

УДК 669:162.1

Бочка В.В., Ягольник М.В., Сова А.В., Фурсов М.О., Маленко К.І., Бойко М.М.

Дослідження агломерації залізної руди при використанні роздільної підготовки шихти

Bochka V.V., Yagolnyk M.V., Sova A.V., Fursov M.O., Malenko K.I., Boyko M.M.

Investigation of iron ore sintering using separate charge preparation

Мета. Підвищення якості залізородної частини доменної шихти є одним з найбільш ефективних заходів, які дозволяють збільшити продуктивність доменних печей і знизити питому витрату коксу. Основними причинами руйнування агломерату при транспортуванні та завантаженні у доменну піч є низька міцність його мінералогічних сполук, які зв'язують блоки в структурі, а також високий рівень внутрішнього напруження, яке виникає у спеченці під час його кристалізації та охолодження. Формування якості агломерату в цих умовах, здійснюється на кожній стадії його виробництва. Метою даного дослідження є розробка способу огрудування агломераційної шихти, який дозволить формувати гранули заданого гранулометричного та мінералогічного складу, створивши умови для отримання агломерату блочної структури високої міцності. Методика. Теоретичне та експериментальне обґрунтування можливості формування агломерату заданого складу та властивостей на етапі підготовки шихти до спікання проведено за допомогою програмного комплексу HSC. Проведено дослідження способів підготовки агломераційної шихти з використанням попередньо підготовлених композитів на основі концентрату. Результати. Залежність величин вільної енергії Гоббса від температури показала вірогідність утворення в даному середовищі зв'язки з фаяліту, деяких залізо-кальцієвих олівінів і феритів кальцію. Як показало дослідження ентальпії, утворення усіх мінералів характеризується екзотермічним ефектом. Лише в діапазоні температур 1473-1673 K формування $2\text{FeO}\cdot\text{SiO}_2$ та однокальцієвого фериту відбувається в ендотермічних умовах. Отримані в роботі результати підтвердили позитивний вплив роздільної підготовки на однорідність крупності сирих гранул: збільшується їх еквівалентний діаметр; зменшується вміст фракції 0-1 мм; зменшується середньо-квадратичне відхилення та коефіцієнт варіації їх крупності. Збільшення вмісту фракції +10 мм, яка негативно впливає на спікання, відбувається через наявність крупних часток руди та звороту. Серед використаних дво- та трикомпонентних композитів слід відзначити позитивний вплив додавання флюсів до концентрату та руди. Найкращу якість агломерату отримали після використання чотирикомпонентного композиту з «концентрату — руди — вапна — вапняку». Для покращення ефективності роздільної підготовки, прийнято рішення розділити руду на фракції: 0-3 мм, яка подаватиметься до композиту, та 3-10 мм, яка буде використовуватися у залишковій шихті. Наукова новизна. Встановлено механізм впливу різ-

них методів огрудування шихтових матеріалів на формування міцної зв'язки, що пов'язане з утворенням залізочальцієвих олівінів та феритів кальцію, покращення однорідності хімічного складу, зменшення в структурі неспечених компонентів і силікатних озер. Практична значущість. Запропонована в роботі схема підготовки шихти дозволяє формувати склад і основність самого композиту та залишкової частини шляхом зміни вмісту вапняку між ними. Спікання агломераційної шихти, підготовленої запропонованим способом, дозволяє збільшити вихід придатного агломерату на 10,25% та зменшити вміст фракції 0-5 мм після випробування на міцність на 11,5%.

Ключові слова: залізородний агломерат, спікання, роздільна підготовка, фазовий склад, огрудування.

