

10. Tarasov V.P., Semakova V.B., Tomash A.A., Maianov V.A., Tarasov P.V. Issledovanie massoperenosa pri potere stabil'nosti granichashhih zernistyh sloev [Study of mass transfer during loss in stability of interfacial grained layers]. *Stal' – Steel*, 1991, no. 9, pp. 11-14. (Rus.)
11. Semakova V.B., Rus'kyh V.P., Karikov S.A., Kirsanov R.Ju., Lushhaj O.O., Semakov V.V. *Sposib zavantazhennja domennoi' pechi* [The method of loading the blast furnace]. Patent UA, no. 148633, 2019. (Ukr.)
12. Voloshyn V.S., Semakova V.B., Kharchenko I.I., Semakov V.V., Gudym L.O. Rozpodil radial'nyh rudnyh navantazhen' pry formuvanni u domennij pechi chotyryskipovyh rudnyh i kokovyh shariv [Radial ore loads distribution at the formation of four-skip ore and coke layers in a blast furnace]. *Visnik Priazovskogo der-zhavnogo tehnicnogo universitetu. Serija: Tehnicni nauki – Reporter of the Priazovskyi State Technical University. Section: Technical sciences*, 2020, vol. 40, pp. 96-103. doi: 10.31498/2225-6733.40.2020.216186. (Ukr.)

Рецензент: С.В. Кривенко
д-р техн. наук, проф., ДВНЗ «ПДТУ»

Стаття надійшла 23.10.2021

УДК 622.341.23

doi: 10.32782/2225-6733.43.2021.14

© Кривенко В.В.¹, Чупринов Є.В.², Кассім Д.О.³, Коренко М.Г.⁴,
Ляхова І.А.⁵

АНАЛІЗ КОМПЛЕКСНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ МАРГАНЦЕВИХ РУД І ШЛАМІВ ТА МОЖЛИВОСТЕЙ ЇХ ОГРУДКУВАННЯ З МЕТОЮ ОТРИМАННЯ МАРГАНЦЕВИХ ФЕРОСПЛАВІВ

Виконано порівняльний аналіз хімічного, мінералогічного складів та фізичних характеристик імпортованих та вітчизняних марганцевих руд та концентратів, а також досліджені закономірності трансформації фазового складу у процесі відновлювально-теплової обробки. Розроблено технологію переробки дрібнодисперсних марганцевих матеріалів, концентрату збагачення шламів та пилу виробництва феросплавів, що включає їх часткове доподрібнення та підсушування, змішування, гранулювання та агломерацію у високому шарі. Визначено оптимальні параметри агломерації, що дозволяють проводити процес без зниження технологічних показників при використанні в аглошихті 30-45% концентрату високоінтенсивної магнітної сепарації.

Ключові слова: марганцевий концентрат, феросплави, дисоціація, відновлення, цінність сировини.

V.V. Krivenko, E.V. Chuprinov, D.O. Kassim, M.G. Korenko, I.A. Lyakhova. Analysis of complex properties of manganese ores and sludges as well as possibilities of their pelletizing for obtaining manganese ferroalloys. The results of differential thermal anal-

¹ канд. техн. наук, доцент, Навчально-науковий технологічний інститут Державного університету економіки і технологій, м. Кривий Ріг, ORCID: 0000-0001-7822-6358, vykrivenko2017@gmail.com

² канд. техн. наук, доцент, Навчально-науковий технологічний інститут Державного університету економіки і технологій, м. Кривий Ріг, ORCID: 0000-0001-8605-3434, itchupa@gmail.com

³ д-р техн. наук, професор, Навчально-науковий технологічний інститут Державного університету економіки і технологій, м. Кривий Ріг, ORCID: 0000-0002-1750-1237, kasik_78@ukr.net

⁴ канд. техн. наук, доцент, Навчально-науковий технологічний інститут Державного університету економіки і технологій, м. Кривий Ріг, ORCID: 0000-0002-4582-1756, marinak20162010@gmail.com

⁵ канд. техн. наук, доцент, Навчально-науковий технологічний інститут Державного університету економіки і технологій, м. Кривий Ріг, ORCID: 0000-0001-7589-8351, lyakhova1959@gmail.com

ysis of samples of oxide, oxide-carbonate and carbonate ores and concentrates have been obtained. A study for sintering the agglomerate using high-intensity magnetic separation concentrate has been carried out. The comparison of technological parameters of the agglomeration process with the use of high-intensity magnetic separation concentrate in an unprepared form and with its preliminary pelletization has been performed. Comprehensive studies of the chemical and mineralogical composition of industrial saws and sludges at JSC «Nikopol Ferroalloy Plant» have been performed in order to develop technological schemes and processes of their reuse. The research has determined the physical properties of industrial sawdust and sludge, has worked out the modes of their pelletizing and agglomeration. The modes of filtering and pelleting of the raw pellets obtained from dust and sludge of current production of ferroalloys have been tested. The possibility of obtaining calcinated pellets suitable for smelting standard alloys has been investigated. The process of obtaining manganese granules for further agglomeration has been tested on a bowl moulder with a diameter of 5.5 m. The optimal modes of granule formation with a diameter of 3-5 mm, which have the highest technological indicators, have been worked out. The agglomeration process was tested using granules with a diameter of 2-8 mm with a change in their mass fraction in the ore part from 10 to 50%. The optimal agglomeration parameters have been determined, which make it possible to carry out the process without reducing the technological indicators when using 30-45% concentrate of high-intensity magnetic separation in the sintering charge.

