

УДК 669.162

<https://doi.org/10.34185/tpm.1.2019.01>

Бочка В.В., Тараканов А.К., Сова А.В., Бойко М.М., Ягольник М.В., Двоеглазова А.В.

Удосконалення технології виробництва якісного агломерату*Bochka V., Tarakanov A., Sova A., Boyko M., Yagolnyk M., Dvoiehlazova A.***Improving the technology production of quality agglomerate**

Мета. Існуюча технологічна схема агломерації не дозволяє отримувати стабілізований за крупністю та міцністю агломерат з низьким вмістом дріб'язку. Метою роботи є теоретичне обґрунтування та розробка заходів по удосконаленню технології виробництва агломерату в сучасних умовах на основі результатів дослідження ефективних методів роздільної підготовки шихти перед спіканням, а також способів механічної обробки спеченого агломерату у пристроях спеціальної конструкції. *Методика.* Аналіз основних термодинамічних показників та фазового складу для компонентів агломераційної шихти проводили за допомогою програмного комплексу HSC Chemistry 5.11. Дослідження впливу роздільної підготовки шихти з використанням попередньо підготовлених композитів на показники спікання та якість агломерату проводили в лабораторії кафедри металургії чавуну НМетАУ на установці для спікання. Визначення ефективності запропонованих заходів проводили шляхом механічної обробки агломератів, отриманих після класичної та запропонованої схеми підготовки шихти. *Якість* отриманого агломерату оцінювали за допомогою показників: рівномірності гранулометричного складу, вміст дріб'язку, показники міцності після скидання на сталеву плиту [ДСТУ 3199-95], коефіцієнт форми кусків різної крупності, хімічний склад. *Результати.* Визначено, що використання роздільної підготовки шихти має позитивний вплив: значно зменшується кількість незгрудкованої фракції 0-1 мм та збільшується еквівалентний діаметр гранул; зменшуються показники середньо-квадратичного відхилення та коефіцієнту варіації, що свідчить про отримання більш однорідного гранулометричного складу сирих гранул. Підтверджена ефективність роздільної підготовки шихти з використанням композиту основністю 0.9-1.0 од. із концентрату (крупністю 0-0.1 мм), залізної руди (0-3 мм), вапна (0-3 мм) та вапняку (0-3 мм) та залишкової шихти основністю 1,6-1,8 од. із залізної руди (3-10 мм), звороту (0-10 мм) та вапняку (0-3 мм). Наукова новизна. Розвинуто уявлення щодо взаємодії різних компонентів агломераційної шихти під час роздільних процесів зволоження та грудкування. Обґрунтовано можливість утворення більш однорідних за розмірами та складом гранул, шляхом їх 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. Показано, що в залежності від заданих умов на етапі роздільної підготовки шихти формується в'язуча частина переважно з залізо-кальцієвих олівінів і феритів кальцію. *Практична значущість.* Розроблені технологічні рекомендації щодо підвищення ефективності підготовки агломераційної шихти до спікання та практичні рекомендації щодо конструкції і технологічних параметрів роботи барабана-стабілізатора, що забезпечує отримання стабілізованого за крупністю та міцністю агломерату.

Ключові слова: мінералогічний склад, зв'язка, композит, основність, олівіни, ферити.

