

РОЗРОБКА РЕКОМЕНДАЦІЙ ЩОДО ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ОГРУДКУВАННЯ АГЛОМЕРАЦІЙНИХ ШИХТ

Анотація. У статті представлені результати дослідження сукупного впливу еквівалентного діаметра і коефіцієнта варіації крупності гранул шихти на порізність шару. Вперше запропоновано новий структурний показник, який може бути використаний при оцінці підготовленості шихт до спікання. Розроблено рекомендації щодо підвищення ефективності огрудкування агломераційних шихт.

Ключові слова: огрудкування агломераційної шихти, еквівалентний діаметр, коефіцієнт варіації крупності, порізність, структурний показник.

Проблема і її зв'язок з науковими і практичними задачами

На сьогоднішній день значна частина сировинної бази чорної металургії утворена концентратами збагачення і дрібнофракційними промисловими відходами, які потребують ефективного окускування [1].

З трьох промислово застосовуваних способів окускування залізорудної сировини (агломерація, виробництво обкотишів і брикетування) найбільшого поширення набув перший. Частка агломерату в шихті доменних печей становить 80% і більше [2]. Залізорудний агломерат в найбільшій мірі відповідає комплексу вимог, що пред'являються до доменної сировини [3], але, у зв'язку з обмеженою ефективністю процесу огрудкування аглошихти перед спіканням, даний спосіб не дозволяє переробляти шихту, залізорудна частина якої повністю складається з дрібнодисперсних матеріалів. Тому у сучасному агломераційному процесі широке застосування знаходять методи посиленої підготовки шихти до спікання [4]. Для вдосконалення цих

методів суттєве значення має визначення та використання показників оцінки підготовленості огрудкованої шихти до спікання.

Аналіз досліджень і публікацій

Оскільки огрудкування формує гранулометричний склад шихти і таким чином впливає на структуру її шару, то для оцінки та підвищення ефективності огрудкування необхідне визначення і використання відповідних структурних показників. Детальний опис структури шару, з урахуванням всіх характеристик часток і порових каналів виправданий при вирішенні вузькоспеціалізованих завдань, наприклад, при визначенні сумарної площі контакту частинок в шарі і т.п. Використання коефіцієнтів газодинамічного опору, що входять в основні рівняння руху газів в шарі вимагає проведення значної кількості трудомістких експериментальних вимірювань [5,6].

Постановка завдання

Метою даного дослідження є визначення зручних у розрахунку показників оцінки підготовленості шихти до агломерації та застосування їх для підвищення ефективності процесу огрудкування.

Виклад матеріалу й результати

Для умов агломераційного виробництва доцільно вважати шар вихідної шихти насипним і розглядати його як однорідне ізотропне середовище, усередненою газодинамічною характеристикою якої є частка незайнятого гранулами об'єму шару, тобто його порізність. За винятком випадків, коли об'ємна частка дріб'язку фракції 0-2 мм перевищує 40%, збільшення порізності сприяє зростанню газопроникності шару [6] і свідчить про підвищення ефективності процесу огрудкування шихти.

Порізність реального шару огрудкованої агломераційної шихти залежить від величини структурних показників: еквівалентного діаметру гранул d_{eq} , мм та ступеня однорідності розподілу гранулометричного складу шихти. В якості характеристики однорідності розподілу гранулометричного складу прийняли коефіцієнт варіації крупності гранул V_d , мм/мм, який дозволяє оцінити розподіл фракцій різних діаметрів відносно d_{eq} . Зі збільшенням значення коефіцієнта V_d , зростає відносна величина розкиду значень діаметрів гранул. Для визначення d_{eq} і V_d використовували формули розрахунку середньозважених значень цих величин [7]:

$$d_{eq} = \sum_{i=1}^N q_i \cdot d_i, \quad (1)$$

$$V_d = \sqrt{\sigma_d^2 / d_{eq}} = \sqrt{\sum_{i=1}^N (d_i - d_{eq})^2 / d_{eq}}, \quad (2)$$

де: q_i – вміст гранул i -ої фракції, долі.од.; d_i – діаметр гранул i -ої фракції, мм; N – кількість фракцій; σ_d^2 – середньозважена дисперсія, мм².

Оскільки крупність огруdkованої агломераційної шихти знаходиться в межах від 0 мм до 10-12 мм, то для дослідження впливу d_{eq} та V_d на величину порізності шару використовували шихти, складені з відсіву обпалених залізородних обкотишів фракції 0-10 мм, а також дані експериментальних досліджень, наведені в роботі С.В.Кривенко [8]. Гранулометричний склад шихт, еквівалентний діаметр d_{eq} , коефіцієнт варіації крупності гранул V_d і порізність шару ε , представлені в таблиці 1.

