

Пазюк Михайло Юрійович, професор, доктор технічних наук, Запорізький національний університет, ORCID: 0000-0001-5424-0462

Овчинникова Ірина Анатоліївна, доцент, кандидат технічних наук, Запорізький національний університет, ORCID: 0000-0002-4035-412X

Барішенко Олена Миколаївна, доцент, кандидат технічних наук, Запорізький національний університет, ORCID: 0000-0002-6642-6341

Єрофєєва Аліна Анатоліївна, кандидат технічних наук, доцент кафедри, Запорізький національний університет, ORCID: 0000-0002-2981-4118

АНАЛІЗ МЕТОДІВ ДОСЛІДЖЕННЯ СЕГРЕГАЦІЙНИХ ПРОЦЕСІВ У СИПКИХ МАТЕРІАЛАХ

Статтю присвячено аналізу методів дослідження сегрегаційних процесів у сипких матеріалах з метою створення заданої сегрегації. Головна ідея полягає в тому, що правильне управління процесом сегрегації призводить до покращення процесу спікання агломерату та економії енергоресурсів.

Автори обговорює різні підходи до дослідження сегрегаційних процесів та їх вплив на якість кінцевого продукту. Спікання рудної дрібниці на колосниковій решітці з просмокування повітря через шар шихти, що спікається, є найпоширенішим способом окускування. При цьому визначено, що характерні риси агломераційного процесу зберігаються незалежно від конструкції агломераційних машин.

Розглянуто модель, що описує продуктивність агломераційної машини та зроблено висновок, що підвищення продуктивності агломераційних машин на діючій аглофабриці може бути зведено до збільшення вертикальної швидкості спікання і виходу готового агломерату.

Особлива увага приділяється методам, що сприяють запобіганню небажаним явищам у процесі сегрегації та оптимізації даного процесу для досягнення бажаного результату. Так, збільшення продуктивності також пов'язане із зменшенням простоїв агломашини.

Розглянуто моделі формування шару при різних підходах до руху окремих часточок шихти. Аналіз отриманих залежностей та порівняння результатів математичного моделювання з дійсними процесами дозволяє зробити висновок, що основний вплив на процес формування шару полідисперсного матеріалу надають його фізико-механічні властивості та кут нахилу завантажувального лотка.

Розгляд цієї теми у статті має практичне та економічне значення для виробничих підприємств, що займаються переробкою сипких матеріалів. В цілому, стаття є важливим внеском у вивчення процесів сегрегації та їх впливу на виробничі процеси.

Ключові слова: агломерація, агломераційна шихта, аглострічка, сегрегація, шар шихти, моделювання, енергозбереження, управління, завантажувальний пристрій, кут нахилу завантажувального лотка.

Вступ. Переробка залізрудних концентратів у доменній печі пов'язана з великим виносом рудної дрібниці газами та порушенням правильного перебігу доменного процесу внаслідок зменшення газопроникності шихти. Тому дрібні руди та концентрати піддають попередньому огрудкуванню – агломерації.

Спікання рудної дрібниці на колосниковій решітці з просмокування повітря через шар шихти, що спікається, є найпоширенішим способом окускування. Спікання піддають рудну дрібницю з частинками розміром до 10 мм, концентрати, колосниковий пил і пилоподібні залізовмісні матеріали. Для виробництва офлюсованого агломерату до рудної частини додають подрібнений вапняк розміром частинок до 3 мм. У якості палива застосовують подрібнений коксик фракції 0-3 мм. У суміш цих матеріалів додають оборотний продукт (повернення), часточки агломерату до 8 мм і шихту, що не спіклася.

Рудна дрібниця або концентрати збагачення ретельно перемішуються із подрібненим коксиком при одночасному зволоженні. Дрібні зволожені частинки матеріалу при перемішуванні укрупнюються в невеликі більш-менш міцні грудочки. В результаті шихта набуває зернистого складу, що зменшує її насипну вагу та створює необхідну газопроникність, що дозволяє вести процес спікання у шарі 300–400 мм і більше.

