

дження, що виникає при критичних швидкостях горнового газу в зоні розрихленого коксу, яка розміщується над куполом осьової зони малорухомих матеріалів в заплечиках доменної печі.

Пульсації, як і більш розповсюджене порушення ходу печі - підвисання шихти, мають загальну природу - неприпустиме збільшення швидкості газу в стовпі шихти. Тому єдиним способом форсування плавки в таких умовах є підвищення тиску газів в робочому просторі печі. Судячи за низькою якістю стисненого дуття перепорою для підвищення тиску на колошнику ДП №2 в Оіта була недостатня для форсованого режиму потужність повітродувної машини.

На прикладах експлуатації великих доменних печей колишнього СРСР і Японії доведено, що недооцінка значення повітродувних засобів і якості холодного дуття обмежує можливості застосування підвищеного тиску і форсування процесу. Удосконалення конструкцій і режимів роботи повітродувних машин є одним із вирішальних умов подальшого розвитку технології плавки на підвищеному тиску.

Список літератури

1. Крячко Г. Ю. Оценка качества дутья и технической работы газа в доменном процессе. Черные металлы. 2002. №10. С. 11-16.
2. Такао М., Тоигути М., Хага Т. Работа доменной печи №2 в Оита с суточной производительностью 12550 т // Новости черной металлургии за рубежом. 1995. №1. С. 35-37.

УДК 669.546.1

І. Ю. Навольнєв, В. В. Кухар, Є. В. Чупринов

ТОВ «Технічний Університет «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», м. Запоріжжя

ВИКОРИСТАННЯ ПОВЕРХНЕВО-АКТИВНИХ РЕЧОВИН ПРИ ВИРОБНИЦТВІ DRI-ПРОДУКТУ

Боротьба з вуглецевим слідом стає головною вимогою сучасного розвитку промисловості. Не обійшла ця тенденція й металургійний комплекс. На заміну існуючому, розповсюдженому доменному виробництву, одним з варіантів пропонується більш

екологічно-нейтральний спосіб виготовлення сталі на основі технологій DRI (Direct Reduced Iron). При цьому одними з недоліків цього напрямку є:

- схильність продукту DRI до окислення та самозаймання: продукт містить металеве залізо у високодисперсному стані, що робить його хімічно активним і таким, що легко окислюється при контакті з вологою чи повітрям. Це може знизити металізацію (з 90–95% до 80–85%) і підвищує ризик самозаймання під час транспортування чи зберігання [1];

- обмеження якості сировини: потрібні високоякісні окатиші з вмістом Fe 65–70% і низьким рівнем домішок (SiO_2 , Al_2O_3) [2];

- складність транспортування та зберігання: через пористість DRI потребує спеціальних умов для транспортування (герметичні контейнери, захисні покриття) або брикетування в HBI (Hot Briquetted Iron). Хоча, HBI менш проблемний - це потребує додаткового етапу брикетування, що збільшує собівартість на 10–15% [3].

Для подолання зазначених проблем стали застосовувати досягнення хімічної промисловості – поверхнево-активні речовини (ПАР). Такі хімічні сполуки знижують поверхневий натяг рідин, сприяють їх змішуванню, піноутворенню або диспергуванню. Вони мають амфифільну будову – гідрофільну та гідрофобну частини [4].

Поділимо та розглянемо, як ПАР впливають на покращення якості вихідної сировини та вже готового продукту DRI.

1. ПАР для вихідної сировини. Вихідна сировина для DRI — залізорудний концентрат або окатиші. Вимоги: високий вміст заліза (60–70%), низький рівень домішок (SiO_2 , Al_2O_3) та відповідні фізичні властивості (міцність, пористість). Відповідно, технологічні процеси, які необхідно застосувати для досягнення необхідних показників, – це флотація та окатування:

- 1.1. ПАР для флотації та збагачення руди. ПАР у флотації відокремлюють залізовмісні мінерали, підвищуючи якість концентрату.