Purpose. The existing technological scheme of agglomeration does not allow obtaining a amount of agglomerate stabilized by size and strength with a small amount of trifle. The aim of the work is theoretical substantiation and development of measures to improve agglomerate production technology in modern conditions on the basis of the results of the study of effective methods of separate preparation of the charge before sintering, as well as methods of mechanical processing of sintered agglomerate in devices of special construction. *Methodology.* The analysis of the basic thermodynamic parameters and phase composition for the components of the sinter charge was carried out using the software complex HSC Chemistry 5.11. Investigation of the effect of separate preparation of the charge with the use of pre-prepared composites on the parameters of sintering and the quality of agglomerate was carried out in the laboratory of the department metallurgy of cast iron NMetAU at the aggregate for sintering. The determination of the effectiveness of the proposed measures was carried out by mechanical processing of agglomerates obtained after the classical and proposed scheme of preparation of the charge. The quality of the obtained agglomerate was estimated using indicators: uniformity of the granulometric composition, content of trifles, strength indicators after discharge to the steel plate [DSTU 3199-95], coefficient of shape of pieces of different sizes, chemical composition. *Findings.* It has been determined that the use of separate preparation of the charge has a positive effect: significantly decreases the amount of fraction 0-1 mm and increases the equivalent diameter of the granules; diminishes the mean square deviation and variation coefficient, indicating a more homogeneous granulometric composition of raw granules. The efficiency of separate preparation of a charge with the use of composite with the basicity of 0.9-1.0 is confirmed from a concentrate (size 0-0.1 mm), iron ore (0-3 mm), lime (0-3 mm) and limestone (0-3 mm) and residual blend with the basicity of 1.6-1.8 from iron ore (3-10 mm), sinter return (0-10 mm) and limestone (0-3 mm). *Originality.* The idea of interaction of different components of agglomeration charge during the separate processes of humidification and laceration is developed. The possibility of forming more homogeneous in size and composition of granules is substantiated, by their separate origin not only around large pieces of backs and ores, but also due to the separate interaction of small components with active surface properties, and subsequent joint granulation of the embryos of granules with the residual charge. It is shown that depending on the given conditions, at the stage of separate preparation of the charge, a binder part is formed predominantly of iron-calcium olivines and calcium ferrites. *Practical value.* Technological recommendations for increasing the efficiency of preparation of sinter charge to sintering and practical recommendations for the design and technological parameters of the drum-stabilizer work, which ensures the stabilization of agglomerate. *Key words:* mineralogical composition, bundle, composite, basicity, olivine, ferrites.

Вступ. Підвищення якості шихтових матеріалів є одним з найбільш ефективних напрямків удоско-

налення технології та техніко-економічних показників доменної плавки. [1]

Бочка Володимир Васильович – д.т.н., проф. НМетАУ.,
Тараканов Аркадій Костянтинович – д.т.н., проф. НМетАУ
Сова Артем Валерійович – аспірант НМетАУ
Бойко Максим Миколайович – к.т.н., НМетАУ
Ягольник Максим Вікторович – к.т.н. НМетАУ
Двоеглазова Аліса Вікторівна – к.т.н.

Bochka Volodimir – d.t.s., prof NMetAU
Tarakanov Arkadii – d.t.s., prof NmetAU
Sova Artem – postgraduate NmetAU
Boyko Maksim – c.t.s., assistant professor NmetAU
Yagolnyk Maksim – c.t.s., assistant professor NmetAU
Dvoiehlazova Alisa – c.t.s.

В Україні основним залізовмісним компонентом доменної шихти залишається агломерат. До його якості висуваються вимоги: максимально високий вміст заліза, мінімальна кількість шкідливих домішок, постійність хімічного та гранулометричного складів, висока здатність до відновлення та газопроникність насипної маси, висока міцність і низький вміст фракції 0-5 мм. [2]

Формування якості агломерату є комплексною задачею і здійснюється на кожній стадії його виробництва. Отримання якісного агломерату, стабілізованого за крупністю та міцністю, залежить від можливості формування на етапі підготовки шихти до спікання блокової структури та мінералогічного складу в'язучої частини високої міцності. Існуючі схеми підготовки шихти не в змозі в повній мірі забезпечити виконання цих вимог.

Аналіз літературних даних та постановка проблеми. Міцність агломерату визначається мінеральним складом зв'язок рудних зерен, який залежить від основності шихти [3] та змінюється відповідно до її складу, умов підготовки та подальшому режиму спікання. [4] Найбільш міцними компонентами зв'язки є ферити кальцію та залізо-кальцієві олівіни низької основності [5].