Підготовлена шихта завантажується в спікальний пристрій, нижня частина якого є колосниковими решітками, і запалюється з поверхні за допомогою спеціального горна. Одночасно під колосниковими решітками створюється вакуум, завдяки чому повітря просмоктується через шар, що забезпечує інтенсивне окиснення матеріалів шихти в міру підвищення температури в зоні горіння. Горіння, що почалося з поверхні шихти, в обмеженій по висоті зоні послідовно проходить через всю товщину завантаженого матеріалу і закінчується біля колосникових решіток.

На колосникові решітки перед завантаженням шихти укладають шар готового агломерату крупністю 8–15 мм. Це так звана постіль, яка оберігає колосникові решітки від впливу високих температур, запобігає просипанню шихти через колосникові решітки і полегшує сходження агломераційного пирога з решіток після закінчення процесу спікання.

Аналіз досліджень. Характерні риси агломераційного процесу зберігаються незалежно від конструкції агломераційних машин. Найбільш поширені в промисловості агломашинали стрічкового типу, які являють собою безперервний ряд візків, що рухаються (паллет), з колосниковими решітками Шихту завантажують на палети у головній частині машини. Потім палети послідовно проходять під запальним горном та над усіма вакуумними камерами установки. За час руху палети верхньої робочої гілки машини зона горіння проходить весь шлях від верхніх шарів шихти до постілі. До моменту закінчення процесу палета досягає розвантажувальної частини машини, де при її перекиданні готовий агломерат скидається з колосників, охолоджується і поділяється на фракції – готовий агломерат, постіль, повернення.

Продуктивність агломераційної машини оцінюють за формулою:

$$Q = 0,6F\rho lm, \quad (1)$$

де F – площа спікання стрічки, м²; ρ – насипна щільність шихти, т/м³; l – вертикальна швидкість спікання, м/хв; m – вихід годного агломерату з шихти, %.

Як видно з (1), підвищення продуктивності агломераційних машин на діючій аглофабриці може бути зведено до збільшення вертикальної швидкості спікання і виходу готового агломерату. Збільшення продуктивності також пов'язане із зменшенням простоїв агломашинали.

Вертикальна швидкість спікання характеризує переміщення фронту формування агломерату по висоті шару в одиницю часу. На практиці швидкість спікання визначається як частка від ділення висоти шару на загальний час процесу, що включає час розігріву верхнього шару зовнішнім джерелом тепла і час часткового охолодження агломерату. Незалежно від методу її обчислення, швидкість спікання визначається швидкістю переміщення теплової хвилі, яка, у свою чергу, залежить від швидкості фільтрації повітря, теплофізичних властивостей шихти і від швидкості горіння палива. Теплофізичні властивості шихти і палива залежать від того, з якого родовища вони отримані і тому оперативно керувати їх параметрами неможливо. Тому основним способом прискорення спікання є збільшення швидкості фільтрації повітря через шар.

Швидкість фільтрації газу пов'язана з параметрами шару та розрідженням повітря під колосниковою решіткою. За даними, наведеними в роботі [1], вертикальна швидкість спікання прямо пропорційна газопроникності шихти, що вимірюється кількістю повітря, що проходить через 1 м² робочої площі машини.

Таким чином, основним способом інтенсифікації процесу спікання є збільшення швидкості фільтрації повітря через шар, що досягається за допомогою зниження газодинамічного опору та підвищення вакууму під колосниковою решіткою. Однак підвищення вакууму пов'язане із значним збільшенням витрати електроенергії на 1 тону агломерату. При перевищенні розрідження деякого критичного значення приріст продуктивності сповільнюється. Тому найбільший інтерес представляє розробка методів підвищення газопроникності шару шихти.