Key words: *manganese concentrate, ferroalloys, dissociation, reduction, value of raw materials.*

Постановка проблеми. Присутність сполук миш'яку та бору в мінерально-сировинних компонентах металургійної шихти обумовлює необхідність вживання низки додаткових заходів для зменшення їх шкідливого впливу на якість подальшої продукції. Переробка миш'яковмісних марганцевих і залізних руд ускладнюється ще й тим, що оксидні сполуки миш'яку, особливо арсин (AsH_3), відносяться до групи промислово отруйних речовин. Проблема бору та миш'яку донедавна не привертала уваги виробників феросплавів.

Слід зазначити, що у рекламних проспектах будь-яке регламентування вмісту цих елементів у марганцеворудній сировині відсутнє. Разом з тим, відомо, що компанія «Vale de Rio Doce» (Бразилія) для руди, що складається в основному з діоксиду марганцю (MnO_2 – 80,00-81,34%), запровадила обмеження миш'яку до 0,0044% у першому сорті та до 0,0048% у другому сорті, а свинцю – до 0,021% та до 0,024%, відповідно за сортами.

За аналогією з фосфідами марганцю, можна вважати, що присутні в шихті бор і миш'як при виплавці марганцевих феросплавів практично повністю повинні переходити в сплав, і це припущення підтверджують хімічні аналізи аспіраційного пилу феросплавних печей, який практично не містить перерахованих вище елементів. Що стосується свинцю і ртуті, то їхня присутність істотно не впливає на якість марганцевих феросплавів, оскільки при виплавці марганцевих сплавів основна маса (більше 90%) цих домішок видаляється (виганяється) у газову фазу. Слід зазначити, що деякі з'єднання і елементи, присутні в сировині, що містить марганець, такі як оксиди лужних металів (Na_2O і K_2O), оксиди кремнію, свинець, ртуть, цинк та ін., потрапляючи в зону високих температур печі, переходять в газоподібну фазу і підіймаються у верхні горизонти шахти феросплавної печі та осаджуються на шихтових матеріалах. При цьому фазові переходи призводять до перенесення тепла з нижніх горизонтів шахти у верхні та можуть підвищувати у верхніх горизонтах температуру шихти та, відповідно, колошника. Досягнувши певних концентрацій, циркулюючі речовини з шихтою можуть утворювати настилі та рідкорухливі суміші, які негативно впливають на газодинамічний та електричний режими електроплавки. Також спостерігалися випадки накопичення на подині печі важких металів, нерозчинних у феросплавах.

Таким чином, актуальність хімічних та мінералогічних досліджень марганцевих руд, а також дослідження закономірностей трансформації фазового складу у процесі відновлювально-теплової обробки, а також пошук способів підвищення вилучення марганцю при збагаченні ма-

гранцевих руд в Україні в умовах постійного зниження якості вихідної руди, є актуальним завданням.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Попередніми дослідженнями [1] проведено співставлення показників якості марганцевих концентратів, вироблених в Україні та за кордоном, досліджені проби марганцевих руд різного хімічного і фракційного складів, які в даний час широко використовуються при виробництві марганцевих феросплавів на вітчизняних підприємствах. Було показано, що механічна міцність (по фракції більше 5 мм) кускових марганцевих руд невисока і поступається за міцністю марганцевому агломерату, виробленому з вітчизняних концентратів.

Одним із напрямів підвищення вилучення марганцю при збагаченні марганцевих руд в Україні в умовах постійного зниження якості вихідної руди є впровадження більш глибоких та досконаліх схем збагачення, що включають флотацію та високоінтенсивну магнітну сепарацію (ВМС) [2, 3]. Це призводить до збільшення кількості тонких частинок та вологи в концентратах.

Спікання марганцевих концентратів підвищеної вологоємності (12,0-26,5%) та низької насипної щільності (1350-1750 кг/м³) призводить до високих втрат при прожарюванні (до 10,5-25,5%). У порівнянні з процесом агломерації залізородних матеріалів спостерігається значна усадка шару, а питомий вихід продуктів спікання в 1,5-2,0 рази нижчий [4].

Оскільки при спіканні подібної сировини потрібна підвищена масова частка в шихті звороту, а також коксової дрібниці (в 1,5-2,0 рази), збільшення в аглошихті частки тонких і вологоємних концентратів ускладнює процес спікання внаслідок зниження газопроникності шихти [5, 6].

Мета статті – аналіз властивостей марганцевої сировини з метою подальшого отримання марганцевих феросплавів.