Формування якості агломерату відбувається на всіх етапах його виробництва. Існуюча технологічна схема агломерації передбачає три етапи: підготовку шихти шляхом змішування, зволоження та грудкування усіх її компонентів; процес спікання; механічну обробку спеченого продукту та його охолодження. [6]

У статті [7] доведено значний вплив на структуру та якість агломерату ефективності грануляції, стабільності ядра і обсягу первинного розплаву агломерату та властивостей залізної руди. При підготовці шихти з використанням усіх компонентів отримати високий ступінь однорідності гранул за крупністю та хімічним складом проблематично через недостатнє врахування особливостей поведінки матеріалів при зволоженні та грудкуванні, а також через значні коливання розмірів часток агломераційної шихти. Особливо це стосується використання шихт, які містять значну кількість концентрату крупністю менше 0.1 мм та крупнозернистих компонентів, таких як залізна руда та зворот. Представлені результати досліджень [8] підтверджують, що використання значної кількості концентрату призводить до зниження продуктивності спікання.

У результаті підготовки такої шихти значна кількість дрібної фракції не грудкується зовсім (до 25-30%), а на крупні фракції накопчується тонкоподібнений матеріал з утворенням гранул розміром більше 10-15 мм, які під час руху в барабані-грудкувачі руйнують більш слабкі дрібні гранули. Це призводить до зниження газопроникності агломераційної шихти. Окрім того, така схема грудкування не забезпечує в достатній мірі рівномірне розподілення компонентів у гранулах, що негативно впливає на процеси твердо- та рідкофазного

спікання агломерату. Таким чином, дана технологічна схема підготовки шихти суттєво обмежує можливості формування та виробництва агломерату заданого складу та високої міцності, що висуває необхідність розробки нових шляхів удосконалення підготовки агломераційної шихти до спікання.

Одним із напрямків вирішення цього питання є використання роздільного грудкування компонентів шихти до спікання. При такому способі підготовки шихти, її компоненти розділяють на дві частини. У роботі [9] запропоновано спосіб двостадійної технології грануляції, в якому 70% шихти зволожували з надлишком та гранулювали в малому барабані, після чого на неї накопчували залишкову шихту, що позитивно впливало на гранулометричний склад отриманих гранул і їх зволоження.

У роботах [10; 11] автори стверджують, що процес утворення гранул в барабані суттєво покращується без додавання у початкову шихту палива.

У роботі [12] зроблено висновок, що підвищити пористість і газопроникність шару шихти можливо в спеціальному барабані-грудкувачі, в першій частині робочого простору якого утворюються зародки гранул крупністю 2-2,6 мм, а у другій частині вже здійснюється накат усієї іншої шихти на поверхню зародків, що призводить до збільшення крупності і міцності гранул.

Наведені результати досліджень дають можливість припустити, що використання роздільної підготовки шихти може сприяти як і покращенню процесів утворення гранул, так і можливості впливати на фазовий склад агломерату. Цього можна досягти шляхом формування із усіх компонентів композиту (суміші декількох компонентів шихти, яка грудкується окремо з метою покращення взаємодії матеріалів між собою та вологою) та залишкової шихти оптимального складу та властивостей.

У роботі [13] розроблена технологія спікання агломерату з подачею додаткового флюсу в нижній шар спікання. Це дозволяє отримувати шихту основністю: 0.98 - у нижньому шарі, 2.4 - у верхньому, що сприяє утворенню залізозалієвих олівінів і феритів кальцію. Перевагами цього способу підготовки над роздільною підготовкою є те, що він не потребує додаткового тракту грудкування. Проте, він не дозволяє реалізувати оптимальні умови взаємодії компонентів між собою та з вологою, що впливає на рівномірність крупності гранул.

Важливим технологічним етапом, задачею якого є виділення зі спеченого агломерату міцної складової зі стабілізацією його крупності (5-40 мм), складу та властивостей без утворення значної кількості дріб'язку (0-5 мм) є його механічна обробка.

