

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНА МЕТАЛУРГІЙНА АКАДЕМІЯ УКРАЇНИ

СОВА АРТЕМ ВАЛЕРІЙОВИЧ

УДК 669:162.1:622.78(43)

**УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ВИРОБНИЦТВА
АГЛОМЕРАТУ ШЛЯХОМ ФОРМУВАННЯ РАЦІОНАЛЬНОЇ
БЛОКОВОЇ СТРУКТУРИ НА ОСНОВІ РОЗДІЛЬНОЇ ПІДГОТОВКИ
ШИХТИ ТА МЕХАНІЧНОЇ ОБРОБКИ СПЕЧЕНЦЯ**

**Спеціальність 05.16.02 – «Металургія чорних і кольорових металів та
спеціальних сплавів»**

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеню

кандидата технічних наук

Дніпро, 2020 р.

Дисертацією є рукопис
Робота виконана в Національній металургійній академії України
Міністерства освіти і науки України

Науковий керівник: Доктор технічних наук, професор
БОЧКА Володимир Васильович
Національна металургійна академія України,
професор кафедри металургії чавуну

Офіційні опоненти: Доктор технічних наук,
старший науковий співробітник
МУРАВЬОВА Ірина Геннадіївна,
Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова
НАН України (м. Дніпро),
зав. відділом технологічного обладнання та
систем управління

Кандидат технічних наук, доцент
РУДЕНКО Микола Романович
Дніпровський державний технічний
університет (м. Кам'янське),
доцент кафедри металургії чорних металів.

Захист відбудеться " 24 " 03 2020 р. о 14-00 на засіданні спеціалізованої
Вченої ради Д 08.084.03 при Національній металургійній академії України за
адресою: 49600, м. Дніпро, пр. Гагаріна, 4.
Факс +38(0562)47-44-61. E-mail: lydmila_kamkina@ukr.net.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Національної металургійної
академії України за адресою: 49600, м. Дніпро, пр. Гагаріна, 4.

Автореферат розіслано " 19 " 02 2020 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради
Д 08.084.03
доктор технічних наук,
професор

Л.В. Камкіна

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність роботи. Удосконалення технології виробництва агломерату є актуальною задачею, вирішення якої дозволить збільшити продуктивність доменних печей і знизити питому витрату коксу. Формування якості агломерату є комплексною задачею і здійснюється на кожній стадії його виробництва. Існуюча технологія складається з заходів по підготовці та спіканню шихти, а також механічної обробки спеченого продукту. Міцність агломерату визначається складом в'язучих частин, наявністю неспечених компонентів, крупних пор і появою внутрішніх напружень у кусках, які утворюються під час самого агломераційного процесу й охолодження спеченця, а реалізуються на етапі механічної обробки.

Отримання якісного агломерату, стабілізованого за крупністю та міцністю, залежить від можливості створення умов на етапі підготовки шихти до спікання для формування блокової структури та мінералогічного складу в'язучої частини високої міцності. Існуючі схеми підготовки шихти не в змозі в повній мірі забезпечити виконання цих вимог.

Спечений агломерат піддається механічній обробці, задачею якої є виділити з нього міцні куски, стабілізовані за крупністю та міцністю, для забезпечення оптимальних умов роботи доменної печі. Агрегати для механічної обробки не враховують механізм руйнування агломерату під дією різних типів навантаження, що суттєво обмежує можливості підвищення його якості.

Значний внесок у дослідження способів отримання якісного агломерату зробили вчені: Є.Ф. Вегман, Т.Я. Малишева, В.А. Утков, Л.Р. Мігуцький, Д.А. Ковальов, Є.І. Суліменко, В.І. Коротич, Ю.С. Юсфін, Г.В. Коршиков, С.В. Смирнов та інші.

Запропоновано для формування раціональної блокової структури зі зв'язкою: різні способи управління гранулометриєю та мінералогічним складом сирих гранул, використання комплексного флюсу, подачу флюсів у нижній шар для спікання; для механічної обробки спеченця: використання після зубчатої дробарки пристрою барабанного типу, зменшення однотипних навантажень у дробарках.

Незважаючи на значні досягнення у вирішенні вказаної задачі, у повній мірі вона залишається не вирішеною. У зв'язку з цим, дослідження, спрямованні на вивчення фізико-хімічних закономірностей формування в агломераті заданої структури та властивостей на стадіях підготовки шихти до спікання та механічної обробки спеченого продукту є **актуальними** для отримання агломерату, стабілізованого за міцністю та крупністю.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Розглянуті в дисертаційній роботі питання і задачі складають результати досліджень, що виконані автором та викладені у звіті із науково-дослідної роботи «Розробка способів використання в металургії вуглецевих матеріалів, отриманих з поновлюваної сировини» (номер державної реєстрації Г001М10007). Дисертаційна робота виконувалася в рамках науково-дослідної діяльності кафедри металургії чавуну Національної металургійної академії України (НМетАУ).

Мета та завдання дослідження. Теоретичне обґрунтування та удосконалення

технології виробництва агломерату на основі результатів дослідження ефективних методів роздільного грудкування компонентів шихти перед спіканням, а також способів механічної обробки спеченця у пристроях спеціальної конструкції.

Для досягнення поставленої мети в дисертаційній роботі передбачалося вирішення наступних задач:

- проаналізувати вимоги до якості агломерату, сучасні способи його отримання та можливості їх удосконалення;
- обґрунтувати на основі фізико-хімічних досліджень можливість формування складу та покращення властивостей агломерату;
- визначити умови формування в агломераті міцної міжблокової зв'язки при застосуванні роздільної підготовки шихти до спікання з використанням композитів різного складу та властивостей;
- провести лабораторні спікання агломерату з метою визначення раціональних параметрів технології роздільного грудкування з використанням композитів заданого складу та крупності;
- обґрунтувати оптимальні умови механічної обробки агломерату з метою його стабілізації за гранулометричним складом і міцністю;
- розробити математичну модель руйнування кусків агломерату в пристрої барабанного типу, визначити вплив конструкційних і технологічних параметрів роботи барабана-стабілізатора на величину та вид енергетичних навантажень на агломерат;
- визначити оптимальні параметри механічної обробки агломерату при різних умовах роботи барабана-стабілізатора;
- оцінити властивості стабілізованого агломерату та ефективність його використання в доменній печі.

Об'єкт дослідження: технологія виробництва агломерату заданого складу та властивостей.

Предмет дослідження: фізико-хімічні закономірності формування заданої структури агломерату; вплив роздільної підготовки шихти на процес спікання агломерату та його якість; вплив величини та виду механічного навантаження на руйнування спеченого агломерату; розробка математичної моделі з метою визначення величини та виду механічного навантаження на агломерат в залежності від конструкції та технологічних параметрів роботи барабана-стабілізатора; розробка конструкції барабана-стабілізатора та технологічних умов роботи для забезпечення стабілізації агломерату за крупністю та міцністю.