Purpose. Improving the quality of the iron ore part of the blast furnace charge is one of the most effective measures to increase the productivity of blast furnaces. The main reasons for the destruction of the agglomerate during transportation and loading into the blast furnace are the low strength of its mineralogical compounds that bind the blocks in the structure, as well as the high level of internal stress that occurs in the sinter during its crystallization and cooling. Formation of the quality of agglomerate under these conditions is carried out at each stage of its production. The purpose of this research is to develop a method of coagulation of the sintering charge for the formation of granules of a given granulometric and mineralogical composition. This will create conditions for obtaining agglomerate block structure of high strength. Methodology. Theoretical and experimental substantiation of the possibility of forming agglomerate of the given composition and properties at the stage of preparation of the charge for sintering was carried out with the help of the HSC software complex. Methods of preparation of sintering charge using pre-prepared concentrate-based composites have been researched. Findings. The dependence of the Hobbs free energy values on the temperature showed the probability of the formation of bonds from fayalite, some iron-calcium olivines, and calcium ferrites in this environment. Only in the temperature range of 1473-1673 K, the formation of $2\text{FeO}\cdot\text{SiO}_2$ and monocalcium ferrite occurs under endothermic conditions. The results obtained in the work confirmed the positive effect of separate preparation on the homogeneity of raw granule size: their equivalent diameter increases; the content of the 0-1 mm fraction decreases; the mean square deviation and the coefficient of variation

of their size decrease. The increase in the content of the +10 mm fraction, which has a negative effect on sintering, occurs due to the presence of large particles of ore and tailings. Among the two- and three-component composites used, the positive effect of adding fluxes to the concentrate and ore should be noted. The best quality of agglomerate was obtained after using a four-component composite of "concentrate - ore - lime - limestone". To improve the efficiency of separate preparation, it was decided to divide the ore into fractions: 0-3 mm, which will be fed to the composite, and 3-10 mm, which will be used in the residual charge. Originality. The mechanism of the effect of different methods of lumping of charge materials on the formation of a strong bond, which is asso-

Вступ

Підвищення якості залізородної частини доменної шихти є одним з найбільш ефективних заходів, які дозволяють збільшити продуктивність доменних печей і знизити питому витрату коксу. Агломерат є основним залізозмісним компонентом доменної шихти при виробництві чавуну. Він представляє собою антропогенний, багатоконпонентний матеріал, куски якого включають в себе систему округлих згустків речовини розміром 3-30 мм, названих блоками, та розташовані між ними зв'язуючі крихкі частини зі склоподібних фаз і великі пори неправильної форми. Технологія виробництва такого агломерату передбачає виконання наступних операцій: зважування компонентів шихти; їх змішування; зволоження суміші та огрудкування, а також спікання огрудкованої шихти [1]

Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Основними причинами руйнування агломерату при транспортуванні та завантаженні у доменну піч є низька міцність його мінералогічних сполук, які зв'язують блоки в структурі, а також високий рівень внутрішнього напруження, яке виникає у спеченці під час його кристалізації та охолодження. Формування якості агломерату в цих умовах, здійснюється на кожній стадії його виробництва. Існуюча технологія передбачає реалізацію комплексу заходів з підготовки агломераційної шихти, її спікання та подальшої механічної обробки спеченого продукту [2].

Слід зазначити, що колювання складу агломераційної шихти та якості її підготовки, відхилення від норми технологічних параметрів спікання та низька ефективність механічної обробки спеченого продукту не дозволяють отримувати агломерат високої якості. Вироблений за даною технологією агломерат характеризується значною неоднорідністю мінералогічного, хімічного та гранулометричного складу і невисокою міцністю [3]. Це висуває необхідність розробки нових шляхів удосконалення підготовки агломераційної шихти до спікання.

ciated with the formation of iron-calcium olivines and calcium ferrites, improvement of the homogeneity of the chemical composition, and a decrease in the structure of unsintered components and silicates, has been established. Practical value. The scheme of charge preparation proposed in the work makes it possible to shape the composition and basicity of the composite itself and the residual part by changing the limestone content between them. Sintering of the sintering charge prepared by the proposed method allows to increase the yield of suitable agglomerate by 10.25% and reduce the content of the 0-5 mm fraction after the strength test by 11.5%.

Keywords: iron ore agglomerate, sintering, separate preparation, phase composition, granulation.