Основні вимоги для ефективної стабілізації агломерату 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. [4]

Значну увагу в роботі приділено особливостям механічної обробки агломерату в різних пристроях. В сучасних умовах агломерат перед відправленням у доменний цех піддається механічній обробці переважно в дробарках різного типу та подальшому відсіванню на грохотах різної конструкції. [14] Недоліком використання дробарок є відсутність можливості контролю необхідної величини навантаження, прикладеного до агломерату, та переважна однотипність діючих сил руйнування. [15] Це призводить до подрібнення кусків з утворенням значної кількості дріб'язку, а не ефективного виділення зі спеченця міцної складової. Сучасні грохоти не пристосовані до руйнування агломерату, а виконують лише відсів дріб'язку, що не дозволяє у повній мірі реалізувати внутрішні напруження у кусках і стабілізувати склад і крупність агломерату. В цих умовах все більше досліджень присвячується проблемі зниження однотипних навантажень в дробарках на агломерат. [16] Використання після зубчатої дробарки барабана-стабілізатора, робочий простір якого обладнано певною кількістю полиць [17], дозволяє проводити обробку агломерату із забезпеченням водночас різних сил навантаження (удару, стирання та розколювання). Механічна обробка здійснюється при взаємодії кусків різної форми та крупності, що рухаються за своїми траєкторіями. Істотним недоліком цього пристрою є відсутність достатнього аргументування вибору конструкційних і технологічних параметрів роботи барабана-стабілізатора, що не дозволяє ефективно управляти механізмом стабілізації агломерату. Полиці, обладнані в робочому просторі збільшуються від зони завантаження пристрою до його зони розвантаження, що сприяє збільшенню діючих сил на агломерат.

Для вирішення проблеми зменшення навантаження на агломерат в барабані-стабілізаторі розроблений пристрій [18], полиці в якому мають трапецеїдальну форму із зазором між собою. Однак така форма полиць не забезпечує рівномірного поступового зменшення діючих сил від 100 Дж/кг до 30-40 Дж/кг.

Для забезпечення оптимальної дії механічних навантажень у барабані (зменшення енергії та виду навантаження по ходу обробки), запропоновано [19] виділити у пристрої три характерні зони з різ-

ним механізмом руйнування агломерату: дроблення - з максимальною необхідною 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 дозволяють видалити гострі виступи для надати агломерату кулястої форми (30-40 Дж/кг).

У зв'язку з цим дослідження, спрямованні на вивчення фізико-хімічних закономірностей формування заданої структури агломерату на стадіях підготовки шихти до спікання та оптимізації механічної обробки спеченця в пристрої барабанного типу є актуальними для отримання агломерату, стабілізованого за міцністю та крупністю.

Мета і завдання досліджень. Теоретичне обґрунтування та розробка заходів по удосконаленню технології виробництва агломерату в сучасних умовах 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:

обґрунтувати на основі фізико-хімічних досліджень можливість формування складу та покращення властивостей агломерату; визначити умови для створення в агломераті міцної міжблокової зв'язки при формуванні на етапі підготовки шихти до спікання з компонентів шихти композитів різного складу та властивостей; провести лабораторні спікання агломерату з метою визначення раціональних параметрів технології роздільного грудкування з використанням композитів заданого складу та крупності; Матеріали та методи дослідження. Аналіз основних термодинамічних показників та фазового складу для компонентів агломераційної шихти проводили за допомогою програмного комплексу HSC Chemistry 5.11.

Дослідження впливу роздільної підготовки шихти з використанням попередньо підготовлених композитів на показники спікання та якість агломерату проводили в лабораторії кафедри металургії чавуну НМетАУ на установці для спікання.

Таблиця 1 - Склад шихти

Склад шихти	Концентрат (К)	Залізна руда (Р)		Зворот (З)	Вапно (Во)	Вапняк (Вк)	Кокс (Кс)	Загалом
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

Роздільну підготовку агломераційної шихти проводили наступним чином: з реальної агломераційної шихти основністю $(CaO/SiO_2) = 1.27$ од. (табл.1) дозували, зволожували та грудкували дво-, три- та чотирикомпонентні композити, а залишкову шихту дозували, зволожували та змішували

окремо. Після цього гранули композиту в барабані-грануляторі гранулювали з залишковою шихтою. Тверде паливо подавали наприкінці грануляції. Сумарна витрата води на кожне спікання становила 9% від загальної маси шихти, її розподіляли по масі композиту та залишкової шихти.