Виклад основного матеріалу. На вітчизняних аглофабриках тонкі марганцеві концентрати у різних кількостях підшихтовують до гравітаційних концентратів. Ці матеріали надходять в агломераційну шихту у непідготовленому вигляді.

Вплив природи вихідної руди та її речовинного складу на відновлюваність та температуру розм'якшення і, у свою чергу, на структуру та властивості шлакових розплавів очевидний. В'язкість шлаків повинна сприяти швидкому стіканню крапель металу в сплав, швидкій взаємній дифузії оксидів і відновника, а отже, швидкому перебігу процесу, і нарешті дозволяти оптимально розподіляти градієнти температури в розплаві. На жаль, втрати марганцю зі шлаком тільки у вигляді металевих корольків під час виробництва марганцевих сплавів значні. Зокрема, при виплавці силікомарганцю вони сягають 7,0% внаслідок високої в'язкості кінцевого шлаку.

Тому, загалом, фізико-хімічні властивості вихідної мінеральної сировини за умов феросплавного виробництва є чинниками, що визначають механізм, кінетику і статику процесу відновлення.

Легкоплавкі марганецьвмісні матеріали мають високу рідкоплинність, що особливо несприятливо для технології, коли частка їх в шихті значна. При цьому відбувається інтенсивне накопичення у ванні печі зазначених розплавів, котрі мають одночасно високу електропровідність, що перешкоджає завершенню дисоціації, декарбонізації та відновленню оксидів та карбонатів марганцю. Отже, у будь-якому випадку використання досліджених [1] марганцевих руд у шихті для виплавки силікомарганцю у співвідношеннях, необхідних для отримання сплаву заданої якості, краще, ніж агломератів та руд вітчизняного виробництва.

Результати диференціально-термічного аналізу зразків окисних, окисно-карбонатних і карбонатних руд та концентратів представлено на рис. 1 та в табл. 1.

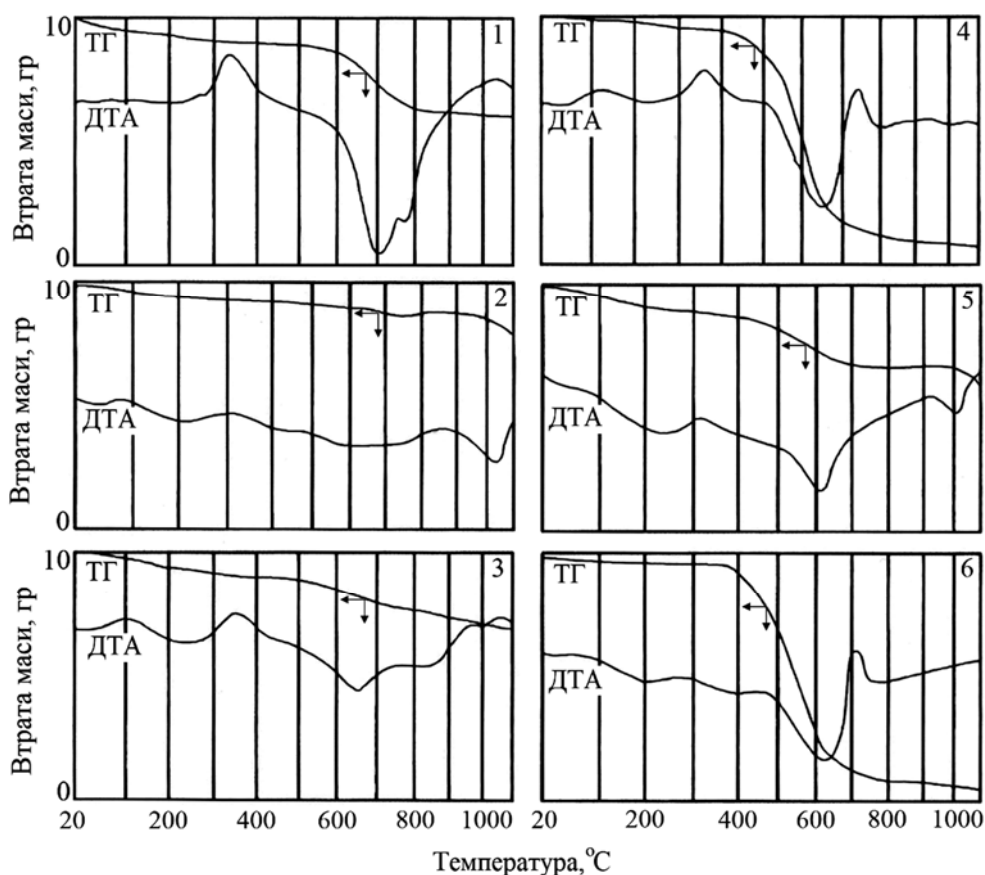


Рис. 1 – Характер диференціальних кривих нагрівання ДТА та зміни маси ТГ проб марганцевої руди: 1, 2 та 3 – номер проби марганцевої руди, що надійшла з Грузії, Австралії та Бразилії, відповідно; 4, 5 та 6 – номер проби марганцевої руди, що надійшла з Гани-I, Гани-II та Гани-III, відповідно

Слід зазначити, що проба 1 – це марганцева руда, представлена в основному піролюзитом (MnO_2); проба 2 представлена переважно браунітом (Mn_2O_3); проба 3 містить у своєму складі піролюзит, псиломелан та кальцит. Крім цього, у всіх трьох вище перерахованих пробах, особливо в пробі 1 (рис. 1), в інтервалі температур 300-400°C відбуваються екзотермічні реакції, обумовлені вторинним окисленням манганозиту (MnO), що у цих умовах термодинамічно нестабільний і вступає в реакцію з киснем, зокрема і з киснем, що виник у результаті дисоціації вищих оксидів марганцю.