Методи дослідження. Аналітичні та теоретичні дослідження реакції утворення залізо-кальцієвих олівінів і феритів кальцію базуються на фундаментальних положеннях фізичної хімії та теорії металургійних процесів. Аналіз основних термодинамічних показників та фазового складу для компонентів агломераційної шихти проводили за допомогою програмного комплексу. Дослідження ефективності способів роздільної підготовки агломераційної шихти до спікання проводили на експериментальній установці лабораторії кафедри металургії чавуну НМетАУ. Дослідження фазового складу отриманого агломерату проводили за допомогою дифрактограм, отриманих на дифрактометрі ДРОН -2. Ефективність використання барабана-стабілізатора для стабілізації агломерату за міцністю та крупністю

проводили в дослідному барабані проблемної лабораторії кафедри металургії чавуну НМетАУ. В роботі використані методи математичного моделювання та математичної статистики, прикладні програми планування експерименту. Усі експериментальні дослідження виконані з використанням перевіреного та сертифікованого обладнання й устаткування.

Наукова новизна отриманих результатів

1. Розвинуто уявлення щодо відмінностей у взаємодії різних компонентів агломераційної шихти з водою під час роздільних процесів зволоження та грудкування. На основі результатів досліджень капілярної здатності до змочування запропоновано розподілення компонентів шихти, яке, ґрунтуючись на їхній пористості, властивостях поверхонь і їхній активності під час зволоження, забезпечує рівномірні показники просочування вологи в суміш та взаємодії компонентів між собою, що сприяє утворенню більш однорідних за розмірами та складом гранул, шляхом їхнього роздільного зародження не лише навколо крупних кусків звороту та руди, а й завдяки окремій взаємодії дрібних компонентів з активними поверхневими властивостями, і подальшої спільної грануляції зародків гранул з залишковою шихтою.

2. Обґрунтовані та показані умови роздільної підготовки шихти до спікання, завдяки яким в агломераті під час спікання формується в'язуча частина переважно з залізо-кальцієвих олівінів і незначної кількості феритів кальцію, оскільки за рахунок утворення необхідних контактних взаємодій компонентів він має основність на рівні 0.9-1.0 од. для формування залізо-кальцієвих олівінів та 1.6 од. для формування феритів кальцію.

3. Вперше на основі моделювання механічної обробки агломерату в пристрої барабанного типу досліджено залежність виділення міцної складової спеченого агломерату блокової структури, в'язуча частина якого представлена залізо-кальцієвими олівінами та феритами кальцію, від прикладених енергетичних навантажень на нього, види і величина яких залежать від характеристик конструкції барабана та технологічних умов його роботи. Обґрунтована та експериментально підтверджена ефективність створення в барабані робочих зон зі змінною дією сил та величиною енергетичного навантаження на матеріал за рахунок зміни кількості та ширини полиць, що призводить до реалізації внутрішніх напружень в агломераті, подальшого надання йому округлої форми та стабілізації за крупністю (5-50 мм) та міцністю.

Практична цінність отриманих результатів

1. Розроблені технологічні рекомендації щодо підвищення ефективності підготовки агломераційної шихти до спікання. Показано, що для можливості отримання агломерату заданого складу та властивостей необхідно попередньо формувати композит шляхом спільного грудкування концентрату з залізною рудою крупністю 0-3 мм в кількості 9-12 % від маси концентрату, вапном та вапняком крупністю 0-3 мм, що забезпечує основність суміші на рівні до 1.0 од.. Залишкова частина агломераційної шихти, основністю від 1.6 од. грудкується окремо з подальшою грануляцією спільно з запропонованим композитом у барабані, з додаванням наприкінці коксу крупністю 0-7 мм.

2. Розроблені практичні рекомендації щодо конструкції і технологічних

параметрів роботи барабана-стабілізатора, що забезпечує ефективну механічну обробку спеченця та отримання стабілізованого за крупністю та міцністю агломерату. Барабан повинен бути обладнаний не менш ніж трьома робочими зонами та мати наступні характеристики: радіус – 1,25–1,75 м; частота обертання – 8-10 об/хв; кількість полиць: 6 (1 зона), 4 (2 зона) та 0-2 (3 зона); ширина полиць: 20-22 % від радіуса барабана (1 зона), 18-20% (2 зона) та 16-18 % (3 зона); ступінь завантаження барабана – 15-30%; кут нахилу 4-6 град.; довжина барабана 7,5-10 м.

3. Результати теоретичних і експериментальних досліджень дисертаційної роботи були використані при розробці проекту реконструкції агломераційних фабрик України в державному підприємстві «Укрдіпромет», а також використовуються у навчальному процесі на кафедрі металургії чавуну Національної металургійної академії України при вивченні дисципліни «Підготовка металургійної сировини» спеціальності 136 - «Металургія».

Особистий внесок дисертанта. Наведені в дисертації теоретичні дослідження, обробка, узагальнення та аналіз отриманих результатів виконані автором самостійно. Результати експериментальних досліджень опубліковані в співавторстві зі співробітниками та студентами кафедри металургії чавуну Національної металургійної академії України. В опублікованих спільно зі співавторами працях, наведених в авторефераті, автор особисто виконав: [1, 3, 6, 9-13, 19-21] - аналіз стану виробництва якісного агломерату, підготовку, проведення експериментів, аналіз і обробку отриманих результатів; [2, 4-5, 14-18] - проведення експериментів, аналіз і обробку отриманих результатів; [7-8] - аналіз існуючих технологій механічної обробки агломерату, проведення експериментів і аналіз отриманих даних.

Апробація результатів дисертації. Матеріали дисертаційної роботи були представлені в доповідях на: міжнародних науково-технічних конференціях молоді (м. Запоріжжя 2014, 2015, 2016, 2017, 2018 роки), міжнародних науково-практичних конференціях «Металургія» (м. Запоріжжя 2016, 2017, 2018, 2019 роки), всеукраїнській науково-практичній конференції «Актуальні проблеми розвитку металургійної науки та освіти», присвяченій 100-річчю Г.Г. Єфіменка (м. Дніпро, 2017р.), International symposium of Croatian metallurgical society (Sibenik, Croatia 2018 р.).

Публікації. За темою дисертаційної роботи опубліковано 21 роботу, з них: 6 – статті у спеціалізованих наукових виданнях, затверджених ДАК України; 1 – стаття у науковому виданні іншої держави; 2 – патенти на корисну модель; 12 - матеріали наукових конференцій.

Структура і обсяг роботи. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Матеріал дисертації викладений на 120 сторінках, включаючи 42 рисунки, 19 таблиць та 2 додатки. Бібліографічний список містить 114 найменувань робіт вітчизняних і закордонних авторів.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтована актуальність роботи, вказані її мета і завдання, сформовані наукова новизна отриманих результатів та їхнє практичне значення, визначено особистий внесок автора, вказані результати апробації розробок, наведена структура і обсяг роботи.

У першому розділі проаналізовані сучасний стан технологічного процесу та проблеми виробництва якісного агломерату.

Однією з найбільш важливих проблем, яка вимагає вирішення для отримання агломерату високої якості, є його низькі показники міцності, що призводить до подальшого руйнування матеріалу під час транспортування, зберігання та завантаження в доменну піч з утворенням значної кількості дріб'язку (фракції 0-5 мм).

Показано, що виробництво агломерату високої якості здійснюється шляхом реалізації комплексу заходів щодо покращення, з одного боку, технології спікання агломерату, а з іншого – використання ефективної механічної обробки спеченця.