Газопроникність шару, що спікається, можна істотно підвищити, якщо забезпечити задану сегрегацію частинок за його висотою при завантаженні шихти на аглоленту. Під сегрегацією мається на увазі розподіл класів крупності частинок матеріалу у його масі. У роботі [3] визначено кількісні можливості інтенсифікації процесу спікання з допомогою перерозподілу частинок шихти різного розміру за висотою шару. Для агломераційної шихти газопроникність шару з максимальною неоднорідністю по висоті відрізняється від газопроникності шару однорідної структури, завантаженого без сегрегації, приблизно на 20%. У роботі [5] також дано оцінку впливу сегрегації на газопроникність шару. Згідно з наведеними даними, управління сегрегацією частинок шару аглошихти викликає збільшення його газопроникності в середньому на 15%.

Однією з переваг сегрегації вважається утворення постелі з великих гранул. Однак, при цьому не враховується виникнення неоднорідності шару шихти за речовинним та гранулометричним складами. Деякі автори вважають, що сегрегація корисна лише до певного значення, вище за яку вона починає надавати несприятливий вплив на процес спікання. Висновок про позитивний вплив сегрегації обґрунтовується раціональним розподілом палива на висоті шару.

Існує думка, що сегрегація надає негативний вплив на стабільність властивостей агломерату, збільшуючи хімічну неоднорідність по висоті шару, а скупчення великої кількості дрібних фракцій (-3 мм) у верхніх горизонтах шару призводить до збільшення газодинамічного опору матеріалу, що завантажуються.

У ряді випадків сегрегація шихти за крупністю в деякому поздовжньому перерізі шару є основною причиною зниження якості агломерату. У цих роботах показано, що при зменшенні сегрегації можливе підвищення однорідності та покращення металургійних властивостей агломерату. Вважається, що сегрегація бажана за відсутності комбінованого нагріву шихти, оскільки призводить до вирівнювання теплового рівня процесу. При комбінованому нагріванні, коли витрата палива знижується на 10%, його перерозподіл призводить до нестачі тепла у нижніх горизонтах шару. Будь-який поздовжній переріз шару агломераційної шихти на аглоленті надалі називатимемо горизонтом шару.

Відомий факт, що існує сегрегація не лише за висотою шару, а й за шириною спальних візків. Проведено порівняльну оцінку сегрегації при завантаженні шихти барабаним та вібраційним живильниками. Якщо у першому випадку розподіл вуглецю за висотою шару був приблизно рівномірним, то у другому його вміст у верхній половині становив 5,21%, у нижній – 2,55%. Це дозволило суттєво підвищити техніко-економічні показники агломераційного процесу за рахунок зниження витрат палива. Експериментальні дослідження [5] показали, що газопроникність шару значно підвищується при встановленні завантажувального лотка під кутом, рівним або близьким до кута природного відкосу матеріалу.

Характеристики міцності агломерату багато в чому залежать від закономірностей зміни хімічного складу і теплового режиму процесу спікання по висоті шару. В агломераційній шихті флюс і паливо зосереджуються у фракції 0-3 мм, на частку якої припадає близько 83% вуглецю та 73% окису кальцію. Тому, сегрегація шихти за гранулометричним складом викликає сегрегацію за вмістом палива, і впливатиме на тепловий режим спікання, і, отже, на міцність агломерату. Початковий період спікання характеризується нестачею тепла, тому верхня частина спеку, що досягає однієї третини всієї маси, що спікається матеріалу, є найменш міцною. Після випробувань агломерату на скидання, у пробі з верхньої частини спеку вміст фракції -5 мм становив 21,2%, з нижньої – 15,6% [2].

Таким чином, як показує аналіз, переважний вплив на умови протікання агломераційного процесу та якісні характеристики агломерату надають структура підготовленого до спікання шару залізородного матеріалу та закономірності розподілу за його висотою палива та флюсів.