Одним з напрямків вирішення цієї проблеми є використання до спікання роздільного огрудкування компонентів шихти. При такому способі огрудкування шихти її компоненти розділяють на окремі групи. В роботі [4] наведена двостадійна технологія грануляції, при якій 70% шихти зволожували з надлишком вологи та гранулювали в малому барабані, а після цього на цю шихту накочували залишкову шихту. Така маніпуляція з компонентами шихти за думкою авторів позитивно впливала на гранулометричний склад отриманих гранул. В роботах [5,6] підтверджено позитивний вплив роздільного огрудкування на підготовку шихти. В цьому випадку утворення гранул в барабані суттєво покращується без додавання у початкову шихту палива. В роботі [7] показано, що підвищити газопроникність шихти можливо в спеціальному барабані, в першій частині простору якого утворюються зародки гранул крупністю 2-2,6 мм, а в другій частині здійснюється накат н зародки усієї іншої шихти.

Наведені способи роздільного огрудкування не мають достатнього теоретичного і технологічного обґрунтування, в результаті чого вони не мають широкого розповсюдження на практиці.

Мета і завдання досліджень

Метою даного дослідження є розробка способу огрудкування агломераційної шихти, який дозволить формувати гранули заданого гранулометричного та мінералогічного складу, створивши умови для отримання агломерату блочної структури високої міцності.

Матеріали та методи дослідження

Теоретичне та експериментальне обґрунтування можливості формування агломерату заданого складу та властивостей на етапі підготовки шихти до спікання проведено за допомогою програмного комплексу HSC [8]. Виконано термодинамічний аналіз вірогідності утворення різних мінералів в семикомпонентній системі (Fe, Si, Ca, Mg, Al, O, C), яка відповідає в цілому складу агломераційної

шихти, та залежність фазового складу від її основності та інших факторів.

Проведено дослідження способів підготовки агломераційної шихти з використанням попередньо підготовлених композитів на основі концентрату. Воно складалося з двох етапів. На першому етапі вивчали вплив вологи на грудкування різних композитів із компонентів шихти фракцією 40-63 мікрон, щоб унеможливити вплив їхньої крупності на капілярні явища. На другому етапі досліджено вплив роздільної підготовки шихти з використанням композитів різного складу на якість сирих гранул й агломерату.

Результати дослідження

Залежність величин вільної енергії Гіббса від температури показала вірогідність утворення в даному середовищі зв'язки з фаяліту, деяких залізо-кальцієвих олівінів і феритів кальцію. Як показало дослідження ентальпії, утворення усіх мінералів характеризується екзотермічним ефектом. Лише в діапазоні температур 1473-1673 К формування $2\text{FeO}\cdot\text{SiO}_2$ та однокальцієвого фериту відбувається в ендотермічних умовах.

На рис. 1 представлений фазовий склад, розрахований для шихти основності 1,3 од.. Міжблокова зв'язка представлена в основному залізокальцієвим олівіном ($\text{CaO}\cdot 0,5\text{FeO}\cdot 1,5\text{SiO}_2$), фаялітом ($2\text{FeO}\cdot\text{SiO}_2$ та FeSiO_3), та в незначній мірі феритами кальцію ($\text{CaO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ та $2\text{CaO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$).

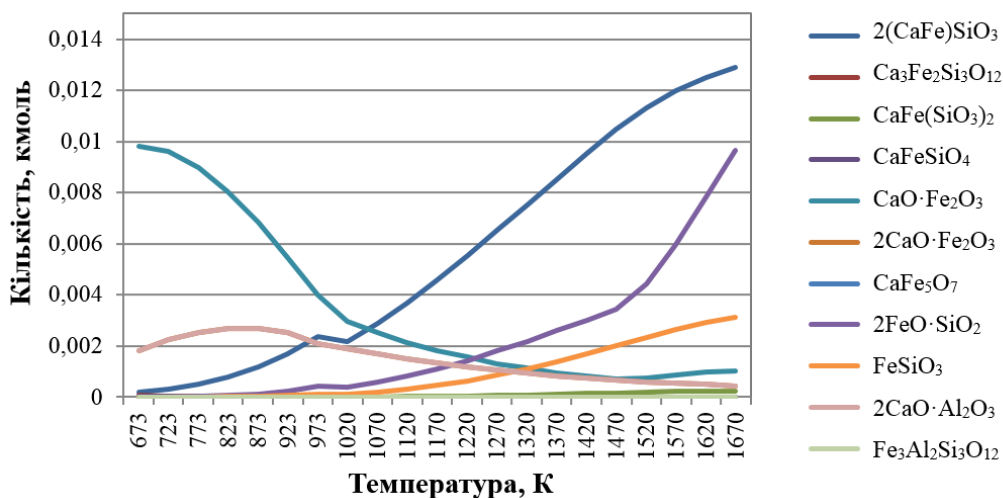


Рис. 1. Залежність фазового складу семикомпонентної системи основності 1.3 од. від температури.