Незважаючи на значні досягнення у вирішенні вказаної проблеми, повноцінно забезпечити виробництво якісного агломерату не вдається. Основними причинами цього є те, що запропоновані раніше заходи щодо підвищення ефективності агломераційного процесу в значній мірі використали свій потенціал, а існуюча схема механічної обробки спеченця не забезпечує виділення з нього агломерату заданої міцності та крупності з мінімальним вмістом дріб'язку.

На основі літературних даних показано, що для отримання якісного агломерату, стабілізованого за крупністю та міцністю, необхідно формувати у ньому блокову структуру з оптимальним мінералогічним складом міжблокової зв'язки, найбільш міцними компонентами якої є ферити кальцію та олівіни низької основності. Цього можна досягти шляхом використання роздільного грудкування шихти на етапі її підготовки до спікання, а також розробкою агрегату-стабілізатора для механічної обробки спеченого агломерату, який забезпечить ефективне виділення з нього міцної складової з утворенням мінімальної кількості дріб'язку.

У другому розділі наведено теоретичне та експериментальне обґрунтування можливості формування агломерату заданого складу та властивостей на етапі підготовки шихти до спікання.

За допомогою програмного комплексу HSC 5.1 проведено 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.

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 2FeOSiO_2 та однокальцієвого фериту відбувається в ендотермічних умовах.

На рис. 1 представлений фазовий склад, розрахований для шихти основністю 1.3 од.. Міжблокова зв'язка представлена в основному залізокальцієвим олівіном

($\text{CaO}_{0.5}\text{FeO}_{1.5}\text{SiO}_2$), фаялітом (2FeOSiO_2 та FeSiO_3), та в незначній мірі феритами кальцію (CaOFe_2O_3 та $2\text{CaOFe}_2\text{O}_3$).

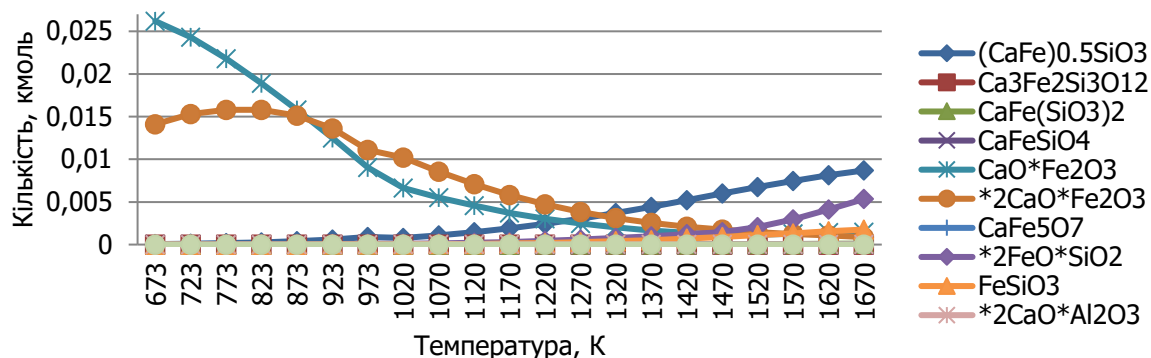


Рисунок 1 – Залежність фазового складу семикомпонентної системи основністю 1.3 од. від температури

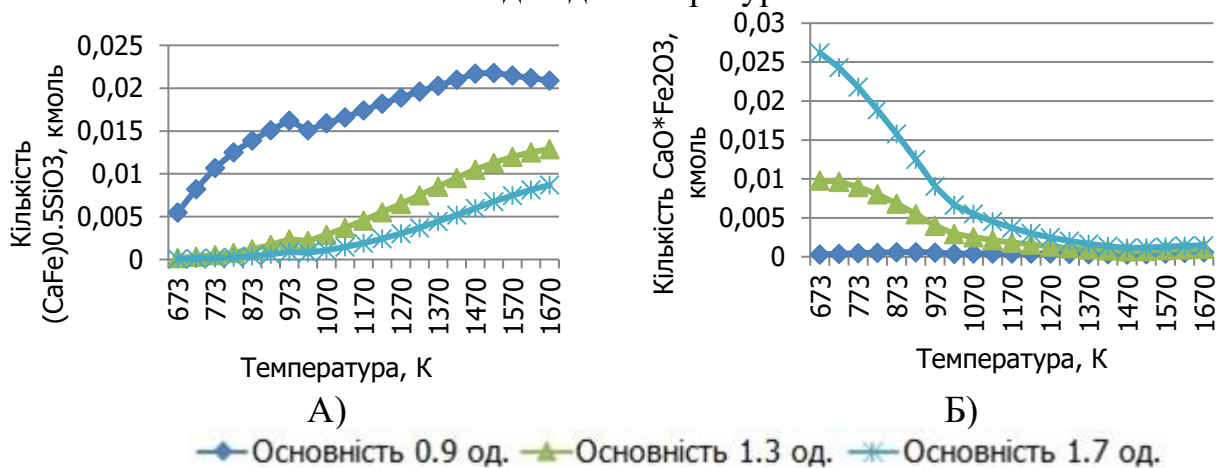


Рисунок 2 – Залежність формування залізокальцієвих олівінів (А) і феритів кальцію (Б) від температури при різних показниках основності

Теоретичними розрахунками підтверджено вплив основності на формування в агломераті міцних зв'язуючих компонентів: залізокальцієвих олівінів та феритів кальцію (рис. 2). Кількість олівінів (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 з усіх її компонентів композиту та залишкової частини заданих складів і властивостей.

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.

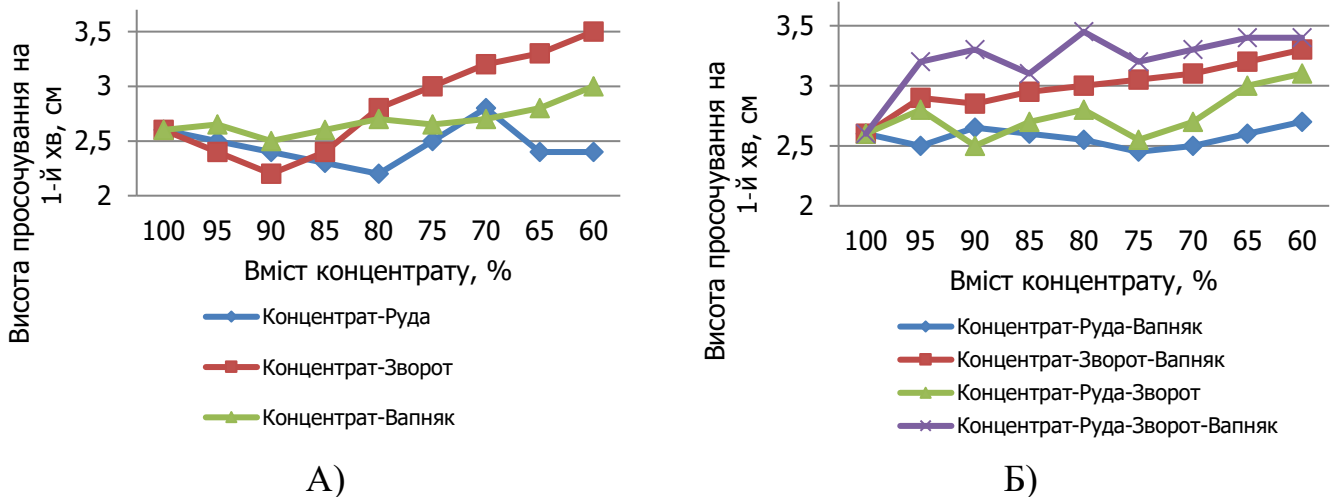


Рисунок 3 – Вплив складу двокомпонентних (А) і багатоконпонентних (Б) сумішей на висоту просочування

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.