Таблиця 1

Характеристики структури шару вихідної шихти

Вміст фракцій, долі од.						d_{eq} , мм	V_d , мм/мм	ε , %
0,5-1мм	1-2 мм	2-3 мм	3-5 мм	5-7 мм	7-10 мм			
0,6	0,4					1	0	41,8*
	1					1,5	0	42,9
		1				2,5	0	46,3
			1			4	0	47,75
				1		6	0	49,6
					1	8,5	0	46*
0,67	0,33					0,99	0,35	41,2
	0,5	0,5				2	0,25	39,9
		0,365	0,365	0,27		3,99	0,34	37,3
0,1	0,065		0,67		0,165	4,32	0,54	36*
		0,27	0,27	0,46		4,51	0,33	38,9
		0,18	0,18	0,64		5,01	0,28	38,8
		0,09	0,09	0,82		5,51	0,2	39,9
			0,67		0,33	5,67	0,42	38,4
			0,355	0,355	0,29	6,02	0,3	40,2
				0,6	0,4	7	0,17	40,9
			0,33		0,67	7,33	0,32	42,3*
				0,2	0,8	8	0,12	42,25
0,4	0,27		0,33			2,01	0,71	39*

0,4	0,27		0,165		0,165	2,78	1,06	33,8*
0,24	0,16		0,45		0,15	3,55	0,75	31*
0,4	0,27				0,33	3,67	1,03	32,4*
0,198	0,132		0,34		0,33	4,66	0,71	27,5*
0,27	0,18		0,15		0,4	4,65	0,79	29,2*
0,3	0,2				0,5	5	0,8	29,8*
0,24	0,16		0,15		0,45	5,05	0,73	28,7*
0,2	0,13				0,67	6,33	0,6	27,8*

* - дані експериментальних досліджень, наведені в роботі [8].

Аналіз отриманих даних дозволив виділити в діапазоні крупності огрудкованої агломераційної шихти від 0 мм до 10 мм три групи значень коефіцієнта варіації крупності гранул V_d , які відповідають різному ступеню полідисперсності шихти і відрізняються характером сукупного впливу d_{eq} та V_d на порізність шару (рис. 1). Отриманий аналітичний опис залежності порізності шару від d_{eq} і V_d для трьох груп значень коефіцієнта V_d :

$$\varepsilon_{0-0,2} = -0,3384 \cdot d_{eq}^2 - 3,8708 \cdot d_{eq} + 38,189 \cdot R^2 = 0,9709, (3)$$

$$\varepsilon_{0,2-0,7} = 0,3176 \cdot d_{eq}^2 - 2,6027 \cdot d_{eq} + 43,409 \cdot R^2 = 0,9709, (4)$$

$$\varepsilon_{0,7-1} = 0,7108 \cdot d_{eq}^2 - 8,3223 \cdot d_{eq} + 52,272 \cdot R^2 = 0,9709, (5)$$

де: $\varepsilon_{0-0,2}$, $\varepsilon_{0,2-0,7}$, $\varepsilon_{0,7-1,0}$ – порізність шару, складеного з шихт першої, другої і третьої груп значень коефіцієнта V_d , відповідно; R^2 – коефіцієнт достовірності апроксимації експериментальних даних.

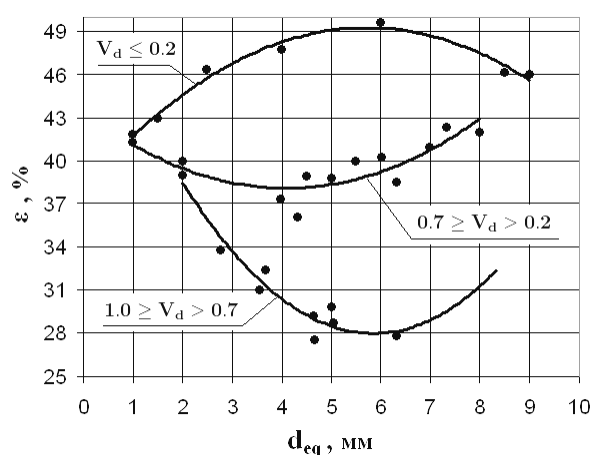


Рисунок 1 - Залежність порізності шару ε від еквівалентного діаметру d_{eq} та коефіцієнту варіації крупності гранул шихти V_d

Перша група: $V_d \leq 0,2$. Шихти характеризуються максимальним ступенем однорідності гранулометричного складу. Верхня межа діапазону ($V_d=0$) відповідає повністю монодисперсній шихті, тобто такий шихті, в якій розміри всіх гранул однакові.