Для оцінки гранулометричного складу сирих гранул їх розділяли на класи крупності за допомогою сит з діаметрами отвору: 1, 3, 5, 7, 10 мм. Ефективність підготовки шихти з використанням різних дво-, трьох-, чотирикомпонентних композицій на основі концентрату оцінювали за допомогою наступних показників: еквівалентний діаметр куска, коефіцієнт варіації крупності гранул, середньоквадратичне відхилення крупності, кількість дріб'язку (фракції 0-1 мм).

Якість спеченого агломерату оцінювали за допомогою показників: вихід придатного (фракція +10 мм), вихід агломерату після випробування на міцність (фракції +5 мм) і вміст фракції 0-5 мм, дослідження фазового складу отриманого агломерату за допомогою мікроструктурного аналізу.

На етапі механічної обробки запропоновано використання дослідного барабана-стабілізатора зі змінною кількістю та шириною полиць, ефективність роботи якого представлена у роботі [19].

Визначення ефективності запропонованих заходів проводили шляхом механічної обробки агломератів, отриманих після класичної та запропонованої схеми підготовки шихти, шляхом потрійного скидання на сталеву плиту, ударні навантажен-

ня від якого моделюють дію дробарки. Для запропонованої схеми підготовки здійснювали подальшу обробку у дослідному барабані.

Якість отриманого агломерату оцінювали за допомогою показників: рівномірність гранулометричного складу, вміст дріб'язку, показники міцності після скидання на сталеву плиту [ДСТУ 3199-95], коефіцієнт форми кусків різної крупності, хімічний склад.

Результати дослідження. Проведено термодинамічний аналіз вірогідності реакцій утворення різних мінералів в семикомпонентній системі (Fe, Si, Ca, Mg, Al, O, C), яка відповідає в цілому складу шихти для спікання агломерату.

На рис.1а наведена залежність величин вільної енергії Гіббса від температури. Вона показала вірогідність утворення в даному середовищі зв'язки з фаяліту, деяких залізо-кальцієвих олівінів і феритів кальцію.

Як показало дослідження ентальпії (рис. 1б), утворення усіх мінералів характеризується екзотермічним ефектом. Лише в діапазоні температур 1473-1673 К формування 2FeOSiO_2 та однокальцієвого фериту відбувається в ендотермічних умовах.