Таблиця 1

Склад шихти

Склад шихти	Концентрат (К)	Залізна руда (Р)		Зворот (З)	Вапно (Во)	Вапняк (Вк)	Кокс (Кс)	Загалом
Крупність, мм	0-1	0-3	3-10	0-10	0-3	0-3	0-3	
Маса, %	50	6,5	3,5	25	4	5	6	100

На другому етапі досліджено вплив роздільної підготовки шихти з використанням композитів різного складу на якість сирих гранул й агломерату. З компонентів реальної агломераційної шихти (табл. 1) основністю 1.27 од. попередньо готували дво-, три- та чотирьохкомпонентні композити на основі концентрату, до яких потім додавали залишкові 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 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.

Таблиця 2
Показники крупності гранул при різних способах підготовки шихти

Варіант підготовки шихти	Вміст фракції, %						d _{екв} , мм	Середньо-квдратичне 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	

Таблиця 3
Показники якості агломерату при різних варіантах підготовки шихти

Вихід агломерату, %	Варіант підготовки шихти													
	Сумісна	Роздільна, з використанням наведеного композиту												
		КР	КВо	КВк	КЗ	КРЗ	КРВо	КРВк	КЗВо	КЗВк	КвоВк	КРЗВк	КРЗВо	КРВоВк
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
Дріб'язку після випробування на міцність (0-5 мм)	17	15	12	13	17.8	13	10.9	10	16.4	15.5	12	13	12.5	8

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.

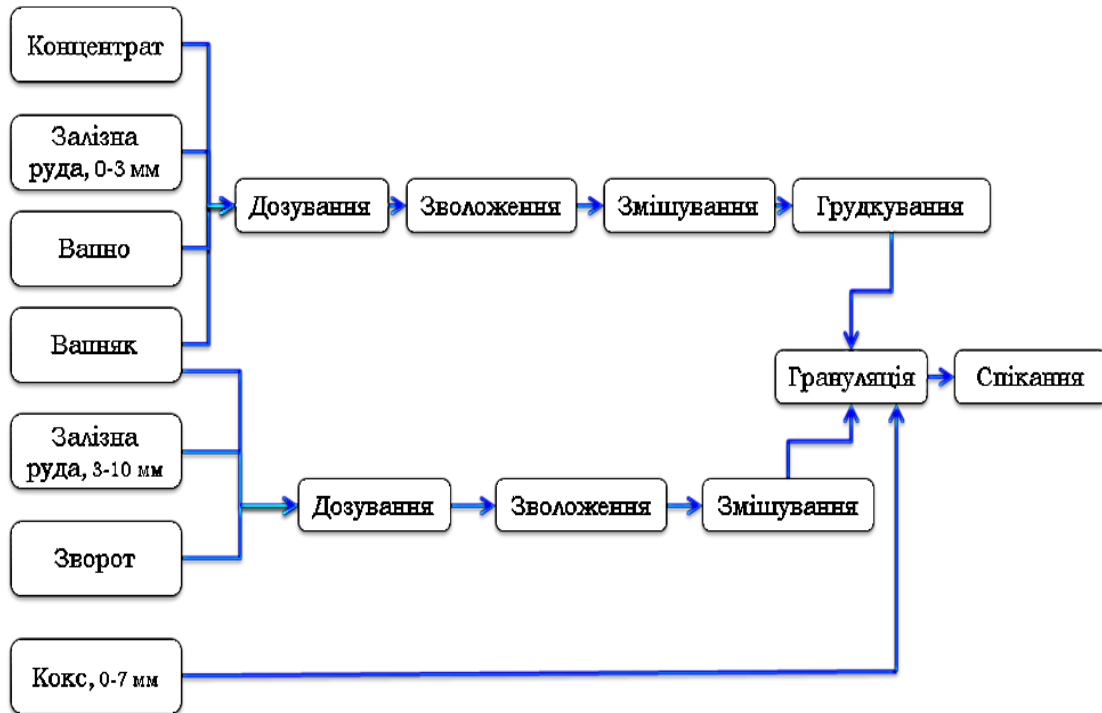


Рисунок 4 – Запропонована схема підготовки агломераційної шихти

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

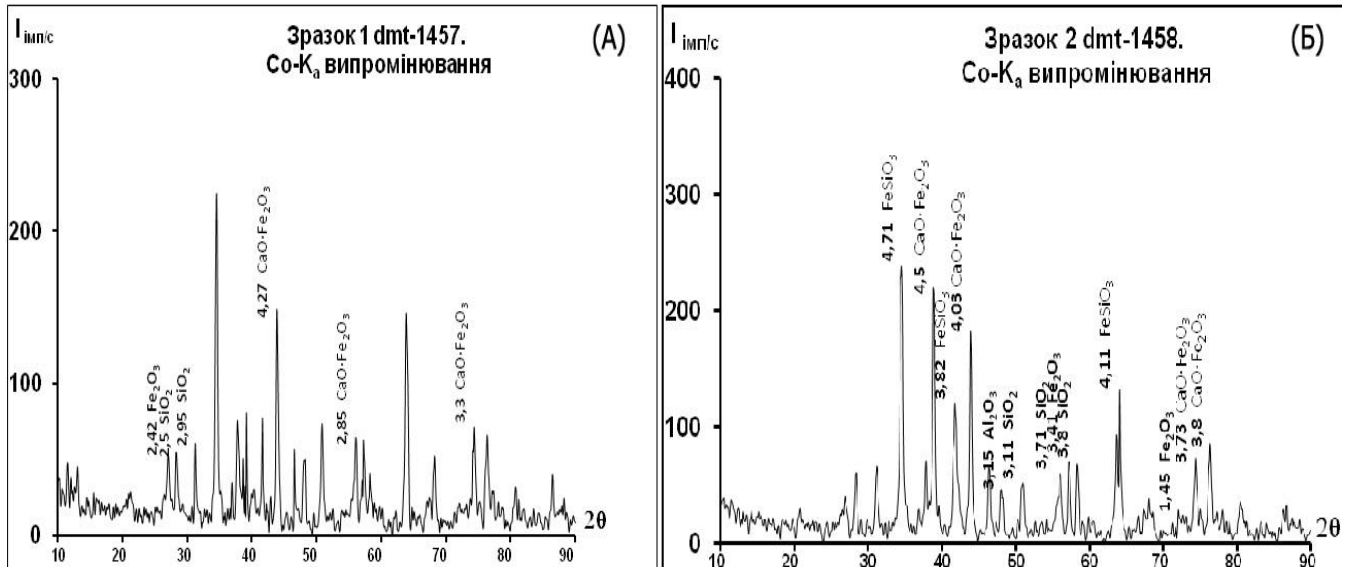


Рисунок 5 - Дифрактограми агломератів, спечених після сумісної підготовки шихти (А) та після підготовки шихти з використанням композиту з «КРВоВк» (Б)

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).

Спікання 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%.

У третьому розділі проведена теоретична та експериментальна оцінка механізму стабілізації агломерату за крупністю та міцністю під час механічної обробки.