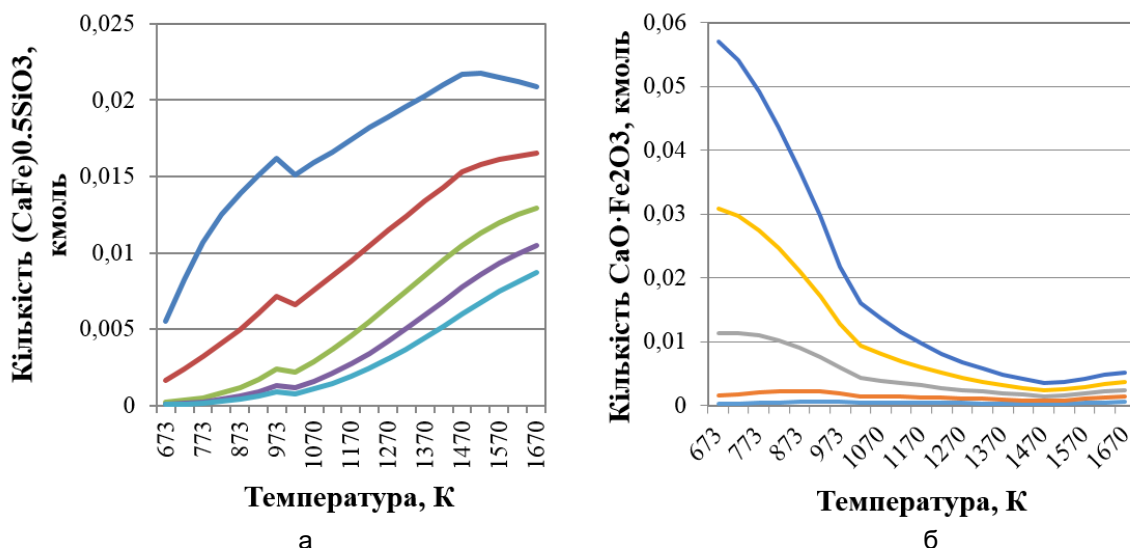


Рис. 2. Залежність формування залізокальцієвих олівінів (а) і феритів кальцію (б) від температури при різних показниках основності.

Теоретичними розрахунками підтверджено вплив основності на формування в агломераті міцних зв'язуючих компонентів: залізокальцієвих олівінів та феритів кальцію (рис. 2). Кількість оліві-

нів (рис. 2а) збільшується при зменшенні основності до 0,9-1,0 од.; поява феритів кальцію (рис. 2б) потребує збільшення основності до 1,6-1,7 од.

Теоретичний аналіз впливу різних факторів на фазовий склад агломерату привів до висновку, що створення умов для виникнення блокової структури з міцною зв'язкою можливе шляхом роздільної підготовки шихти основністю 0,9-1,0 та 1,6-1,7 од.. Це можливо забезпечити формуванням всіх її компонентів композиту та залишкової частини заданих складів і властивостей.

Як видно з рис. 3, склад композиту в значній мірі впливає на зміну висоти капілярного просочування та грудкування шихти. Нерівномірність зміни висоти капілярного просочування для кожного

складу суміші можна пояснити нестабільністю поверхневих властивостей матеріалів в композиті, зміною ефективного радіуса капіляра та іншими факторами. Найкращі за рівномірністю показники просочування вологи належать композиту з концентрату, руди та вапняку (3б) завдяки взаємодії компонентів з різною поверхневою активністю. Це дозволяє обґрунтувати ефективність роздільної підготовки шихти, під час якої гранули формуються не лише навколо крупних кусків руди та звороту, а й завдяки взаємодії дрібних компонентів з активними властивостями поверхні.