- 1.1.1. Аніонні ПАР:

- жирні кислоти (олеїнова кислота / $\text{C}_{18}\text{H}_{34}\text{O}_2$, натрієві олеати / $\text{C}_{18}\text{H}_{33}\text{COONa}$): адсорбуються на гематиті/магнетиті, роблячи їх гідрофобними. Ефективні при рН 7–9, підвищують вміст Fe до 65–68% [5].

- алкілсульфонати (додецилсульфонат натрію / $\text{C}_{12}\text{H}_{25}\text{SO}_3\text{Na}$): застосовуються для зворотної флотації кремнезему, знижуючи SiO_2 до 0,2–0,5% [6].

- 1.1.2. Неіоногенні ПАР:

- етоксильовані спирти (ізотридеканол етоксильований / $C_{13}H_{28}O(C_2H_4O)_n$): піноутворювачі, що посилюють стабільність піни та селективність [7]. Наприклад, ізотридеканол етоксильований (100%) підвищує вихід концентрату на 2–3%.

- полігліколеві ефіри: покращують піноутворення та дисперсію частинок [8].

1.1.3. Катіонні ПАР:

- аміни (додециламін / $C_{12}H_{25}NH_2$): використовуються для зворотної флотації кварцу, ефективні для висококремнеземистих руд, але їхній недолік – висока ціна [6].

1.2. ПАР для окатування (гранулювання). ПАР додають до шихти для покращення міцності сирих та обпалених окатишів, а також їхньої пористості, що важливо для відновлення в шахтних печах (наприклад, Midrex).

1.2.1. Аніонні ПАР:

- лігносульфонати: підвищують міцність сирих окатишів, знижуючи пилення [9].

- карбоксиметилцелюлоза (КМЦ): посилює в'язкість шихти, запобігає розтріскуванню окатишів [10].

1.2.2. Неіоногенні ПАР:

- етоксильовані спирти: покращують змочуваність шихти, забезпечуючи рівномірний розподіл води та бентоніту. Міцність окатишів досягає 200–250 кг/см² [11];

- поліакриламідні: знижують поверхневий натяг води, зменшуючи витрати бентоніту на 20–30% [12].

2. ПАР для покращення якості готового DRI. Основним напрямом – є захист від окислення.

2.1. Неіоногенні ПАР:

- етоксильовані спирти (ізотридеканол етоксильований / $C_{13}H_{28}O(C_2H_4O)_n$): використовуються у захисних покриттях, створюючи гідрофобну плівку, стійку до води, особливо при морському транспортуванні [1].

- силіконові ПАР (полідиметилсилоксани / $CH_3[Si(CH_3)_2O]_nSi(CH_3)_3$): формують термостійку гідрофобну плівку, захищаючи від корозії [13];

2.2. Амфотерні ПАР:

- бетаїни (кокамідопропілбетаїн / $C_{19}H_{38}N_2O_3$): пасивують поверхню, знижуючи реакцію з киснем та водою [14].

2.3. Полімерні ПАР:

- полівінілові спирти (ПВС / $(C_2H_4O)_n$): створюють міцну захисну оболонку, запобігаючи окисленню та руйнуванню при перевалці [15].

3. ПАР для гарячебрикетованого заліза (НВІ). НВІ знижує пористість та окислюваність DRI, роблячи його ідеальним для експорт. При цьому ПАР покращують зазначене брикетування за рахунок:

3.1. Аніонні ПАР:

- лігносульфонати: покращують зв'язування частинок, підвищуючи щільність брикетів до 5–5,5 г/см³ [16].

3.2. Неіоногенні ПАР:

- етоксильовані жирні кислоти: полегшують пресування, підвищуючи міцність брикетів до 100–150 кг/см² [17].