Друга група $0,7 \geq V_d > 0,2$. Шихти з проміжним ступенем однорідності гранулометричного складу. Більшість шихт знаходяться саме в цьому діапазоні значень коефіцієнта V_d .

Третя група $1,0 \geq V_d > 0,7$. Максимально неоднорідні шихти. Нижня межа діапазону ($V_d = 1,0$) відповідає найбільшому, із досягнутих в даному дослідженні, ступеню полідисперсності шихти.

Проаналізувавши криві залежності порізности шару ε від еквівалентного діаметра d_{eq} для трьох груп значень коефіцієнта V_d (рис.1), прийшли до наступних висновків.

Для умовно монофракційних шихт першої групи ($V_d \leq 0,2$), крива порізности має вигляд випуклої параболи з максимумом в точці $\varepsilon = 49,6\%$, що відповідає $d_{eq} = 6$ мм. Зростання порізности на ділянці кривої від $d_{eq} = 1$ мм до $d_{eq} = 6$ мм, вочевидь, обумовлене закономірним зростанням об'єму порожнин між гранулами по мірі збільшення еквівалентного діаметру гранул. Подальше зниження порізности на ділянці кривої від $d_{eq} = 6$ мм до $d_{eq} = 9$ мм, ймовірно, викликано збільшенням щільності укладки гранул в шарі. Можлива причина цього явища може полягати в тому, що зі зростанням еквівалентного діаметру гранул зменшується площа їх поверхні, а значить, знижується сумарна площа контакту між гранулами і, отже, зменшується ефект дії сил зчеплення гранул між собою, що полегшує їх взаємне переміщення при формуванні шару і може сприяти більш щільній укладці.

Криві порізности для поліфракційних шихт другої ($0,7 \geq V_d > 0,2$) і третьої груп ($1,0 \geq V_d > 0,7$) мають вигляд увігнутих парабол. Область мінімальних значень порізности ($\varepsilon \approx 36-38\%$) для шихт другої групи відповідає еквівалентному діаметру гранул від 3 мм до 5 мм; аналогічна область найменших значень порізности ($\varepsilon \approx 27 - 29\%$) для шихт третьої групи припадає на діапазон d_{eq} від 5 мм до 7 мм.

Поведінка кривих порізности для розглянутих груп шихт ($0,7 \geq V_d > 0,2$ і $1,0 \geq V_d > 0,7$) збігається з наявними уявленнями про характер впливу вмісту дріб'язку фр. 0-2 мм в суміші на порізність ша-

ру [6]. Оскільки величина еквівалентного діаметру гранул d_{eq} , хоч і не однозначно, але відображає вміст дрібних фракцій в суміші, то можемо припустити наступне. При зниженні значень d_{eq} від 8 мм до 3-5мм (друга група) і 5 -7 мм (третя група) відбувається падіння порізності шару, що, ймовірно, пояснюється збільшенням об'ємної частки дріб'язку в суміші. Області найменших значень порізності на досліджуваних кривих відповідають найбільш несприятливому, з точки зору газодинаміки шару, вмісту дріб'язку, коли гранули меншого діаметра максимально розташовуються в порожнинах між гранулами більшого діаметру і таким чином суттєво зменшують вільний об'єм. Після проходження мінімуму на кривих порізності відбувається зменшення еквівалентного діаметру гранул до 1-2 мм і подальше збільшення об'ємної частки дріб'язку, яка стає домінуючою фракцією, що призводить тепер до підвищення однорідності суміші і зростання порізності шару до $\varepsilon = 41,2\%$ (друга група) і $\varepsilon = 39\%$ (третя група).

З наведених вище даних слідує, що найбільша порізність шару досягається при максимальній однорідності розподілу гранулометричного складу шихти ($V_d \leq 0,2$) і еквівалентному діаметрі гранул d_{eq} від 4,5 мм до 6 мм. Однак зазначені діапазони величин V_d і d_{eq} потребують деякого уточнення.