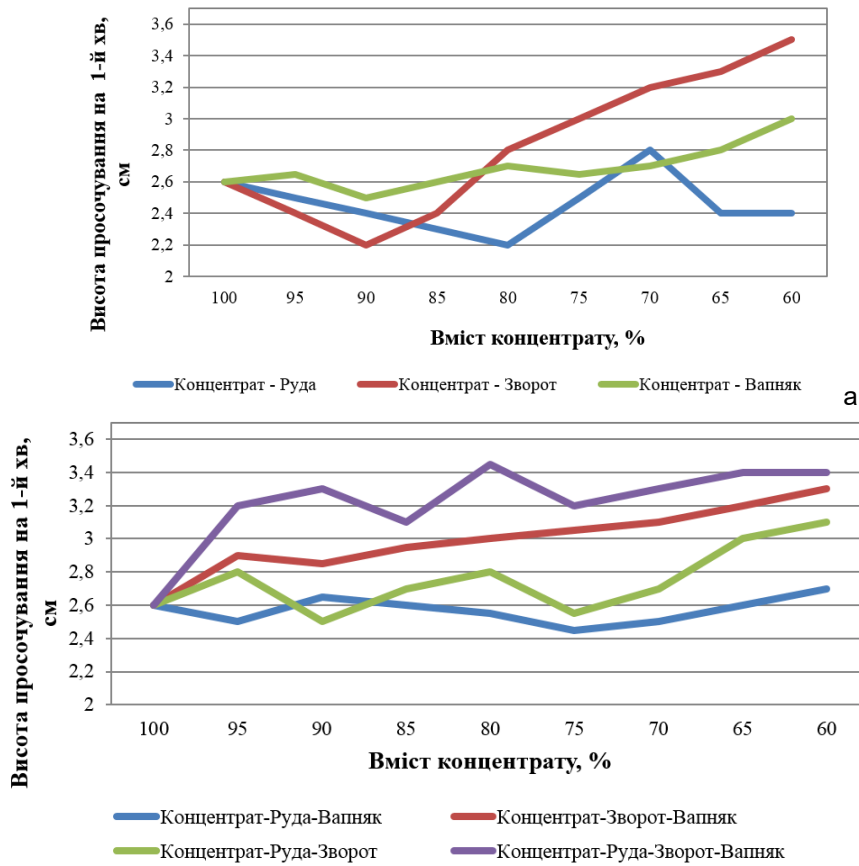


Рис. 3. Вплив складу двокомпонентних (а) і багатоконпонентних (б) сумішей на висоту просочування.

З компонентів реальної агломераційної шихти (табл. 1) основністю 1.27 од. попередньо готували дво-, три- та чотирикомпонентні композити на основі концентрату, до яких потім додавали залиш-

кові компоненти для остаточного грудкування. Сумарна витрата води на кожне спікання становила 9% від загальної маси шихти.

Таблиця 1
Склад шихти

Склад шихти	Концентрат (К)	Залізна руда (Р)		Зворот (З)	Вапно (Во)	Вапняк (Вк)	Кокс (Кс)	Загалом
		0-3	3-10					
Крупність, мм	0-3	0-3	3-10	0-10	0-3	0-3	0-3	
Маса, %	50	6,5	3,5	25	4	5	6	100

З компонентів реальної агломераційної шихти (табл. 1) основністю 1.27 од. попередньо готували дво-, три- та чотирикомпонентні композити на основі концентрату, до яких потім додавали залиш-

кові компоненти для остаточного грудкування. Сумарна витрата води на кожне спікання становила 9% від загальної маси шихти.

Отримані результати (табл. 2) підтвердили позитивний вплив роздільної підготовки на однорідність крупності сирих гранул: збільшується їх екві-

валентний діаметр; зменшується вміст фракції 0-1 мм; зменшується середньо-квадратичне відхилення та коефіцієнт варіації їх крупності. Збільшення

вмісту фракції +10 мм, яка негативно впливає на спікання, відбувається через наявність крупних часток руди та звороту.