Рисунок 6 – Структура моделі руйнування агломерату в агрегаті барабанного типу

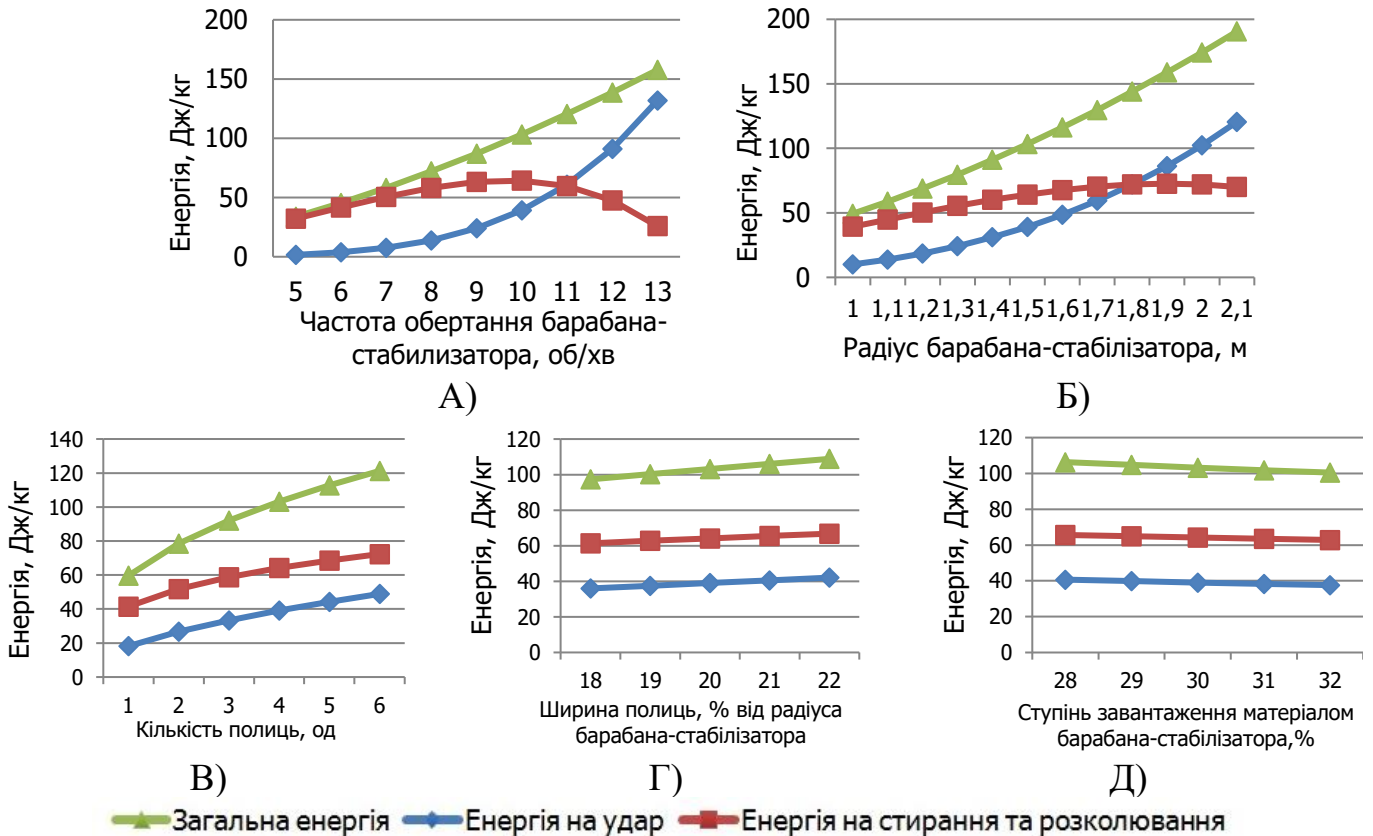


Рисунок 7 – Залежність величини та виду енергії навантаження на 1 кг агломерату від конструкції та технологічних параметрів роботи барабана-стабілізатора

Визначені основні вимоги для ефективної стабілізації агломерату: спільна дія сил удару, стирання та розколювання; зменшення енергії навантаження по ходу обробки зі 100 до 30-40 Дж/кг. Розглянуто особливості механічної обробки в різних пристроях. Забезпечувати спільну дію сил удару, стирання та розколювання можливо в барабані-стабілізаторі, який використовується після дробарки. Обробка в ньому здійснюється при взаємодії кусків різної форми та крупності, що рухаються за своїми траєкторіями. Недоліком цього пристрою є відсутність достатнього аргументування у виборі конструкційних і технологічних параметрів роботи. Для дослідження впливу конструкції і технологічних параметрів роботи барабана-стабілізатора на енергію навантаження, діючу на агломерат, розроблена математична модель. Її концептуальна схема зображена на рис. 6.

Визначено, що енергія навантаження, яка діє на агломерат, залежить від наступних факторів: радіуса барабана, частоти обертання, кількості та ширини полиць, ступеню завантаження пристрою агломератом. Проведена оцінка впливу цих факторів на величину та вид енергії навантаження на 1 кг агломерату (рис. 7).

Зміна частоти обертання барабана та його радіуса (рис. 7а та 7б) суттєво впливає на величину та вид енергії навантаження, у той час як зміна кількості, ширини полиць і ступеня завантаження барабана агломератом призводить до пропорційної зміни всіх видів енергії (рис. 7в-7д).

У результаті моделювання отримано рівняння множинної регресії залежності

величини загальної (E_k) та ударної ($E_{уд}$) енергій від конструкції та технологічних факторів, які впливають на руйнування кусків в барабані.

$$E_k = 0,02927 * n_{об}^{1,61} * R_б^{3,82} * n_n^{0,39} * h_n^{0,55} * \varphi^{0,57}, R^2=99.6\% \quad (1)$$

де $n_{об}$ – кількість обертів барабана-стабілізатора за хвилину; $R_б$ – радіус агрегату; n_n – кількість полиць; h_n – ширина полиці; φ – ступінь завантаження.

$$E_{уд} = 4,103 * 10^{-6} * n_{об}^{4,63} * R_б^{5,34} * n_n^{0,55} * h_n^{0,77} * \varphi^{0,41}, R^2=98.6\% \quad (2)$$

Енергія, що витрачається на руйнування стиранням та розколюванням, визначається різницею загальної та ударної енергій.

Використання наведених рівнянь надає можливість обґрунтованого вибору конструкційних і технологічних параметрів роботи барабана-стабілізатора. Для забезпечення оптимальної дії механічних навантажень у пристрої, запропоновано виділити в ньому три характерні зони з різним механізмом руйнування агломерату: дроблення - з максимальною величиною загальних та ударних навантажень (70-100 Дж/кг); стабілізації характеристик за крупністю при мінімальному утворенні дріб'язку за рахунок зменшення загальних та ударних навантажень (50-60 Дж/кг); стирання, яке має забезпечити мінімізацію ударних навантажень, з основною дією сил, які дозволять видалити гострі виступи для надання агломерату кулястої форми (30-40 Дж/кг). Створення робочих зон в барабані можливе завдяки зміні кількості та ширини полиць в робочих зонах пристрою.