Таблиця 1

Результати термічного аналізу проб марганцевої руди

Номер ефекту	Номер проби					
	1		2		3	
	Країна-виробник					
	Грузія		Бразилія		Австралія	
Знак і температура виникнення теплового ефекту, °C	Втрата маси, %	Знак і температура виникнення теплового ефекту, °C	Втрата маси, %	Знак і температура виникнення теплового ефекту, °C	Втрата маси, %	
1	(-) 100	1,66	(-) 57	0,61	-	2,11
2	-		(-) 180	0,44	(+) 115	
3	-		(-) 240	0,64	(-) 260	
4	(+) 340	1,82	-	-	(+) 350	0,77

Продовження таблиці 1

Номер ефекту	Номер проби					
	1		2		3	
	Країна-виробник					
	Грузія		Бразилія		Австралія	
	Знак і температура виникнення теплового ефекту, °С	Втрата маси, %	Знак і температура виникнення теплового ефекту, °С	Втрата маси, %	Знак і температура виникнення теплового ефекту, °С	Втрата маси, %
5	-	0,80	(-) 390	1,00	-	
6	-		(-) 610		-	
7	(-) 700	8,26	-	1,21	(-) 650	2,95
8	-		-		-	
9	(-) 760		-		-	
10	-		(-) 740		-	
11	-		(-) 780		(-) 840	1,77
12	-		-			
13	-		-		(-) 1010	1,36
14	(+) 1030		(-) 1050	2,15	-	
Σ		12,54*		6,05		9,86

Продовження таблиці 1

Номер ефекту	Номер проби					
	4		5		6	
	Країна-виробник					
	Гана-I		Гана-II		Гана-III	
	Знак і температура виникнення теплового ефекту, °С	Втрата маси, %	Знак і температура виникнення теплового ефекту, °С	Втрата маси, %	Знак і температура виникнення теплового ефекту, °С	Втрата маси, %
1	-	0,96	(-) 60	1,32	(-) 60	0,61
2	(+) 125		-	1,82	-	
3	-		(-) 270	1,58	(-) 210	0,34
4	(+) 340		(+) 340	1,75	-	
5	-		(-) 400		-	
6	(-) 640	24,38	-		(-) 420	
7	-		(-) 625	5,54	-	
8	(+) 725		-		(-) 627	25,71
9	-		-	0,67	(+) 705	
10	(-) 772	2,30	-		-	2,79
11	-		-		(-) 770	
12	(-) 990	0,87	-		(-) 980	1,14
13	-		(-) 1010	1,51	-	
14	-		-		-	
Σ		28,51		14,19		31,19

Знак теплового ефекту (+) – екзотермічний, (-) – ендотермічний.

* остання строчка – втрата маси зразка при нагріванні його від 20 до 1100°С з постійною швидкістю нагрівання 10°С/хв в окислювальному середовищі. Аналіз характеру диференціальних кривих нагрівання ДТА і термогравіметричних кривих ТГ (криві зміни маси) виконували на установці термовагового аналізу УТП-1м. Зразки проб, подрібненні в порошок, завантажувались в корундовий тигель і в атмосфері повітря нагрівали зі швидкістю 10°С/хв. Еталоном був оксид алюмінію Al₂O₃, прожарений при 1100°С

Проба 4 – це, в основному, родохрозит. Крім того, марганцева руда містить незначну кількість кальциту та псиломелану, а також встановлено наявність невеликої кількості цеоліту типу натроліту. Основним компонентом у пробі 5 (див. рис. 1) є піролюзит (58,4%) та псиломелан. Крім цього, в пробі міститься трохи брауніту та незначна кількість цеоліту. Проба 6 представляє марганцеву карбонатну руду, що складається в основному з родохризиту (приблизно 67%). У руді є марганцевистий кальцит, котрий зумовлює втрату маси, що дорівнює 2,79% (табл. 1) в інтервалі температур 660-680°C; також міститься незначна кількість псиломелану та цеоліту. Дериватограми марганцевих руд за характером не однотипові і взаємно не подібні. Відмінність величини ендотермічних ефектів спричинена відмінністю кількості марганцевмісних мінералів та хімічного складу порожньої породи. Термічне розкладання вищих оксидів та дисоціація карбонатів відбувається у широкому діапазоні температур унаслідок різних теплофізичних властивостей мінералів.