Таблиця 2
Показники крупності гранул при різних способах підготовки шихти

Варіант підготовки шихти	Вміст фракції, %						d _{екв} , мм	Середньо-квадратичне відхилення	Коефіцієнт варіації	
	+ 10 мм	7-10 мм	5-7 мм	3-5 мм	1-3 мм	0-1 мм				
Сумісна	0,05	0,09	0,09	0,14	0,50	0,14	3,38	0,17	0,99	
Роздільна, з використанням композиту	КР	0,31	0,18	0,11	0,15	0,23	0,01	6,45	0,10	0,62
	КВо	0,23	0,11	0,09	0,13	0,40	0,03	5,17	0,13	0,80
	КВк	0,29	0,11	0,10	0,16	0,32	0,01	5,77	0,12	0,70
	КРЗ	0,22	0,13	0,09	0,14	0,38	0,04	5,15	0,12	0,71
	КРВо	0,15	0,13	0,13	0,17	0,41	0,01	4,94	0,13	0,78
	КРВк	0,35	0,08	0,10	0,10	0,33	0,04	5,84	0,14	0,82
	КЗВо	0,24	0,10	0,08	0,12	0,43	0,03	5,06	0,15	0,87
	КЗВк	0,04	0,12	0,11	0,13	0,56	0,04	3,71	0,20	1,19
	КВоВк	0,20	0,10	0,11	0,16	0,40	0,01	5,06	0,13	0,79
	КРЗВк	0,08	0,14	0,12	0,13	0,47	0,05	4,21	0,15	0,91
	КРЗВо	0,14	0,14	0,10	0,15	0,45	0,02	4,66	0,15	0,88
	КРВоВк	0,26	0,10	0,12	0,16	0,35	0,01	5,51	0,12	0,73
	КЗВоВк	0,32	0,14	0,10	0,19	0,23	0,01	6,22	0,11	0,64

Обговорення результатів

Використання роздільної підготовки шихти неоднозначно впливає на процес спікання та якість агломерату (табл. 3). Серед використаних дво- та трикомпонентних композитів слід відзначити позитивний вплив додавання флюсів до концентрату

та руди. Найкращу якість агломерату отримали після використання чотирикомпонентного композиту з «концентрату — руди — вапна — вапняку». Для покращення ефективності роздільної підготовки, прийнято рішення розділити руду на фракції: 0-3 мм, яка подаватиметься до композиту, та 3-10 мм, яка буде використовуватися у залишковій шихті.

Таблиця 3
Показники якості агломерату при різних варіантах підготовки шихти

Вихід агломерату, %	Варіант підготовки шихти														
	Роздільна, з використанням наведеного композиту														
	У	М	О	З	С	У	М	О	З	С	У	М	О	З	С
Після спікання (+10 мм)	71,8	70,9	73,6	80,9	69,2	78,3	74,1	75,3	59,1	74,4	68,2	67	72,9	81	
Після випробування на міцність (+5 мм)	83	85	88	87	82,2	87	89,1	90	83,6	84,5	88	87	87,5	92	

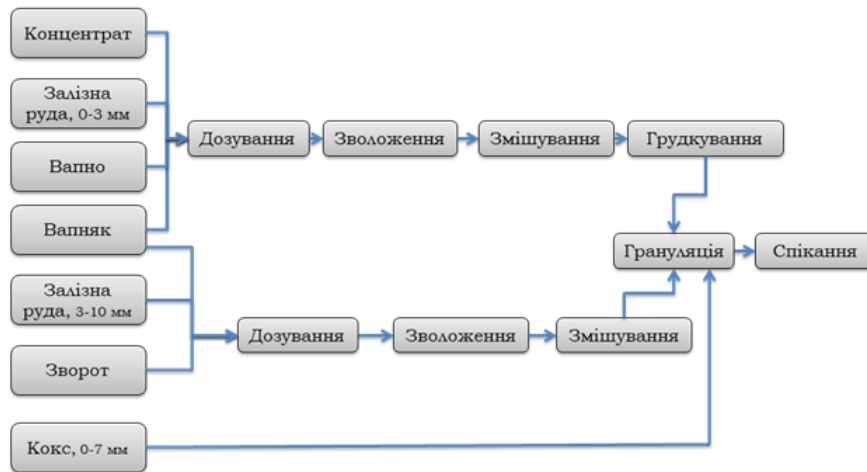


Рис. 4. Запропонована схема підготовки агломераційної шихти

Запропонована схема підготовки шихти (рис. 4) дозволяє формувати склад і основність самого композиту та залишкової частини шляхом зміни вмісту вапняку між ними.