Для перевірки ефективності запропонованих заходів в лабораторії кафедри металургії чавуну НМетАУ проведено експериментальне дослідження зміни гранулометричного складу агломерату впродовж 4 хв обробки в дослідних барабанах: з незмінною кількістю (6) та шириною (21%) полиць(*); зі змінною кількістю та шириною полиць – 6 і 21% з 0 по 1 хв обробки, 3 і 19% з 1 по 2,5 хв, 1 і 17% з 2,5 по 4 хв відповідно (табл. 5).

Таблиця 5

Вплив механічної обробки агломерату в пристрої барабанного типу на його гранулометричний склад

Час обробки, хв.	Вміст фракції, %									
	0-5 мм		5-10 мм		10-25 мм		25-40 мм		40+ мм	
	*	**	*	**	*	**	*	**	*	**
0	0	0	0	0	0	0	0	0	100	0
1	10,23	10,4	13,62	13,3	45,74	43,9	21,05	22,24	9,36	10,16
2	14,20	13,35	17,4	16,9	45,8	46,2	16,78	16,42	5,82	7,13
3	16,35	15,0	22,1	21,8	48,47	48,7	8,5	9,3	4,58	5,2
4	21	18,05	22,3	22,1	46,17	47,8	6,3	7,45	4,23	4,6

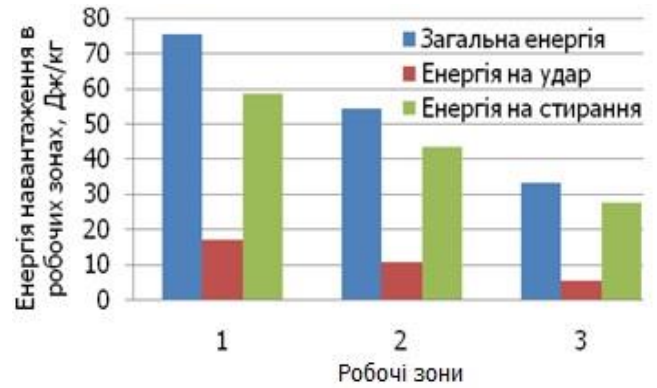
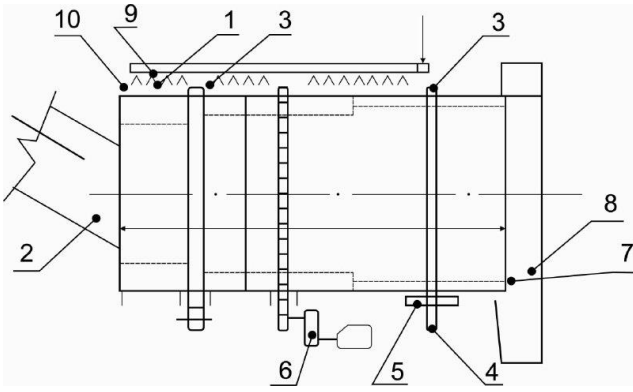


Рисунок 8 – Схема барабана-стабілізатора: 1 - барабан, 2 - завантажувальна лійка, 3 - бандажі, 4 - опорні ролики, 5 - упорні ролики, 6 - привід, 7 - полиці, 8 - розвантажувальна камера, 9 - форсунки для зрошення пристрою водою, 10 - кільцеві ребра

Рисунок 9 – Енергія руйнування в робочих зонах барабана радіусом 1,25 м, частотою обертання – 9 об/хв, ступенем завантаження 30%, зміною кількості полиць з 6 до 3 і 1, а їх ширини – з 21% до 19% і 17% від радіуса

Як видно з табл. 5, зниження навантаження на куски спеченця, починаючи з другої хвилини обробки в барабані з робочими зонами (**), призводить до зменшення кількості дріб'язку у порівнянні з барабаном без зменшення кількості та ширини полиць на 6-9% щохвилини.

Результатами моделювання та експериментальних досліджень встановлено, що для забезпечення оптимальної механічної обробки та отримання стабілізованого агломерату, пристрій барабанного типу (рис. 8) повинен мати наступні характеристики: радіус барабана – 1,25–1,75 м; частота обертання – 8-10 об/хв; кількість полиць – від 6 (1 зона), - 3-5 (2 зона) та - 0-2 (3 зона); ширина полиць - 20-22 % від радіуса барабана (1 зона), - 18-20% (2 зона) та - 16-18 % (3 зона); ступінь завантаження барабана – 15-30%; кут нахилу 4-6 град.; довжина барабана 7,5-10 м. Дана конструкція дозволяє забезпечувати необхідний рівень початкових навантажень на агломерат в межах 70-100 Дж/кг з подальшим їх зменшенням до 30 Дж/кг, що підтверджується результатами розрахунку (рис. 9).

Окрім покращення якості агломерату, використання барабана-стабілізатора як пристрою для стабілізації та охолодження спеченця дає можливість зменшити кількість етапів та агрегатів механічної обробки, що позитивно вплине на зниження витрат.

У четвертому розділі проведена оцінка ефективності розробленої технології виробництва якісного агломерату, стабілізованого за крупністю, складом та міцністю, шляхом порівняння характеристик отриманого агломерату з виготовленим за класичною схемою.

Першу пробу спікали після класичної схеми підготовки шихти, після чого спеченець проходив механічну обробку шляхом скидання з копра (який забезпечує ударні навантаження) та грохоченням. Другу пробу спікали після підготовки шихти запропонованим способом. Після скидання з копра, куски обробляли в барабані з

робочими зонами та проводили грохочення. Порівняння характеристик агломератів представлено у табл. 6-7 та на рис. 10.

Як видно з результатів, агломерат, виготовлений за запропонованою технологією, характеризується: рівномірністю гранулометричного складу, збільшенням коефіцієнту форми кусків та міцності. Це дозволяє позитивно впливати на порозність і газопроникність шару шихти, що покращує умови роботи доменної печі. Збільшення вмісту дріб'язку на 7.1% після обробки за запропонованою технологією компенсується збільшенням міцності після спікання шихти, підготовленої з використанням заданого композита.

Таблиця 6

Гранулометричний склад агломерату та його міцність після механічної обробки

Вид агломерату	Гранулометричний склад, %					Міцність [ДСТУ 3200-95]		Міцність [ДСТУ 3199-95]
	40+ мм	25-40 мм	10-25 мм	5-10 мм	0-5 мм	+10 мм, %	+0.5 мм, %	+10 мм, %
Вихідний	16,3	18,2	28,5	19,2	17,8	78	92	87
Стабілізований	4,15	13,35	30,5	27,1	24,9	89	97	97,5

Таблиця 7

Коефіцієнт форми кусків до та після стабілізації

Вид агломерату	Коефіцієнт форми				
	40+ мм	25-40 мм	10-25 мм	5-10 мм	0-5 мм
Вихідний	0,78	0,82	0,84	0,86	0,91
Стабілізований	0,83	0,86	0,91	0,94	0,96



А)

Б)

Рисунок 10 – Вид агломерату до (А) та після (Б) механічної обробки в дослідному барабані

Після грохочення стабілізованого агломерату вміст дріб'язку в ньому складає 3-4%, у той час як у класичного – 10-12%. Зменшення дріб'язку супроводжується незначним збільшенням кількості звороту, проте отримані навантаження в запропонованому барабані-стабілізаторі дозволяють виділити з агломерату міцну складову та уникнути його значного подрібнення до потрапляння в доменну піч.

