .

Деякі кристали магнетиту зароджуються і ростуть у твердому середовищі (кристалах периклазу і шпінелі) шляхом їхнього заміщення (рис. 4). Оксиди магнію й алюмінію потрапляють у рідкий шлак унаслідок руйнування жаростійкого футерування металургійних апаратів або кристалізуються під час плавлення високомагнетизальної шихти [3]. Завдяки метасоматичному заміщенню вони поступово змінюють свій склад від центра до периферії зерен у послідовності периклаз→шпінель→герцинит→магнетит.

Магнетит утворюється також у разі високотемпературного окиснення заліза й успадковує від нього кулясту форму. Перехідною фазою між металом і магнетитом є вюстит. Тому виділення заліза у складі металургійних шлаків і шламів мають, зазвичай, зональну будову. В центральній частині міститься метал. Наступна зона складається з вюститу, а в периферійних ділянках утворюється магнетит (рис. 5).

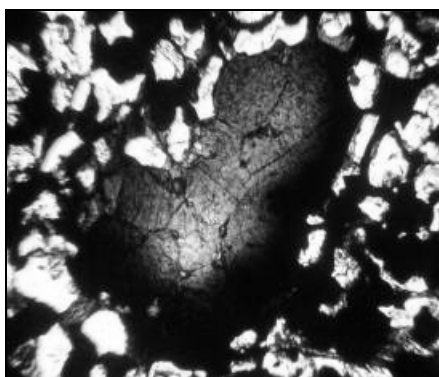


Рис. 4. Порфірове зерно шпінелі (сіре), частково заміщене магнетитом (чорне) у дрібнозернистій масі шлаку, яка складена з магнетиту й силікату кальцію (біле). Шлак мартенівського цеху. Прозорий шліф. Ніколі ||.  $\times 100$ .

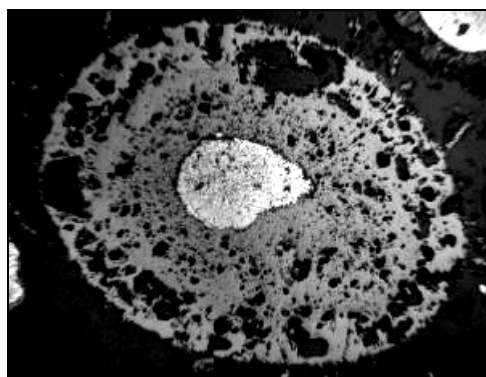


Рис. 5. Зональне рудне зерно, утворене (від центра до периферії): металевим залізом (біле), вюститом (темно-сіре) і магнетитом (сіре). Шлак конвертерного цеху. Полірований шліф.  $\times 235$ .

Не можна не брати до уваги також можливості ліквідаційного утворення кулястих форм магнетиту шляхом безпосередньої розкристалізації крапель збагаченого киснем залізного розплаву (рис. 6).

Зародження магнетиту відбувається також унаслідок розпаду твердих розчинів утворених раніше мінералів (рис. 7). Зі зниженням температури шлаку до  $570\text{ }^{\circ}\text{C}$  сформований на ранніх стадіях кристалізації розплаву вюстит розпадається з утворенням заліза й магнетиту [3]. Цей різновид магнетиту виникає за умов повністю консолідованого шлаку і є найпізнішим з виявлених зароджень мінералу. Порівняно з вюститом, новоутворені мінерали мають щільнішу структуру, тому навколо них в об'ємі консолідованого шлаку виникають порожнини.

**Ріст** техногенного магнетиту супроводжується утворенням субевгедральних, звичайно зональних індивідів (див. рис. 2). Заокруглені форми граней, ребер і вершин свідчать про часткове розплавлення кристалів, яке періодично змінювало процес росту. Внутрішня будова кристалів неоднорідна, з великою кількістю порожнин і включень девітрифікованого скла. Периферійна малопотужна зона, навпаки, має

вигляд щільної кірки, сформованої в умовах регенерації раніше частково розплавлених зерен магнетиту. На поверхні порфірових виділень і в масі силікатного скла утворюються короноподібні агрегати й мережа видовжених, переважно волокнистих мікролітів магнетиту, які спільно з силікатним склом завершують консолідацію шлаку.