Таблиця 4

Показники якості агломерату при різних способах підготовки композиту та залишкової шихти

Основність композиту/залишкової шихти, од.	Вихід придатного агломерату, +10 мм, %	Вихід агломерату після випробування на міцність, +5 мм, %	Вміст в агломераті фракції 0-5 мм, %
0,95/1,71	82,05	94,5	5,5
1,05/1,59	80,04	91,7	8,3
1,15/1,45	77,15	89,2	10,8
1,25/1,32	72,2	82,5	17,5

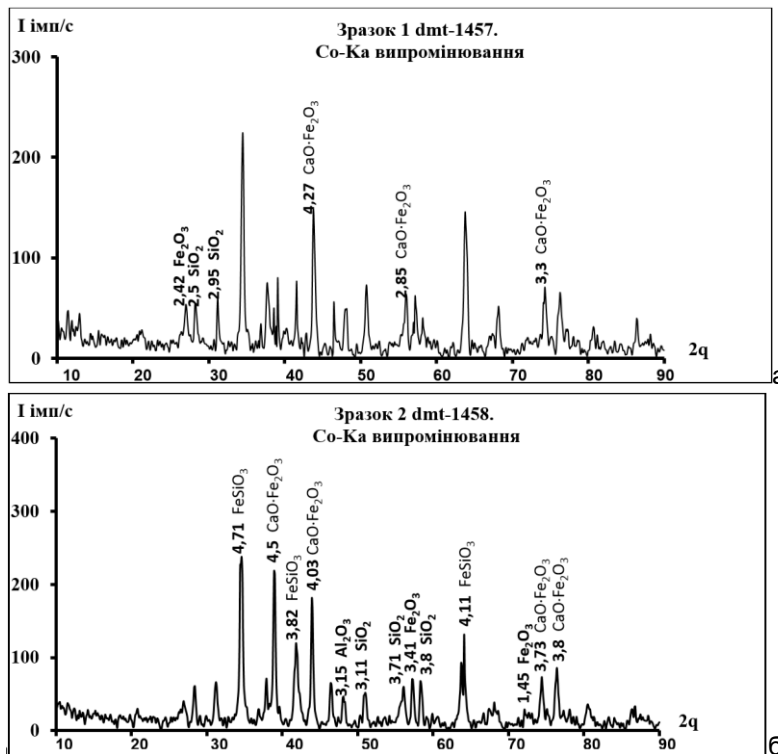


Рис.5. Дифрактограми агломератів, спечених після сумісної підготовки шихти (а) та після підготовки шихти з використанням композиту з «КРВоВк» (б)

Дослідження показали (табл. 4), що найкраща якість агломерату досягається при спіканні шихти, підготовленої з використанням композиту «КРВоВк», кількість вапняку у якому забезпечує

основність на рівні 0,9-1,0 од., а в залишковій шихті - 1,6-1,8 од.. Таким чином створюються сприятливі умови для формування міцної зв'язки з залізокальцієвих олівінів та феритів кальцію, покращення однорідності хімічного складу, зменшення в структурі неспечених компонентів і силікатних озер (рис 5).

Спикання агломераційної шихти, підготовленої запропонованим способом, дозволяє збільшити вихід придатного агломерату на 10,25% та зменшити вмісту фракції 0-5 мм після випробування на міцність на 11,5%.

Висновки

1. В результаті проведення дослідження встановлена висока ефективність роздільного грудкування

вання шихти з використанням композитів заданого складу.