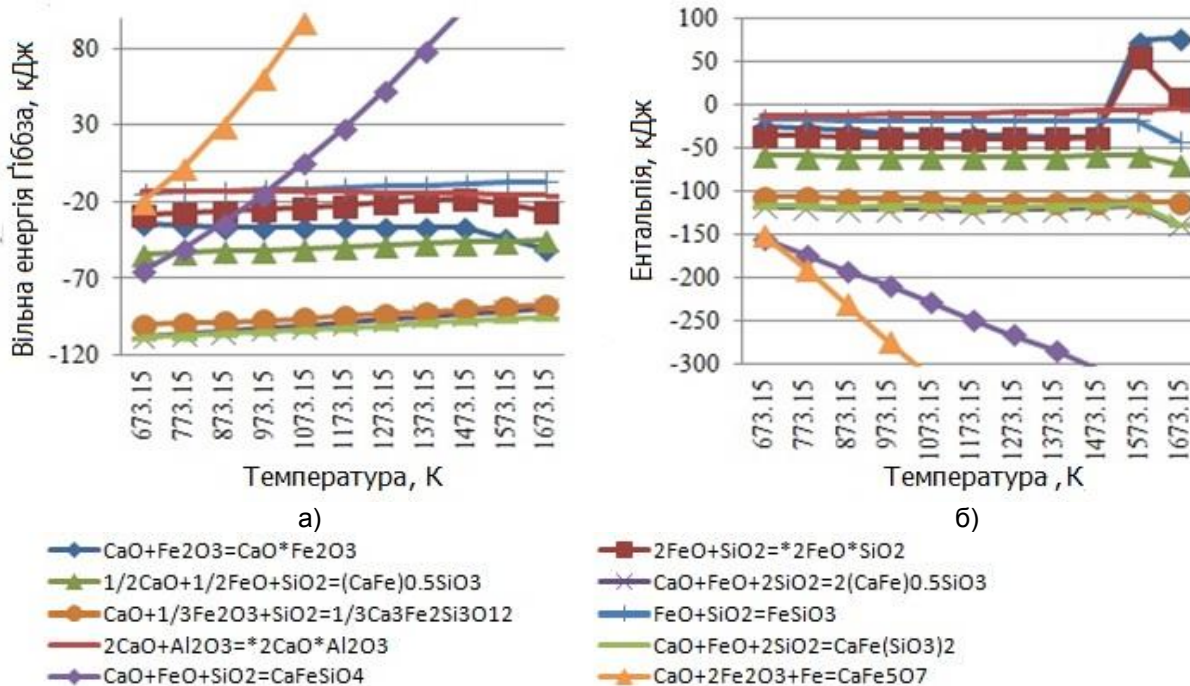


Рисунок 1 – Залежність величин енергії Гіббса (а) й ентальпії (б) в семикомпонентній системі від температури.

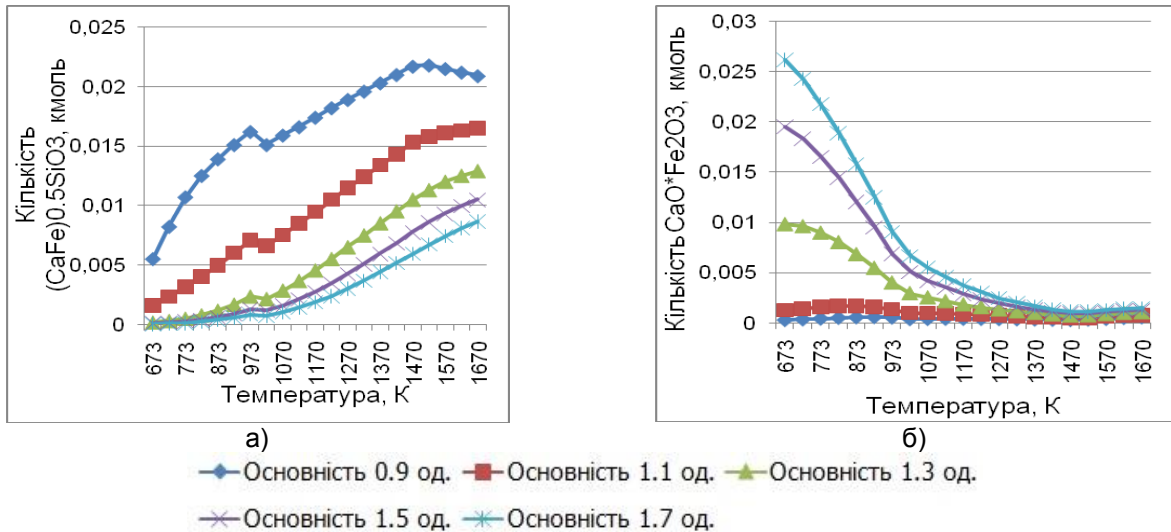


Рисунок 2 – Залежність кількості компонентів фазового складу при різних показниках основності від температури.

В заданій системі міжблокова зв'язка може бути представлена в основному залізокальцієвими олівінами, фаялітом, та в незначній мірі феритами кальцію. На основі фазового аналізу виконано дослідження впливу основності системи на кількість утворених в ній залізокальцієвих олівінів (рис. 2а) та феритів кальцію (рис. 2б).

Проведено дослідження способів підготовки агломераційної шихти з використанням попередньо

підготовлених композитів. Воно складалося з двох етапів.

На першому етапі вивчали особливості впливу вологи на процеси грудкування шихти з різними композитами (рис. 3). Компоненти шихти попередньо подрібнювали до фракції 40-63 мікрон, щоб унеможливити вплив крупності на капілярні явища.