Використання даного агломерату в доменному виробництві призведе до зниження питомої витрати коксу на виплавку чавуну на 4%, та збільшення продуктивності доменній печі на 8%.

ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі вирішена актуальна науково-технічна задача отримання якісного агломерату, стабілізованого за крупністю та міцністю, яка полягає в розробці технології спікання агломерату з шихт, що включають попередньо підготовлені композити заданого складу та властивостей, та механічної обробки, яка дозволяє виділяти міцні компоненти зі спеченого продукту.

1. На основі літературних даних показано, що отримання якісного агломерату, стабілізованого за крупністю та міцністю, є комплексною задачею, вирішення якої включає формування блокової структури з оптимальним мінералогічним складом міжблокової зв'язки на етапі підготовки шихти до спікання та ефективний спосіб механічної обробки спеченця.

2. На основі термодинамічного аналізу семикомпонентної системи, яка відповідає складу агломераційної шихти, розроблена пропозиція щодо формування міцної міжблокової зв'язки, яка складається переважно з залізокальцієвих олівінів та феритів кальцію. Запропоновано з вихідної шихти формувати дві складові: композит основністю 0.9-1.0 од. для появи максимальної кількості залізокальцієвих олівінів в агломераті, та залишкову шихту основністю 1.6-1.7 од., для появи у зв'язці феритів кальцію.

3. Доведено, що роздільна підготовка шихти з використанням композитів на основі концентрату дозволяє отримувати більш однорідний гранулометричний склад сирих гранул, завдяки створенню умов ефективної взаємодії матеріалів при зволоженні та грудкуванні, та створює можливість оптимального розподілу флюсів у шихті, що дозволяє формувати між блокову зв'язку заданого складу та властивостей.

4. Підтверджено, що найкращі показники якості спеченого агломерату досягаються шляхом підготовки шихти до спікання, який передбачає розподілення компонентів на дві частини: першу – композит основністю 0,9-1,0 од. із концентрату (крупністю 0-1 мм), залізної руди (0-3 мм), вапна (0-3 мм) та вапняку (0-3 мм); другу - залишкову шихту основністю 1,6-1,8 од. із залізної руди (3-10 мм), звороту (0-10 мм) та вапняку (0-3 мм); кожна з яких дозується, зволожується та змішується, а перша частина додатково грудкується, після чого вони спільно гранулюються з додаванням наприкінці твердого палива, крупністю 0-7 мм. Виробництво агломерату після грудкування запропонованим способом характеризується збільшенням виходу придатного агломерату на 10,29 %, збільшенням виходу фракції +5 мм на 11,5% після випробування на міцність та зменшення вмісту фракції 0-5 мм на 11,5%. (Отримано Патент України на корисну модель)

5. Визначені основні вимоги для ефективної стабілізації агломерату за гранулометричним складом і міцністю під час механічної обробки: спільна дія сил удару, стирання та розколювання; зменшення енергії навантаження по ходу обробки

зі 100 до 30-40 Дж/кг зі зменшенням крупності самих кусків.

6. Розроблена математична модель руйнування агломерату в пристрої барабанного типу. Визначені конструкційні та технологічні фактори, які впливають на процес руйнування кусків в барабані: його радіус, частота обертання, кількість та ширина полиць, ступінь завантаження барабана матеріалом. Моделювання дозволило визначити характер впливу цих факторів на величину та вид енергії навантаження на агломерат.

7. Доведено, що для стабілізації агломерату за крупністю та міцністю в пристрої барабанного типу необхідно виділити три характерні зони з різним механізмом руйнування, шляхом зменшення величини та кількості полиць в них: дроблення - з максимальною необхідною величиною загальних та ударних навантажень; стабілізації характеристик за крупністю за рахунок зменшення ударних навантажень; стирання, яке має забезпечити мінімізацію ударних навантажень, з основною дією сил, які дозволять видалити гострі виступи для надання агломерату кулястої форми. Запропоновані оптимальні конструкційні та технологічні параметри барабана-стабілізатора, які дозволять забезпечувати необхідний рівень початкових навантажень на агломерат в межах 60-100 Дж/кг з подальшим зменшенням енергетичних сил до 30-40 Дж/кг агломерату. (Отримано Патент України на корисну модель)

8. Підтверджено, що використання розробленої комплексної технологічної схеми отримання агломерату, стабілізованого за крупністю та міцністю, дозволить зменшити вміст дріб'язку в ньому з 12 до 3-4% без значного збільшення кількості звороту, покращити хімічний склад та коефіцієнт форми кусків, що позитивно впливає на порозність і газопроникність шару шихти, в якій використовується такий матеріал. Використання даного агломерату в доменному виробництві призведе до зниження питомої витрати коксу на виплавку чавуну на 4%, та збільшення продуктивності доменній печі на 8%.

Основний зміст дисертації відображено в наступних публікаціях:

1. Фахові видання:

1. Бочка В.В. Дослідження особливостей взаємодії кусків агломераційного спеченця в барабані-стабілізаторі / В.В.Бочка, А.В. Сова, А.В.Двоєглазова та ін. // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2016. - №5. – С. 8-11.
2. Бочка В.В. Особенности формирования напряженного состояния и разрушения агломерата / В.В.Бочка, А.В. Сова, А.В.Двоєглазова и др. // *Металл и Литьё Украины*. – 2017. - №6-7. – С. 1-4.
3. Бочка В.В. Исследование особенностей процесса разрушения агломерата в устройстве барабанного типа / В.В.Бочка, А.В. Сова, А.В.Двоєглазова // *Металл и Литьё Украины*. – 2018. - №11-12. – С. 1-8.
4. Бочка В.В. Особливості спікання агломерату при використанні шихти з попередньо підготовленими композитами / В.В.Бочка, А.В. Сова, А.В.Двоєглазова та ін. // *Сучасні проблеми металургії. Наукові вісті*. – 2019. - №22. – С. 3-12.
5. Бочка В.В. Улучшение качества агломерата путем усовершенствования способа подготовки шихты/ В.В.Бочка, А.В. Сова, А.В. Двоєглазова // *Металл и Литьё Украины*. – 2019. - №1-2. – С. 3-10.
6. Бочка В.В. Удосконалення технології виробництва якісного агломерату / В.В.

Бочка, А.К. Тараканов, А.В. Сова, М.М. Бойко, М.В. Ягольник, А.В. Двоєглазова // Теорія і практика металургії. – 2019. - №1. – С. 5-14. doi:10.34185/tpm.1.2019.01

2. Статті у наукових виданнях інших держав:

7. Бочка В.В. Исследования оптимальной механической обработки агломерата/ В.В.Бочка, А.В. Сова, А.В.Двоєглазова // XIX INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE «New technologies and achievements in metallurgy, material engineering and production engineering», a collective monograph, Czestochova, 2018. P. 129-133.

3. Патенти на корисну модель:

8. Барабан-стабілізатор із завантажувальним пристроєм. Патент на корисну модель №100418 Україна// С.Є. Суліменко, В.В. Бочка, Є.І. Суліменко, А.В. Сова// опубл. 27.07.2015 р. Бюл. №14.

9. Пристрій для стабілізації агломерату за крупністю. Патент на корисну модель №129583 Україна// В.В. Бочка, А.В. Сова, А.В. Двоєглазова.