2. Запропоновано спосіб роздільного грудкування з використанням композиту з концентрату, залізної руди крупністю 0-3 мм, вапна та вапняку, основність якого складатиме 0,9-1,0 од. Технологія передбачає дозування, змішування та грудкування даного композиту, при цьому залишкова шихта основністю 1,6-1,8 од., дозується та змішується паралельно. Після цього відбувається спільна грануляція композитів в грануляторі. Паливо крупністю 0-7 мм подається наприкінці грануляції.

3. Впровадження запропонованої технології дає можливість збільшити виробництво придатного агломерату на 10,29% і фракції + 5 мм на 11,5% після випробування на міцність.

Бібліографічний опис

1. Iron Ores and Iron Oxide Materials. V. Shatokha. BoD – Books on Demand (2018) 280.
2. German RM. Sintering: From Empirical Observations to Scientific Principles. New York: Elsevier Butterworth-Hein (2014) 342.
3. Ammasi Ayyandurai, Jagannath Pal. (2022) Blast Furnace Flue Dust as a Potential Carbon Additive in Hematite Ore Pellet. Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review 43:5, 633-647.
4. D. Fernández-González, I. Ruiz-Bustinza, J. Mochón, C. González-Gasca & L. F. Verdeja (2017) Iron Ore Sintering: Process, Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review, 38:4, 215-227, DOI: 10.1080/08827508.2017.1288115.
5. V. V. Bochka V. V. Bochka A. V. Sova A. V. Sova (2018) Choise of the production technology for the complex flux, Metallurgical and Mining Industry, № 1, 8-14.
6. Yu-xiao Xue, Jian Pan, De-qing Zhu, Xin Wang, Bo-hua Li, Wei Liu. (2023) Difference of sintering performance of different types of limonitic nickel laterite. Journal of Iron and Steel Research International 30:1, 21-30.
7. D. Fernández-González, I. Ruiz-Bustinza, J. Mochón, C. González-Gasca & L. F. Verdeja (2017) Iron Ore Sintering: Raw Materials and Granulation, Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review, 38:1, 36-46, DOI: 10.1080/08827508.2016.1244059
8. Wang, W., Chen, X., Xu, R. et al. (2020) Research progress on multiscale structural characteristics and characterization methods of iron ore sinter. J. Iron Steel Res. Int. 27, 367–379. <https://doi.org/10.1007/s42243-020-00374-4>.
9. Mathematical Model Hschemystry 6.0 (2014) Finland.

References

1. Iron Ores and Iron Oxide Materials. V. Shatokha. BoD – Books on Demand (2018) 280.
2. German RM. Sintering: From Empirical Observations to Scientific Principles. New York: Elsevier Butterworth-Hein (2014) 342.
3. Ammasi Ayyandurai, Jagannath Pal. (2022) Blast Furnace Flue Dust as a Potential Carbon Additive in Hematite Ore Pellet. Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review 43:5, 633-647.
4. D. Fernández-González, I. Ruiz-Bustinza, J. Mochón, C. González-Gasca & L. F. Verdeja (2017) Iron Ore Sintering: Process, Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review, 38:4, 215-227, DOI: 10.1080/08827508.2017.1288115.
5. V. V. Bochka V. V. Bochka A. V. Sova A. V. Sova (2018) Choise of the production technology for the complex flux, Metallurgical and Mining Industry, № 1, 8-14.
6. Yu-xiao Xue, Jian Pan, De-qing Zhu, Xin Wang, Bo-hua Li, Wei Liu. (2023) Difference of sintering performance of different types of limonitic nickel laterite. Journal of Iron and Steel Research International 30:1, 21-30.
7. D. Fernández-González, I. Ruiz-Bustinza, J. Mochón, C. González-Gasca & L. F. Verdeja (2017) Iron Ore Sintering: Raw Materials and Granulation, Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review, 38:1, 36-46, DOI: 10.1080/08827508.2016.1244059
8. Wang, W., Chen, X., Xu, R. et al. (2020) Research progress on multiscale structural characteristics and characterization methods of iron ore sinter. J. Iron Steel Res. Int. 27, 367–379. <https://doi.org/10.1007/s42243-020-00374-4>.
9. Mathematical Model Hschemystry 6.0 (2014) Finland.