Головна частина. Маса матеріалу, що надходить, являє собою сукупність частинок, близьких до сферичної форми, рухається по поверхні завантажувального лотка до відкосу шару під дією гравітаційних сил. Відповідно до використовуваної схеми завантаження агломераційної шихти на спікальні візки відбувається її розшарування по фракціях, так як більші частинки скочуються до основи шару, що формується, дрібні зосереджуються у верхній його частині [2].

Розглядаючи окрему частинку як тіло правильної форми (куля), що вільно рухається по похилій площині, в [2] отримані рішення, що характеризують розподіл частинок сипкого матеріалу по висоті шару, що формується при качінні частинок:

$$h_i = \frac{l_1(\sin \alpha_1 - f_{1i}^1 \cos \alpha_1) \sin \alpha_2}{f_2^1 \cos \alpha_2 - \sin \alpha_2}, \quad (2)$$

і при спільно ковзанні та качінні:

$$h_i = \frac{l_1(\sin \alpha_1 - f_{1i} \cos \alpha_1) \sin \alpha_2}{v(f_{2i}^1 \cos \alpha_2 - \sin \alpha_2)}, \quad (3)$$

де h_i – положення i -ї частки у шарі, м; α_1 – кут нахилу завантажувального лотка, град; α_2 – кут нахилу поверхні відкосу шару, град; f_{1i}^1, f_{1i} – коефіцієнти тертя качіння та ковзання i -ї частки по поверхні завантажувального лотка; f_{2i}^1 – коефіцієнт тертя качіння частки по поверхні відкосу шару; v – коефіцієнт форми частки.

Рівняння (2) відповідає качінню частинки шихти поверхнею завантажувального лотка і відкосу шару. Залежність (3) дає можливість визначити розподіл частинок шихти в шарі при їх коченні зі ковзанням по завантажувальному лотку та чистому коченню по поверхні відкосу матеріалу.

Аналіз отриманих залежностей та порівняння результатів математичного моделювання з дійсними процесами [5] дозволяє зробити наступний висновок: основний вплив на процес формування шару полідисперсного матеріалу надають його фізико-механічні властивості та кут нахилу завантажувального лотка.

Вплив зовнішніх зусиль на структуру стаціонарного шару полідисперсного сипкого матеріалу досліджено у роботах [1-3,5]. Показано, що зміна висоти шару пов'язана з ущільненням його структури під дією розрідження та вібрації конструкції агломашини.

Математична модель процесу сегрегації сипкого матеріалу під час завантаження його в шахту доменної печі може бути описана формулою [4]:

$$\frac{d}{dl} x_i = -\alpha_i x_i (l - x_i),$$

де α_i – коефіцієнт сегрегації i -ї фракції; x_i – вміст i -ї фракції у шихті, %; l – відстань у радіальному напрямку руху до стінки печі, м.

Розв'язання цього рівняння є функція, яка дає співвідношення між різними фракціями шихти при сегрегації, характеризується функцією

$$\log\left(\frac{x_i}{x_i - 1}\right) = \log\left(\frac{x_i^f}{x_{i-1}^f}\right) - (\alpha_i - \alpha_{i-1}),$$

де f – коефіцієнт, що характеризує властивості матеріалу.

Наведена модель призначена для опису окремого випадку сегрегації полідисперсних матеріалів в умовах зустрічно спрямованого руху газу через шар, що формується. Основні коефіцієнти (α_i, f) та структура моделі визначені експериментально, що знижує можливість їх використання для опису механізму сегрегації.

Відома модель розподілу полідисперсного матеріалу по відкосу шару, побудована на основі розподілу Вейбулла [1].

Зміна середнього діаметра частинок шихти по довжині відкосу шару матеріалу апроксимується рівнянням:

$$\bar{d} = \bar{d}_n \frac{l}{r(k+1)} \left(\frac{l}{l-e} \right)^k,$$

де \bar{d}_n – середній діаметр часток вихідного матеріалу, мм; l – відносна довжина відкосу шару; $\frac{l}{l-e}$ – емпіричний коефіцієнт, $k = \frac{\bar{d}_n}{m_n} l^{-\alpha}$; $r(x)$ – гама-функція; B – емпіричний коефіцієнт, який визначається властивостями матеріалу; m_n – показник ступені неоднорідності матеріалу.