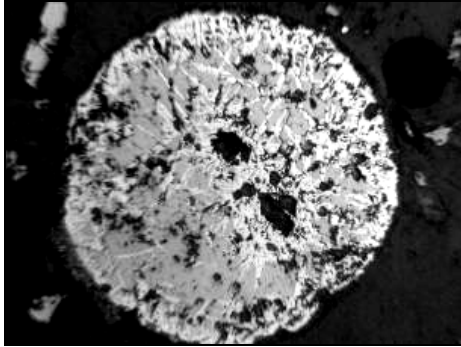


Рис. 6. Кулясте шлакове зерно, складене мартитизованим магнетитом. Полірований шліф.  $\times 180$ .

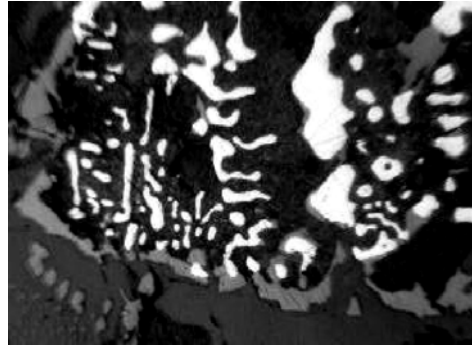


Рис. 7. Графічна структура, утворена внаслідок розпаду твердого розчину вюститу (темно-сіре) на магнетит (сіре) і залізо (біле); чорне – порожнини. Полірований шліф.  $\times 220$ .

Кристалізація на поверхні уламкових зерен приводить до утворення кількох морфологічних різновидів магнетиту: ідіоморфних октаедричних кристалів, кірок, друзок, дендритних агрегатів. Дендрити, а також скелетні кристали характерні для індивідів, самовільно зароджених в об'ємі розплаву. Вони асоціюють з силікатним склом, дендритами і звичайними кристалами олівіну, силікату кальцію й інших мінералів (рис. 8). Скелетний ріст порівняно великих порфірових кристалів магнетиту приводить до утворення футляроподібних індивідів. Порожнини в них виповнені дрібнозернистою основною масою шлаку (рис. 9).

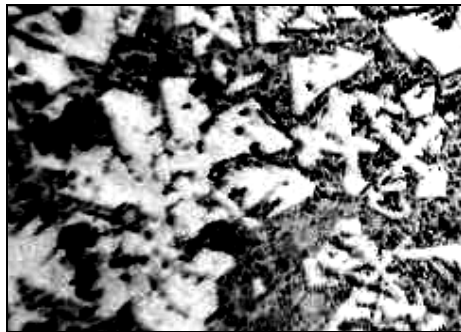


Рис. 8. Дендрити магнетиту (ясно-сіре) у силікатному склі (сіре). Шлак конвертерного цеху. Полірований шліф.  $\times 200$ .



Рис. 9. Порфірові футляроподібні кристали магнетиту (чорне) у зростках з кальцієвим силікатом (ясно-сіре). Прозорий шліф. Ніколі ||.  $\times 30$ .

У разі охолодження розплаву одночасно з магнетитом ростуть також інші мінерали. Індукційна поверхня простежена на контакті магнетиту з кальцієвим силікатом, діоксидом, олівіном, феритом кальцію. Спільна кристалізація з діоксидом

приводить до утворення променистих розгалужених включень магнетиту у секторах росту певних граней кристала-хазяїна (рис. 10).

У поздовжніх розрізах індивідів олівіну виділення магнетиту мають прямолінійні форми, у центральній частині поперечних розрізів є схожі на хіастоліт хрестоподібні магнетитові утворення (рис. 11).