Встановлено, що зі збільшенням діаметру гранул і однорідності розподілу гранулометричного складу геометрична питома поверхня суміші S_{geom} , $\text{м}^2/\text{м}^3$ істотно знижується. Так, якщо для шихти третьої групи ($1,0 \geq V_d > 0,7$) з $d_{eq} = 4$ мм величина S_{geom} склала $1,05 \cdot 10^3 \text{ м}^2/\text{м}^3$, то для шихти першої групи ($V_d \leq 0,2$) з $d_{eq} = 6$ мм величина S_{geom} знизилася до $0,5 \cdot 10^3 \text{ м}^2/\text{м}^3$, тобто майже вдвічі (рис. 2). Розрахунок геометричній питомої поверхні суміші виконували за методикою визначення сумарної поверхні частинок [9], перетвореною для обчислення S_{geom} :

$$S_{geom} = S_{gran} \cdot N, \quad (6)$$

$$S_{gran} = 4\pi R_{eq}^2, \quad (7)$$

$$N = \frac{V(1-\varepsilon)}{V_{gran}} = \frac{3(1-\varepsilon)}{4\pi R_{eq}}, \quad (8)$$

$$S_{geom} = \frac{3(1-\varepsilon)}{R_{eq}} = \frac{6000(1-\varepsilon)}{d_{eq}}, \quad (9)$$

де: S_{geom} - геометрична питома поверхня суміші, $\text{м}^2/\text{м}^3$; S_{gran} - площа поверхні гранули, м^2 ; N - число гранул в шарі, шт.; V - об'єм шару, м^3 , $V=1 \text{ м}^3$; V_{gran} - об'єм гранули, м^3 ; ε - порізність шару, доли од.; R_{eq} - еквівалентний радіус гранули, м; d_{eq} - еквівалентний (середньозважений) діаметр гранули, мм.

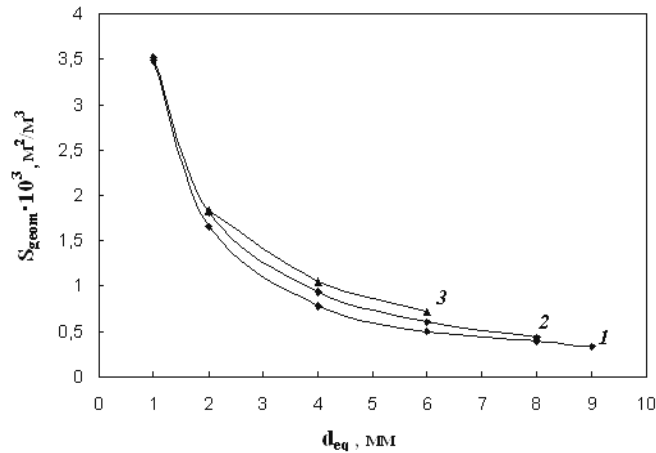


Рисунок 2 – Залежність геометричної питомої поверхні суміші S_{geom} від еквівалентного діаметру d_{eq} та коефіцієнту варіації крупності гранул V_d : 1 - $V_d \leq 0,2$; 2 - $0,7 \geq V_d > 0,2$; 3 - $1,0 \geq V_d > 0,7$

Зменшення питомої поверхні шихти призводить до погіршення умов конвективного теплообміну в шарі, знижує ефективність передачі тепла від газоподібних продуктів горіння твердого палива до шихти; крім того, розміри зон горіння палива і формування агломерату збільшуються, а температура в них падає. Спільна дія вказаних чинників негативно впливає на процеси мінералоутворення, призводить до зниження механічної міцності пирога агломерату та зменшення виходу придатного продукту [7]. Тому доцільно, прагнучи до збільшення ступеня однорідності розподілу гранулометричного складу, отримувати не повністю монодисперсну шихту ($V_d = 0$) з максимальним діаметром часток, а зупинитися на верхній межі групи значень коефіцієнту варіації крупності $V_d \leq 0,2$ і встановити величину $V_d = 0,1 - 0,2$, а $d_{eq} = 4,5 - 6$ мм. Завдяки цьому буде досягнуто компроміс між підвищенням порізності шару і одночасним зменшенням його питомої поверхні.

Практичне використання структурних показників V_d та d_{eq} ускладнене внаслідок необхідності проведення трудомістких вимірів

гранулометричного складу шихти і використання розрахункового апарату математичної статистики.