Якість іноземних руд порівнюється з українськими концентратами I і II сортів, заснованих на відносних модульних параметрах (таблиця 2), що є співвідношенням масової частки елемента або компонента в руді до масової частки марганцю в ньому або співвідношенням кількості оксидних компонентів до суми інших компонентів, що містять сировину, виражену в частках одиниць (ч.од.).

Таблиця 2

Хімічний склад та модульні параметри зразків марганцевих руд та концентратів

№ п/п	Країна-виробник	Масова частка, %			Відносний вміст, ч.од.	
		Mn	Fe	P	P/Mn	(CaO+MgO)/SiO ₂
1	Грузія	47,20	1,300	0,207	0,00438	0,2069
2	Бразилія	47,60	6,500	0,0060	0,0013	0,2548
3	Австралія	47,00	6,250	0,032	0,0007	0,2703
4	Гана-I	30,00	1,201	0,070	0,0023	0,6925
5	Гана-II	39,70	4,962	0,140	0,0035	0,0269
6	Гана-III	30,50	0,734	0,110	0,0036	0,7145
7	Україна, концентрат:					
	I сорта	43,0	1,509	0,176	0,0041	0,2890
	II сорта	36,0	1,494	0,202	0,0056	0,2440

Аналіз значень модуля фосфору (P/Mn), як показника питомої частки фосфору по відношенню до вмісту марганцю, вказує на те, що українські марганцеві концентрати характеризуються гіршими значеннями цього параметра, ніж іноземні руди. Модуль заліза значно більше у руди з Бразилії, Австралії та оксид-карбонатної руди Гани, що не забезпечує отримання марганцевих феросплавів і, перш за все, силікомарганцю з вищим, у порівнянні з базовим (65%), вмістом марганцю. В даний час цей фактор є одним з основних, що забезпечує високу конкурентоспроможність вітчизняного силікомарганцю на світовому ринку.

У той же час, наявність високоякісних руд дозволяє закордонним виробникам виплавляти якісні марганцеві феросплави безпосередньо з кускових руд, тоді як переробка українських марганцевих руд неможлива без додаткових і витратних статей переділу, у тому числі збагачення бідної руди з отриманням з неї концентратів та їх агломерації, при якій вилучення Mn та витрата електроенергії становлять, відповідно, 97% та 150 кВт·год/т.

Щодо досліджуваних проб, необхідно особливо зупинитися на рудах під номером 4 і 6, що відносяться до карбонатних марганцевих руд.

Дослідженнями в лабораторних та промислових умовах встановлено, що введення в аглошихту концентрату високоінтенсивної магнітної сепарації в непідготовленому вигляді у кількості більш ніж 15% знижує технологічні показники процесу агломерації.

Дослідження процесу агломерації проводили на установках дослідного виробництва інституту «МеханоБрчормет». Змішування, зволоження і огрудкування шихти здійснювали в чашевому огрудкувачі діаметром 1,0 м. Підготовлену шихту спікали на напівпромисловій агломераційній установці з чашею круглого перерізу діаметром 280 мм і висотою 400 мм, обладна-

ною вакуум-камерою, запальним горном і тягодуттєвим пристроєм. Контроль за процесом спікання здійснювали за допомогою контрольно-вимірjувальних приладів.

Досліди зі спікання проводили відповідно до розробленої матриці планування експерименту. Регульованими параметрами в процесі спікання агломерату з використанням концентрату високоінтенсивної магнітної сепарації були час запалювання, розрідження при спіканні, масова частка гранул, звороту і коксової дрібниці. У процесі спікання фіксували контрольовані параметри: швидкість фільтрації повітря при спіканні та охолодженні, температуру газів, що відходять, масову частку марганцю і втрат при прожарюванні. Вихідними технологічними параметрами процесу агломерації були механічна міцність агломерату (ДСТУ-3200-95) та питома продуктивність агломераційної установки.

Для порівняння технологічних параметрів процесу агломерації дослідження проводили з використанням в аглошихті концентрату високоінтенсивної магнітної сепарації у непідготовленому виді та з попереднім його огрудкуванням. Складовими рудної частини аглошихти були окисний концентрат II сорту та карбонатний гравітаційний концентрат. Як тверде паливо використовували коксову дрібницю, застосовувану на Богданівській аглофабриці, крупністю 0,5-3,0 мм з масовою часткою вуглецю 80,0% і золи 14,0%.