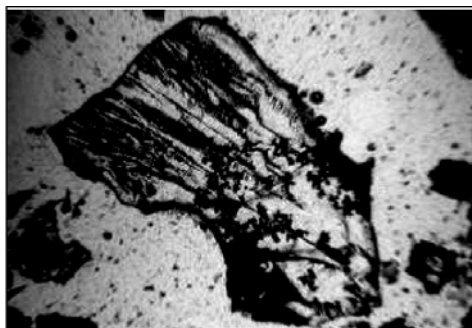


Рис. 10. Зерно діопсиду (ясно-сіре) з видовженими включеннями і дендритами магнетиту (чорне). Конвертерний шлак. Прозорий шліф.  $\times 60$ .

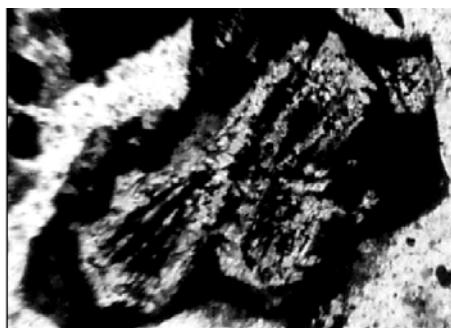


Рис. 11. Ідіоморфні кристали олівіну (ясно-сіре) з включеннями й облямівкою магнетиту (чорне). Конвертерний шлак. Прозорий шліф.  $\times 55$ .

**Зміна і знищення** виділень магнетиту простежуються у вигляді розтріскування й руйнування кристалів і агрегатів, заміщення їх магхемітом. У гіпергенних умовах шлакових відвалів і шламосховищ відбувається заміщення магнетиту гематитом і гідроксидами заліза (див. рис. 6).

Виявлені особливості морфології і внутрішньої будови індивідів та агрегатів магнетиту суттєво впливають на його технологічні властивості й ефективність збагачування пилу, шлаку, шламу та інших продуктів металургійного виробництва. Концентрично-зональні зростки і графічні проростання магнетиту, вюститу й заліза у випадку магнітного збагачення шлаку потрапляють до скрапу. Ідіоморфні субевгедральні кристали, кірки навколо газових порожнин, магнетитові й гематит-мартитові кулі за сучасною технологією втрачаються. З удосконаленням технологічної схеми їх можна виділити в окремий концентрат для агломераційного виробництва.

Індивіди магнетиту, зароджені на зернах кварцу й шпінелі, дендрити у силікатному склі, вростки магнетиту у кристалах діопсиду, олівіну та кальцієвого силікату містять велику кількість шкідливих для металургійного виробництва домішок кремнезему і глинозему. Вилучення їх зі зростків потребує значних затрат на додаткове подрібнення й сепарацію.

Отже, техногенний магнетит кристалізується у широкому діапазоні температури з розплаву внаслідок зміни складу твердого розчину, розпаду й окиснення залізовмісних мінералів. Для нього характерна варіативність морфології й анатомії індивідів і агрегатів, різноманітні перетворення. Вивчення магнетиту дасть змогу створити ефективну технологію переробки і збагачення промислових залізовмісних відходів.

1. *Винчелл А.Н.* Оптическая минералогия. М., 1949.
2. *Григорьев Д.П., Жабин А.Г.* Онтогенез минералов. Индивиды. М., 1975.
3. *Литвинова Т.И., Пирожкова В.П., Петров А.К.* Петрография неметаллических включений. М., 1972.
4. *Матковський О.І., Пирогов Б.І.* Прикладна мінералогія. Львів, 2002.
5. *Павлишин В.І., Матковський О.І., Довгий С.О.* Генезис мінералів. К., 2003.

## SOME PECULIARITIES OF TECHNOGENE MAGNETITE ONTOGENESIS

**S. Tyryshkina, V. Ivanchenko, T. Nesterenko**

*Kryvyi Rih Technical University  
Pushkina St. 44, UA – 50002 Kryvyi Rih, Ukraine  
E-mail: evtekhov@mail.ru*

Results of morphology and anatomy microscopic investigations of metallurgical origin magnetite crystals are presented.

*Key words:* magnetite, ontogenesis, morphological varieties, metallurgical slag, slime, dust, techogene mineral formation, Kryvyj Rih region.

Стаття надійшла до редколегії 18.05.2007  
Прийнята до друку 26.06.2007