Модель дозволяє оцінювати зміну середнього розміру частинок відкосу шару матеріалу при відомому гранулометричному складі матеріалу.

Неоднозначність зв'язку середнього діаметра частинок матеріалу з його фракційним складом, експериментальне визначення ряду коефіцієнтів знижують можливість застосування моделі у різних технологічних умовах.

Для чисельної оцінки ступеня сегрегації агломераційної шихти за висотою шару за відомого розподілу фракцій запропоновано коефіцієнт сегрегації, який визначається за формулою:

$$K_{\bar{d}} = 1 - \frac{\sum_j \frac{|C_j^{\bar{d}} - \tilde{N}_j^{\bar{d}}|}{C_i}}{\sum_j \frac{|C_j^{\bar{d}} - \tilde{N}_i^{\bar{d}} / n|}{C_i}},$$

де $C_j^{\bar{d}}, \tilde{N}_j^{\bar{d}}$ – вміст i -ї фракції на j -м горизонті шару відповідно при ідеальній та фактичній сегрегації, %; C_i – вміст i -ї фракції у вихідній шихті, %; n – кількість горизонтів у шарі.

В даному випадку запропоновано показник сегрегації полідисперсного матеріалу за висотою шару, який не відображає фізичних основ механізму його формування та не може бути використаний для моделювання процесу.

Необхідно відзначити, що керування лише однією газопроникністю шару агломераційної шихти не забезпечить підвищення економічної ефективності процесу її спікання та металургійних характеристик агломерату. Так, для умов комбінату «Запоріжсталь» максимальна швидкість спікання агломераційної шихти та міцність отриманого агломерату досягається за певної сегрегації фракцій матеріалу та твердого палива за висотою шару, що не відповідає оптимальному газопроникності [5].

Розглянуті методи дозволяють визначити середній діаметр частинок у кожному з горизонтів шару, що дає неоднозначну інформацію про вміст різних фракцій у них. Тому розрахунок параметрів процесу спікання може бути зведений до розрахунку розподілу заданих фракцій по висоті шару шихти, а значить актуальною є розробка методів розрахунку, які дозволять знайти розподіл фракцій по висоті шару.

Висновки. Таким чином, створення заданої за деякими критеріями сегрегації має забезпечити найкраще спікання агломерату та призводити до економії енергоресурсів.

Є актуальним завдання отримання оцінки розподілу частинок матеріалу за висотою шару шихти на аглострічці відповідно до заданих характеристик. Для вирішення такого завдання необхідні пристрої контролю середньої крупності частинок та спосіб розрахунку цієї величини в залежності від параметрів завантажувального вузла.

Бібліографічний перелік

1. Пожуев В. И., Пазюк Ю. М. Алгоритм расчета структуры полидисперсных железорудных материалов на спекательных тележках агломашины. *Збірник наукових праць Кіровоградського державного технічного університету*. Кіровоград : КНТУ, 2004. Вип. 15. С. 176-182.
2. Пазюк М. Ю., Пазюк Ю. М., Иванов В. И., Шаповаленко В. В. Методи оцінки гранулометричного складу залізвмісних сипких матеріалів. *Металургія* : праці ЗДІА. Запоріжжя : ЗДІА, 2011. Вип. 23. С. 5-12.
3. Пазюк М. Ю., Мних А. С., Овчинникова И. А., Міняйло Н. О. Про сегрегацію грудкової шихти під час агломерації. *Металургія*. 2019. № 2. С. 5-10.
4. Комплексна модернізація існуючої системи автоматизованого управління процесами доменної печі в умовах ПАТ «Запоріжсталь» : Матеріали XXV науково-технічної конференції студентів, магістрантів, аспірантів, молодих вчених та викладачів Запоріжжя : ІННІ ЗНУ, 2020. С. 71-72.
5. Мних А.С., Яковлева І.Г., Пазюк М.Ю., Овчинникова І.А. Дослідження газодинамічного опору шару полідисперсної агломераційної шихти, підготовленої до спікання. *Промислова теплотехніка*. Т37. №5. 2015. С. 16-22.