Збільшення масової частки концентрату високоінтенсивної магнітної сепарації понад 15-20% призводить до погіршення фізичних та газодинамічних властивостей аглошихти, що, у свою чергу, знижує технологічні параметри спікання та якість агломерату. При масовій частці концентрату високоінтенсивної магнітної сепарації у непідготовленому вигляді в аглошихті, рівній 40-60%, процес агломерації стає важкоздійсненним. Внаслідок нижчої вологоємності карбонатного гравітаційного концентрату, більшого середнього розміру частинок і більшої їх шорсткості порівняно з окисним гравітаційним концентратом II сорту, вплив добавок концентрату високоінтенсивної магнітної сепарації у шихту меншою мірою позначається на погіршенні технологічних показників. При спіканні карбонатного концентрату з добавками концентрату високоінтенсивної магнітної сепарації, у зв'язку з високою масовою часткою летючих, зменшується вихід придатного агломерату і збільшується швидкість фільтрації газів, що відходять. Зростання швидкості фільтрації призводить до руйнування шматків карбонатного концентрату, що залежить від кількості твердого палива. З іншого боку, збільшення кількості карбонатного концентрату в аглошихті, що містить підвищений фосфорний модуль, не дозволить отримати стандартний модуль фосфору в агломераті, а в подальшому і марганцевий феросплав. У поєднанні з терморуїнуванням шматкового карбонатного концентрату це призводить до значного збільшення виносу пилу при спіканні. Тому кількісний показник вмісту карбонатного концентрату диктується тільки вмістом фосфору.

При використанні в аглошихті концентрату високоінтенсивної магнітної сепарації у вигляді гранул характеристики шару, що спікається, поліпшуються. Внаслідок підвищення газопроникності шихти можливе проведення процесу спікання у вищому шарі при необмеженій кількості частки гранул у рудній частині аглошихти. За такої технології усувається заочучування твердого палива в гранули, що знижує питому витрату коксової дрібниці. Встановлено, що додавання концентрату високоінтенсивної магнітної сепарації в аглошихту у непідготовленому вигляді в кількості від 15 до 30% та від 30 до 50% знижує питому продуктивність агломераційної установки на 25 та 50%, відповідно, а також міцність агломерату, та збільшує втрати вихідного матеріалу.

Досліджувався і другий спосіб попереднього огрудкування тонкодисперсних концентратів – метод брикетування, особливість якого полягала у відсутності сполучної добавки та підвищенні тиску пресування до 30 МПа. Була отримана партія брикетів для проведення досліджень по спіканню агломерату з використанням аглошихти сирих брикетів розміром 15×15×20 мм. Досліди з агломерації показали, що при вмісті в шихті 30-40% брикетів, висота шару, що спікається, може бути збільшена до 700-900 мм.

У процесі переробки шламів, що утворюються при збагаченні окисних марганцевих руд на високоінтенсивних магнітних сепараторах, отримували концентрат з високою питомою поверхнею і підвищеною вологоємністю. Концентрат високоінтенсивної магнітної сепарації марганцевих шламів містить, %: 33,0 Mn; 24,8 SiO₂; 2,9 Al₂O₃; 6,2 FeO; 0,435 P₂O₅ та інші складові.

Істинна щільність концентрату становить 3420 кг/м³, питома поверхня 250 м²/кг; насипна щільність 1500 кг/м³, кут природного укосу 43,5 град.

Концентрат характеризується високою вологоємністю – вміст води в ньому після фільтрації становить 30-40%. Концентрат після сушки огрудували в чашевих огрудувачах діаметром 1 і 2 м з отриманням сирих окатишів рівномірного гранулометричного складу (діаметром 14-18 мм) без застосування зміцнюючої добавки, а потім піддавали термообробці. Оптимальні параметри термообробки окатишів наведені в табл. 3.

Таблиця 3

Оптимальні параметри термообробки окатишів

Технологічні режими	Тривалість термообробки, хв	Температура теплоносія, °С		Швидкість фільтрації, м ³ /(м ² ·с)	Розрідження, ×10 ³ Па
		На вході	На виході		
Підігрів верху шару	90-120	200	30-40	0,3-0,5	2,00
Сушка дугтям знизу	12	350	80-90	1,2-1,4	5,00
Сушка дугтям зверху	3-4	350	80-90	1,1-1,2	5,00
Нагрів	6-7	700-900	200-350	1,1	5,00
Обпалення	12-15	1150 1180	400-500	0,9-1,0	5,00
Рекуперація	3	1000	500	0,9	5,00
Охолодження	15-16	20-25	800-300	1,3-1,4	5,00

Введення до складу шихти 1,0-1,2% тонко подрібненого твердого палива інтенсифікує процес обпалення, знижує температурний інтервал між горизонтами шару, що обпалюється, і збільшує питому продуктивність установки. Основні усереднені показники якості окатишів наступні:

	міцність на стиск, кН/ок	міцність на удар (фр. +5 мм), %	питома продуктивність, т/(м ² ·год)
без твердого палива	1,7	90	0,57
з добавкою 1 % антрациту:	1,27	87	0,72