Таким чином, підсумовуючи все вищенаведене, можна зробити наступні висновки:

- в цілому, ПАР спроможні підвищувати вміст Fe у концентраті до 65–70%, знижувати SiO₂ до 0,2–0,5%, покращувати міцність та пористість окатишів, знижуючи енергоємність відновлення;

- при флотації та окатуванні виникає необхідність в комбінуванні аніонних ПАР (олеати, лігносульфонати) та неіоногенних ПАР (ізотридеканол етоксильований), що забезпечить в продукті вміст Fe 65–70% та необхідну міцність окатишів;

- захисні покриття ПАР забезпечують підтримання рівню металізації DRI на рівні 90–95% й запобігають самозайманню;

- для мінімізування окислення та полегшення транспортування НВІ необхідно використовувати лігносульфонати.

Список літератури

1. Zhang Y., Lu W. K. Protection of DRI from oxidation during storage and transportation. *Ironmaking & Steelmaking*. 2010. Vol. 37, No. 6. P. 427–432.

2. Anameric B., Kawatra S. K. Properties and features of direct reduced iron. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*. 2008. Vol. 29, No. 1. P. 59–77.

3. Pal J., Ghorai S. Development of coating for DRI to prevent re-oxidation. *ISIJ International*. 2015. Vol. 55, No. 12. P. 2656–2663.

4. Поверхнево-активні речовини. *Фармацевтична енциклопедія*. 2025. URL: <https://www.pharmencyclopedia.com.ua/article/859/poverxnevo-aktivni-rechovini> (дата звернення: 17.04.2025).

5. Araujo A. C., Viana P. R., Peres A. E. Reagents in iron ores flotation. *Minerals Engineering*. 2005. Vol. 18, No. 2. P. 219–224.

6. Quast K. Flotation of hematite using C6–C18 saturated fatty acids. *Minerals Engineering*. 2012. Vol. 29. P. 47–53.
7. Wang D., Liu Q. Non-ionic surfactants in froth flotation of iron ores. *International Journal of Mineral Processing*. 2013. Vol. 123. P. 1–8.
8. Fuerstenau M. C., Han K. N. Principles of mineral processing. *SME*, 2002.
9. Eisele T. C., Kawatra S. K. Use of organic binders in iron ore pelletization. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*. 2003. Vol. 24, No. 1. P. 1–27.
10. Sivrikaya O., Arol A. I. Alternative binders to bentonite for iron ore pelletizing. *Particulate Science and Technology*. 2012. Vol. 30, No. 5. P. 445–456.
11. Halt J. A., Kawatra S. K. Review of organic binders for iron ore agglomeration. *Minerals & Metallurgical Processing*. 2014. Vol. 31, No. 2. P. 73–94.
12. Ripke S. J., Kawatra S. K. Can fly-ash extend bentonite binder for iron ore agglomeration? *International Journal of Mineral Processing*. 2000. Vol. 60, No. 3–4. P. 181–190.
13. De Bruyn H., Du Preez H. Surface treatments for direct reduced iron. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2005. Vol. 105, No. 7. P. 455–460.
14. Fuerstenau D. W. Surfactants in mineral processing. *Advances in Colloid and Interface Science*. 2007. Vol. 137, No. 2. P. 57–68.
15. Pal J., Ghorai S. Development of coating for DRI to prevent re-oxidation. *SIJ International*. 2015. Vol. 55, No. 12. P. 2656–2663.
16. Born S., Schutze J. Hot briquetted iron (HBI): Production and properties. *Metallurgical Research & Technology*. 2017. Vol. 114, No. 5. P. 506.
17. Anameric B., Kawatra S. K. Properties and features of direct reduced iron. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*. 2008. Vol. 29, No. 1. P. 59–77.

УДК 621.74

Ю. В. Ниткін, О.Й. Огінський, О.С. Бобух, О.М. Кузьміна

Український державний університет науки та технологій, м. Дніпро

ВПЛИВ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ НЕРІВНОКАНАЛЬНОГО КУТОВОГО ПРЕСУ- ВАННЯ НА ЕНЕРГОСИЛОВІ ХАРАКТЕРИСТИКИ