References

1. Pozhuev V. I., Paziuk Yu. M. Algorithm for calculating the structure of polydisperse iron ore materials on sintering carts of an agglomeration machine. *Collection of scientific works of Kirovohrad State Technical University*. Kirovohrad: KSTU, 2004. Issue 15. P. 176-182.

2. Paziuk M. Yu., Paziuk Yu. M., Ivanov V. I., Shapovalenko V. V. Methods for evaluating the granulometric composition of iron-containing bulk materials. *Metallurgy: Works of ZDIA. Zaporizhia: ZDIA*, 2011. Issue 23. P. 5-12.
3. Paziuk M. Yu., Mnykh A. S., Ovchinnikova I. A., Minyailo N. O. On the segregation of lumpy charge during agglomeration. *Metallurgy*. 2019. No. 2. С. 5-10.
4. Comprehensive modernization of the existing system of automated control of blast furnace processes in the conditions of PJSC "Zaporizhstal": Materials of the XXV scientific and technical conference of students, masters, postgraduates, young scientists and teachers of Zaporizhzhia: INNI ZNU, 2020. С. 71-72.
5. Mnykh A.S., Yakovleva I.G., Pazyuu M.Yu., Ovchinnikova I.A. Study of gas dynamic resistance of a layer of polydisperse agglomeration charge prepared for sintering. *Industrial heat engineering*. T37. No. 5. 2015. P. 16-22.

Paziuk Mikhailo, professor, doctor of technical sciences, Zaporizhzhia national university, ORCID: 0000-0001-5424-0462

Ovchynnykova Iryna, associate professor, candidate of technical sciences, Zaporizhzhia national university, ORCID: 0000-0002-4035-412X

Barishenko Olena, associate professor, candidate of technical sciences, Zaporizhzhia national university, ORCID: 0000-0002-6642-6341

Yerofieieva Alina, candidate of technical sciences, Zaporizhzhia national university, ORCID: 0000-0002-2981-4118

ANALYSIS OF RESEARCH METHODS OF SEGREGATION PROCESSES IN BULK MATERIALS

The article is devoted to the analysis of methods of studying segregation processes in loose materials with the aim of creating a given segregation. The main idea is that the correct management of the segregation process leads to the improvement of the sintering process of the agglomerate and the saving of energy resources.

The authors discuss different approaches to the study of segregation processes and their impact on the quality of the final product. Sintering ore fines on a grate by drawing air through a layer of sintering charge is the most common method of sintering. At the same time, it was determined that the characteristic features of the agglomeration process are preserved regardless of the design of the agglomeration machines.

The model describing the performance of the sintering machine was considered and it was concluded that the increase in the performance of sintering machines at the operating sinter plant can be reduced to an increase in the vertical speed of sintering and the output of the finished agglomerate.

Special attention is paid to methods that contribute to the prevention of undesirable phenomena in the process of segregation and optimization of this process to achieve the desired result. Thus, the increase in productivity is also associated with a decrease in downtime of the sintering machine.

Models of layer formation with different approaches to the movement of individual particles of the charge are considered. Analysis of the obtained dependencies and comparison of the results of mathematical modeling with real processes allows us to conclude that the main influence on the process of formation of a layer of polydisperse material is provided by its physical and mechanical properties and the angle of inclination of the loading tray.

Consideration of this topic in the article is of practical and economic importance for manufacturing enterprises engaged in the processing of loose materials. In general, the article is an important contribution to the study of segregation processes and their impact on production processes.

Key words: agglomeration, agglomerate charge, agglomerate belt, segregation, layer of charge, modeling, energy saving, control, loading device, inclination angle of the loading chute.