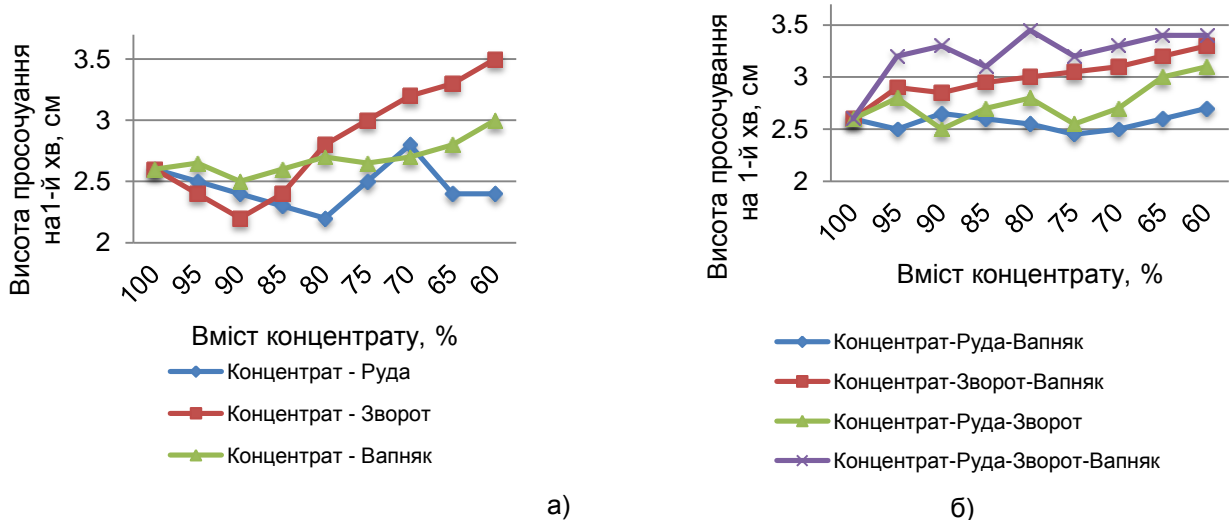


Рисунок 3 – Вплив складу двокомпонентних (а) і багатоконпонентних (б) сумішей на висоту просочування.

На другому етапі проведено дослідження впливу підготовки шихти з використанням попередньо підготовлених композитів на показники показники крупності сирих гранул (табл. 2) та якості агломерату (табл. 3).

Підготовка шихти з використанням композиту з «КРВоВк» дозволяє формувати склад і основність самого композиту та залишкової шихти шляхом

зміни вмісту вапняку в них (табл. 4), що впливатиме на розподілення матеріалів у сирих гранулах та на кінцеву структуру агломерату (рис. 4).

Проведено порівняння ефективності класичної та запропонованої схеми отримання агломерату з використанням для механічної обробки пристрою барабанного типу заданої конструкції та параметрів роботи.

Таблиця 2 - Показники крупності гранул при різних способах грудкування

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 наведеного 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	

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

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
1/1,65	81,74	93	7
1,05/1,59	80,04	91,7	8,3
1,11/1,51	78,55	90,3	9,7
1,15/1,45	77,15	89,2	10,8
1,2/1,39	74,55	87	13
1,25/1,32	72,2	82,5	17,5