В науці і техніці часто використовується відношення максимального та мінімального діаметру гранул d_{max}/d_{min} , мм/мм, яке є одним з основних показників, що визначають фізичні властивості сумішей. У більшості випадків, при вивченні порізності сумішей або складають емпіричні рівняння для конкретних складів досліджених шихт, в яких величина ε є функцією від d_{max}/d_{min} [6], або встановлюють вплив на порізність комбінації з d_{max}/d_{min} і іншого показника, наприклад, співвідношення діаметрів окремих фракцій, масового або об'ємного співвідношення різних фракцій і т.п. [10]. Обравши останній підхід, ми прийшли до необхідності використання показника, який висловлює коефіцієнт варіації крупності гранул V_d . Для вирішення цього завдання нами запропоновано використовувати відношення середнього діаметру 1/3 маси гранул найменшої крупності до середнього діаметру решти гранул $d_{(1/3min)}/d_{(2/3)}$, мм/мм. Виходили з того, що при укладанні шару сипких матеріалів між умовно великими гранулами розташовуються гранули умовно малого діаметру. При цьому для полідисперсного шару в зазорах розташовується близько 1/3 маси матеріалів. Запропонований новий показник $d_{(1/3min)}/d_{(2/3)}$ потребує серйозного обґрунтування та подальшої перевірки. Між показником $d_{(1/3min)}/d_{(2/3)}$ і коефіцієнтом варіації крупності V_d встановлена лінійна залежність:

$$V_d = -1,11 \cdot d_{(1/3min)} / d_{(2/3)} + 1,1, \quad (10)$$

Використання комплексу запропонованих структурних показників дозволило відобразити вплив сукупної дії d_{eq} та V_d на порізність шару ε і сформулювати рекомендації по підвищенню ефективності процесу огрудкування. Для отримання шару огрудкованої агломераційної шихти з найбільшою порізністю, а значить і газопроникністю, необхідно встановити відношення діаметрів гранул максимального і мінімального розмірів в межах $d_{max}/d_{min} = 1,25-2$, при цьому відношення середнього діаметру 1/3 маси гранул найменшою крупності до середнього діаметру решти гранул підтримувати рівним $d_{(1/3min)}/d_{(2/3)} = 0,8-0,95$.

Висновки

Досліджено сукупний вплив еквівалентного діаметру d_{eq} і коефіцієнту варіації крупності гранул шихти V_d на порізність шару ε . Встановлено наявність трьох груп коефіцієнта V_d , що відрізняються характером даного впливу. Проаналізовано залежність порізності шару шихти від d_{eq} і V_d для кожної з груп. Вперше запропоновано новий структурний показник (відношення середнього діаметру $1/3$ маси гранул найменшою крупності до середнього діаметру решти гранул $d_{(1/3min)}/d_{(2/3)}$), який дозволяє відобразити коефіцієнт варіації крупності гранул шихти V_d і може бути використаний при оцінці ефективності процесу огрудкування та розробці рекомендацій по її підвищенню.

ЛІТЕРАТУРА

1. Брикетирование металлургического сырья. Актуальность и пути развития метода / [Б. Н. Маймур, А. Ю. Худяков, В. И. Петренко та ін.]. // Бюллетень научно-технической и экономической информации. Черная металлургия. – 2016. – №1. – С. 74–82.
2. Товаровский И. Г. Анализ показателей и процессов доменной плавки / И. Г. Товаровский, В. П. Севернюк, В. П. Лялюк. – Днепропетровск: «Пороги», 2000. – 420 с.
3. Металлургия чугуна: [учебник для вузов. – 3-е изд., перераб. и доп.] / под ред. Ю.С. Юсфина. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2004. – 774 с..
4. Пат. 36146 Україна, МПК⁶С22В 1/14. Барабанний огрудковувач / О.Ю. Худяков, С.Т. Войтаник; власник Національна металургійна академія України. – № 200807195; заявл. 23.05.2008 ; опублік. 10.10.2008, Бюл. № 19.
5. Аэров М.Е. Аппараты со стационарным зернистым слоем: Гидравлические и тепловые основы работы / М.Е. Аэров, О.М. Тодес, Д.А. Наринский. – Л.: «Химия», 1979. – 176 с.
6. Тарасов В. П. Газодинамика доменного процесса / В. П. Тарасов. – М.: «Металлургия», 1982. – 244 с.
7. Елисеева И. И. Общая теория статистики / И. И. Елисеева, М. М. Юзбашев. – М.: «Финансы и статистика», 2004. – 656 с.
8. Кривенко С. В. Коэффициент газодинамического сопротивления слоя окомкованной агломерационной шихты / С. В. Кривенко. // Сталь. – 2013. – №4. – С. 16–19.
9. Вегман Е.Ф. Теория и технология агломерации / Е.Ф. Вегман. – М.: «Металлургия». – 1974. – 288с.
10. Создание грунтовых смесей с заданными свойствами с помощью треугольных диаграмм. / Чжан Шенжун. // Материалы XI научно-практической конференции «Инженерные изыскания в строительстве». – М.: МГУ, 2015. – С. 51-57.