4. Матеріали наукових конференцій:

10. Бочка В.В. Вдосконалення технології агрегатів для механічної обробки спеку/ В.В. Бочка, А.В. Сова, А.В.Двоєглазова та ін. // 41-ша Міжнародна науково-технічна конференція молоді, м. Запоріжжя – 2014. – С. 16.

11. Сова А.В. Дослідження особливостей виробництва стабілізованого за крупністю агломерату/ А.В. Сова, В.В. Бочка, А.В.Двоєглазова та ін. // 42-га Міжнародна науково-технічна конференція молоді, м. Запоріжжя – 2015. – С. 14.

12. Сова А.В. Вдосконалення конструкції завантажувального пристрою для барабану-стабілізатора/ А.В. Сова, В.В. Бочка, А.В.Двоєглазова та ін. // V Міжнародна науково-практична конференція «Литьє. Металлургия 2016» , м. Запоріжжя – 2016. – С. 418.

13. Сова А.В. Дослідження причин утворення внутрішнього напруження в агломераті, та пошук оптимальної енергії руйнування спеченця / А.В. Сова, В.В. Бочка, А.В.Двоєглазова та ін. // 43-тя Міжнародна науково-технічна конференція молоді, м. Запоріжжя – 2016. – С. 17.

14. Бочка В.В. Поведінка агломерату при механічних навантаженнях / В.В.Бочка, А.В.Двоєглазова, А.В. Сова та ін. // Матеріали конференції «Актуальні проблеми розвитку металургійної науки та освіти», присвячена 100-річчю Г.Г.Єфіменко, м. Дніпро – 2017. – С. 233-237.

15. Сова А.В. Пошук оптимальної схеми реалізації внутрішніх напружень в агломераті/ А.В. Сова, В.В. Бочка, А.В.Двоєглазова та ін. // VI Міжнародна науково-практична конференція «Металлургия 2017», м. Запоріжжя – 2017. – С. 408.

16. Сова А.В. Розробка математичної моделі руйнування агломераційного спеченця в агрегаті стабілізаторі барабанного типу / А.В. Сова, В.В. Бочка, А.В.Двоєглазова та ін. // 44-та Міжнародна науково-технічна конференція молоді, м. Запоріжжя – 2017. – С. 14.

17. Бочка В.В. Можливості отримання стабілізованого агломерату / В.В. Бочка, А.В. Сова, А.В.Двоєглазова // VII Міжнародна науково-практична конференція «Металлургия 2018» , м. Запоріжжя – 2018. – С 240.

18. Bochka V. Modeling of the mechanical processing of an agglomerate in the drum type device / V. Bochka, A. Sova, A. Dvoiehlazova // 13th International symposium of Croatian metallurgical society. Sibenik, Croatia, June 24-28, 2018.

19. Bochka V. Influence of structural and technological parameters of the drum type device on the mechanical processing of agglomerate / V. Bochka, A. Sova, A. Dvoiehlazova // 13th International symposium of Croatian metallurgical society. Sibenik, Croatia, June 24-28, 2018.
20. Сова А.В. Вплив роздільного огрудкування шихти на якість агломерату / А.В. Сова, В.В. Бочка, А.В. Двоєглазова, М.В. Ягольник // 45 Міжнародна науково-технічна конференція молоді, м. Запоріжжя - 2018. – С. 19.
21. Бочка В.В. Удосконалення технології виробництва якісного агломерату / В.В. Бочка, А.В. Сова, А.В. Двоєглазова, М.О. Ващенко // VIII Міжнародна науково-практична конференція «Металлургия 2019», м. Запоріжжя – 2019. – С. 256-257.

Анотація

Сова А.В. «Удосконалення технології виробництва агломерату шляхом формування раціональної блокової структури на основі роздільної підготовки шихти та механічної обробки спеченця». – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.16.02 – «Металургія чорних і кольорових металів та спеціальних сплавів». – Національна металургійна академія України. - м. Дніпро – 2020.

Метою роботи є удосконалення технології виробництва агломерату в сучасних умовах на основі результатів дослідження ефективних методів роздільної підготовки компонентів шихти перед спіканням, а також способів механічної обробки спеченця в пристроях спеціальної конструкції.

Встановлено, що попереднє роздільне грудкування композиту з концентрату – руди – вапна – вапняку, основністю 0,9-1,0 од., та залишкової шихти основністю 1,6-1,8 з подальшою спільною грануляцією дозволяє формувати гранули необхідного складу та крупності, що позитивно впливає на якість спеченого агломерату.

Проведені дослідження щодо оптимізації конструкційних та технологічних параметрів барабана-стабілізатора, котрий забезпечує ефективну механічну обробку агломерату.

Використання запропонованої схеми підготовки стабілізованого за крупністю та міцністю агломерату дозволить зменшити вміст дріб'язку в ньому з 12 до 3-4% без значного збільшення кількості звороту.

Ключові слова: агломерат, мінералогічний склад, міцність, зв'язка, композит, основність, олівіни, ферити, механічна обробка, барабан-стабілізатор.

Absract

Sova A. «The improvement of production technology of agglomerate by forming rational cluster structure using separate preparation of charge and machining of cake». – The manuscript.

The dissertation on competition of a scientific degree of candidate of technical sciences, speciality 05.16.02 - "Metallurgy of ferrous and non-ferrous metals and special alloys". National metallurgical Academy of Ukraine. - Dnipro - 2020.

The goal of the work is the improvement of production technology of agglomerate in the current circumstances based on the results of researching of effective methods of separate preparation of charge constituents before sintering and methods of machining of cake in specially designed machines.

It has been found, that preliminary separate pelletizing of composite out of concentrates – ore – lime – limestone with 0,9-1,0 units of basicity and residual charge with 1,6-1,8 of basicity together with further common granulation allows to form granules with necessary composition and size. It has positive impact on quality of sintered agglomerate.

The studies in the regard of optimization of construction and technological parameters of drum type device, which provides effective machining of agglomerate were made.

The using of proposed scheme of preparation of agglomerate that was stabilized by size and solidity will allow to decrease the content of trifle in it from 12 to 3-4% without significant increase in amount of fine fraction.

Keywords: agglomerate, mineralogical composition, solidity, bond, composite, basicity, olivines, ferrites, machining, drum type device.

СОВА АРТЕМ ВАЛЕРІЙОВИЧ

**УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ВИРОБНИЦТВА АГЛОМЕРАТУ
ШЛЯХОМ ФОРМУВАННЯ РАЦІОНАЛЬНОЇ БЛОКОВОЇ СТРУКТУРИ НА
ОСНОВІ РОЗДІЛЬНОЇ ПІДГОТОВКИ ШИХТИ ТА МЕХАНІЧНОЇ ОБРОБКИ
СПЕЧЕНЦЯ**

Автореферат

дисертації на здобуття наукового ступеню
кандидата технічних наук

Підписано до друку 11.02.2020р. Формат 60х90/16.
Папір офсет. Різографія. Ум.друк.арк. 1,3.
Тираж 100прим. Зам.№215

Надруковано «Поліграфцентр» ФО-П Кочугурний Ю.М.,
свідоцтво про державну реєстрацію №2 224 000 0000 073863,
м. Дніпро, вул.Воскресеньська, 11, 49006