Для розробки технологічних схем та процесів повторного використання промислових пилю та шлаків АТ «Нікопольського заводу феросплавів» було виконано комплексні дослідження їх хімічного та мінералогічного складу, визначено фізичні властивості, відпрацьовано режими огрудування та агломерації. Середньозважений склад суміші шлаків та пилю наступний, %: Mn – 25,6; Fe₂O₃ – 3,5; SiO₂ – 21,8; CaO+MgO – 10,8. Вміст марганцю в шламах аглоцеху сягає 30,0%. До особливостей шлаків слід віднести їхню високу молекулярну вологоємність, котра становить 29,7-32,1%, що свідчить про їх важку фільтруємість. При дослідженні мінералогічного складу шлаків та пилю методами мікроскопічного, рентгенівського та термогравіметричного аналізів встановлено, що шлами плавильних цехів представлені приблизно на 40-60% глиноземистими частинками та силікатним склом з підвищеною масовою часткою лужних металів, на 30% дуже тонкою домішкою кальциту та родохрозиту, 2-5% гаусманіту, брауніту та гідрооксидами марганцю та заліза. Уламкові частки представлені кварцем, силікатами, оксидами марганцю. Повна питома поверхня суміші пилю та шлаків становить 381,1 м²/кг; насипна щільність 1200-1350 кг/м³; температура розм'якшення 940-1000°С.

Досліджувалась можливість одержання з пилю та шлаків поточного виробництва окатишів, придатних для виплавки стандартних сплавів, для чого було проведено відпрацювання режимів фільтрування, огрудування та випробування отриманих окатишів. Отримали сирі окатиші з середнім діаметром 12-20 мм і міцністю на стискання у межах 22-30 Н/ок.

Міцність висушених окатишів ($t_{\text{сушки}} = 250-300^{\circ}\text{C}$) на стиск становила 120-160 Н/ок. При транспортуванні та вивантаженні їх на склад готових продуктів значна частина окатишів руйнувалася. Насипна щільність сухих окатишів становила $1020-1025 \text{ кг/м}^3$. При випробуваннях сухих окатишів міцність їх на удар становила в середньому 64,5% (від 58 до 70%) та на стирання – 15,0% (від 9 до 26%). Більш перспективним є напрямок, який був розроблений для використання дрібнодисперсних продуктів збагачення руд і розглянутий вище. Це особливо виправдано, якщо врахувати фракційний склад пилу та шламів, представлений в основному частинками $-0,044 \text{ мм}$. Підсушені до масової частки вологи 18-20% шлами розпушували в роторному змішувачі, змішували з пилом і гранулювали. У гранулятор за допомогою форсунок розпоршували воду в кількості, що забезпечує масову частку вологи у гранулах 33-24%. При цьому розмір гранул був у межах 2-8 мм.

Процес одержання гранул був також випробуваний на промисловому обладнанні – чашовому огрудкувачі діаметром 5,5 м. Встановлено, що при масовій частці вологи у вихідних шламах на рівні 22-24%, куті нахилу огрудкувача 48-50 град. і швидкості його обертання 11 об/хв утворюються гранули на 90% представлені фракціями в межах 3-5 мм. При транспортуванні та перевантаженні таких гранул руйнування їх незначне, а випробування на удар показали руйнування на рівні 3-5%.

Відпрацювання процесу агломерації з використанням гранул діаметром 2-8 мм здійснювалося із зміною їхньої масової частки в рудній частині від 10 до 50%. Спінання шихти здійснювалося у шарі заввишки 0,35 м. Масову частку звороту у шихті прийняли постійною на рівні 25%. Аналіз результатів, отриманих при спіканні агломерату, показав, що зі збільшенням масової частки гранул зі шламів і пилу в аглошихті до 15% міцність агломерату на удар і стирання практично не знижується. Зі збільшенням частки шламів до 30% міцність знижується на 2-3% (абсолютних), за більшого збільшення – на 4-5%. Крім цього, перевищення частки гранул понад 30% призводить до помітного погіршення якості агломерату за вмістом марганцю та питомим вмістом фосфору. Таким чином, оптимальна частка гранул у шихті встановлена в межах 15-30%.

Висновки

1. Одним із напрямів підвищення ступеню вилучення марганцю при збагаченні марганцевих руд в Україні в умовах постійного зниження якості вихідної руди є запровадження більш глибоких та досконалих схем збагачення, що включають флотацію та високоінтенсивну магнітну сепарацію (ВМС), хоч це і призводить до збільшення кількості тонких частинок та вологи в концентратах.

2. Виконано порівняльний аналіз хімічного, мінералогічного складів та фізичних характеристик імпортованих та вітчизняних марганцевих руд та концентратів, а також досліджені закономірності трансформації фазового складу у процесі відновлювально-теплової обробки. Підтверджено, що основною відмінною особливістю досліджуваної марганцевої сировини зарубіжних виробників є низьке значення модуля фосфору ($P/Mn < 0,0035$) та кремнезему (SiO_2/Mn від 0,5 і нижче), що дозволяє досягати високих техніко-економічних показників. Встановлено, що в процесі відновлення марганцевих руд при порівняно низькій температурі $750-800^{\circ}\text{C}$ утворюються певні марганцево-силікатні сполуки (скло та тефроїт).

3. Аналізом металургійної цінності вітчизняної та імпортованої сировини при виплавці сплавів встановлено, що при виробництві силікомарганцю з різним вмістом фосфору можливе поєднання всіх видів сировини, однак у зв'язку з низькою температурою плавлення шлаку передільного марганцевого (ШПМ) частка його в шихті не повинна перевищувати 40-45% (сплав з P до 0,35%). Для отримання сплаву з фосфором від 0,15 до 0,20% доцільніше використовувати імпортовану руду з підшихтуванням ШМП. На підставі виконаних досліджень встановлено, що з введенням в аглошихту 30-50% концентрату ВМС продуктивність агломераційної установки знижується на 25-50%, погіршуються показники міцності агломерату, збільшується винос пилу.

4. Розроблено технологію переробки дрібнодисперсних марганцевих матеріалів, концентрату збагачення методом високоінтенсивної магнітної сепарації шламів та пилу виробництва феросплавів, що включає їх часткове доподрібнення та підсушування, змішування, гранулювання та агломерацію у високому шарі. Визначено оптимальні параметри агломерації, що до-

звляють проводити процес без зниження технологічних показників при використанні в аглошихті 30-45% концентрату високоінтенсивної магнітної сепарації.

Перелік використаних джерел:

1. Оцінка металургійної цінності марганцевої сировини / В.В. Кривенко, В.П. Лялюк, С.В. Чупринов, І.М. Трус, А.М. Овчарук // Вісник Приазовського державного технічного університету. – 2021. – № 42. – С. 43-50. – (Серія: Технічні науки). – Режим доступу: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.42.2021.240571>.
2. Грищенко С.Г. Современное состояние и перспективы развития добычи и переработки марганцевого сырья на Украине / С.Г. Грищенко, Т.П. Проскурин, И.И. Люборец // Сталь. – 1992. – № 10. – С. 39-41.
3. Мостыка Ю.С. Кинетика мокрой высокоградиентной магнитной сепарации / Ю.С. Мостыка // Збагачення корисних копалин: науково-технічний збірник НГУ. – 2003. – № 18 (59). – С. 118-129.
4. Мянновська Я.В. Перетворення мінеральних складових марганцевих руд при температурних умовах формування агломерату / Я.В. Мянновська, Ю.С. Проїдак, Л.В. Камкіна // Теорія і практика металургії. – № 3. – 2019. – С. 42-51. – Режим доступу: <https://doi.org/10.34185/tpm.3.2019.07>.
5. Петров А.В. Технология термической обработки и окускования марганцевых концентратов: монография / А.В. Петров. – Кривой Рог: Изд. Р.А. Козлов, 2019. – 519 с.
6. Толстогузов Н.В. Теоретические основы и технология плавки кремнистых и марганцевых сплавов / Н.В. Толстогузов. – М.: Metallurgia, 1992. – 239 с.

References:

1. Krivenko V.V., Lyalyuk V.P., Chuprinov E.V., Trus I.M., Ovcharuk A.M. Ocinka metalurgijnoi cinnosti margancevoi sirovini [Estimation of metallurgical value of manganese raw materials]. *Visnik Priazovs'kogo Derzhavnogo Tekhnichnogo Universitetu. Seriya: Tekhnichni nauki – Reporter of the Priazovsky State Technical University. Section: Technical sciences*, 2021, № 42, pp. 43-50. doi: 10.31498/2225-6733.42.2021.240571. (Ukr.)
2. Grishchenko S.G., Proskurin T.P., Lyuborec I.I. Sovremennoe sostoyanie i perspektivy razvitiya dobychi i pererabotki margancevogo syr'ya v Ukraine [Current state and prospects for the development of extraction and processing of manganese raw materials in Ukraine]. *Stal' – Steel*, 1992, № 10, pp. 39-41. (Rus.)
3. Mostyka Yu.S. Kinetika mokroj vysokogradientnoj magnitnoj separacii [Kinetics of wet high-gradient magnetic separation]. *Zbagachennia korisnikh kopalin: naukovo-tekhnichnii zbirnik NGU – Enrichment of minerals: scientific and technical collection of NMU*, 2003, № 18(59), pp. 118-129. (Rus.)
4. Myanovs'ka Ya.V., Projdak Yu.S., Kamkina L.V. Peretvorenniya mineral'nih skladovih margancevih rud pri temperaturnih umovah formuvannya aglomeratu [Transformation of mineral components of manganese ores under temperature conditions of agglomerate formation]. *Teoriia i praktika metalurgii – Theory and Practice of Metallurgy*, № 3, 2019, pp. 42-51. doi: 10.34185/tpm.3.2019.07. (Ukr.)
5. Petrov A.V. *Tekhnologiya termicheskoy obrabotki i okuskovaniya margancevyh koncentratov: monografiya* [Technology of heat treatment and agglomeration of manganese concentrates: monograph]. Krivoj Rog, Izd. R.A. Kozlov Publ., 2019. 519 p. (Rus.)
6. Tolstoguzov N.V. *Teoreticheskie osnovy i tekhnologiya plavki kremnistyh i margancevyh splavov* [Theoretical foundations and technology for melting silicon and manganese alloys]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1992. 239 p. (Rus.)

Рецензент: В.Й. Засельський,
д-р техн. наук, проф., ННТІ ДУЕТ

Стаття надійшла 15.09.2021