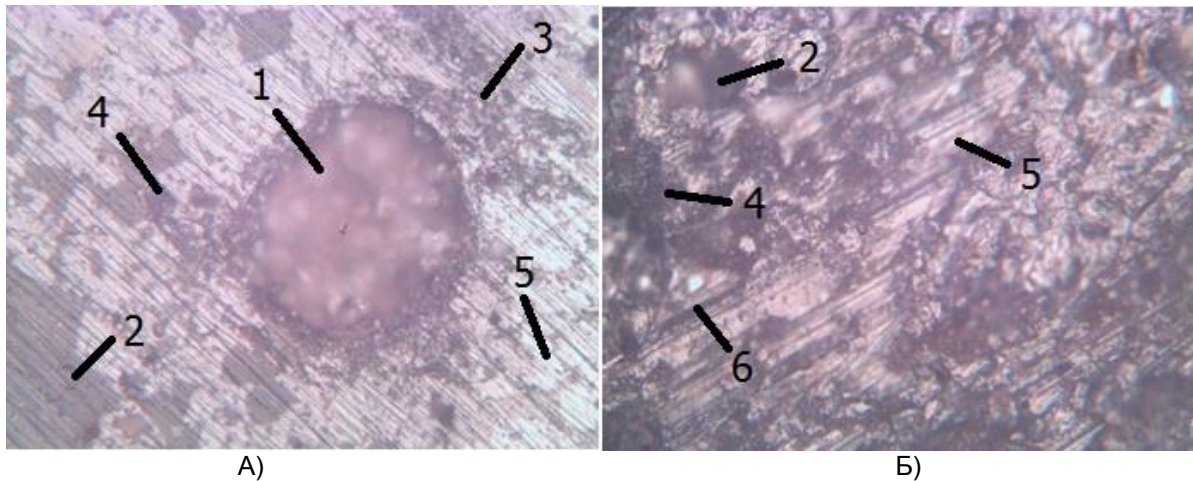


Рисунок 4 - Структура агломерату, спеченого після сумісної підготовки шихти (А) та після підготовки шихти з використанням композиту з «КРВоВк» (Б): 1 – неспечені компоненти; 2 – пори; 3 – силікатне озеро; 4 – олівіни, 5 – магнетит, 6 - ферити кальцію

Агломерат, спечений за класичною схемою підготовки шихти проходив механічну обробку шляхом потрійного скидання на сталеву плиту, ударні навантаження від якої моделюють дію дробарки. Агломерат, спечений після підготовки шихти запропонованим способом окрім скидання на мета-

леву плиту проходив подальшу обробку у дослідному барабані з трьома робочими зонами з різною величиною та видом енергетичних навантажень, що забезпечує оптимальний механізм руйнування агломерату. [19]

Таблиця 5 – Хімічний та гранулометричний склад агломерату до та після стабілізації в пристрої барабанного типу

Вид агломерату	Хімічний склад, %						Гранулометричний склад, %				
	Fe _{заг}	FeO	CaO	SiO ₂	MgO	Осн.	40+ мм	25-40 мм	10-25 мм	5-10 мм	0-5 мм
Вихідний	55,8	13,1	11,3	9,28	0,63	1,28	16,3	18,2	28,5	19,2	17,8
Стабілізований	56,3	13,21	11	9,22	0,635	1,26	4,15	13,35	30,5	27,1	24,9

Порівняння характеристик агломератів, отриманих за класичною та запропонованою технологією представлене у табл. 5-6, їх зовнішній вид – на рис. 5.

Таблиця 6 – Коефіцієнт форми кусків до та після стабілізації в пристрої барабанного типу

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 5 – Вид агломерату підготовленого (а) та після (б) механічної обробки в пристрої барабанного типу

Обговорення результатів. Розрахунки фазового складу підтвердили значний вплив основності шихти на вміст у ньому міцних зв'язуючих компонен-

тів: залізокальцієвих олівінів та феритів кальцію. З рис. 2а видно, що кількість олівінів збільшується при зменшенні основності шихти до рівня 0.9-1.0

од.. Поява феритів кальцію (рис. 2б) у значній кількості потребує, в свою чергу, збільшення основності до рівня 1.6-1.7 од. фазового складу агломерату від різних факторів привів до висновку, що формування блокової структури з міцною міжблоковою зв'язкою можливе шляхом роздільної підготовки шихти основністю 0.9-1.0 та 1.6-1.7 од.. Це можливо забезпечити формуванням з агломераційної шихти композиту та залишкової шихти заданого складу, який відповідатиме цим показникам основності, та властивостей.

Дослідження капілярних явищ показали, що вид та склад композиту в значній мірі впливають як на кінетику капілярних явищ, так і на процеси грудкування шихти. Попри наявність аномальних результатів, підбір окремих шихтових матеріалів з різними властивостями поверхні та здатності до взаємодії з вологою, мають ключове значення у процесах гранулоутворення.

Використання у композиті звороту (рис. 3а) в значній мірі підвищує його здатність до взаємодії з водою. Додавання у систему вапняку призводить до незначного поліпшення взаємодії суміші з вологою.

Серед багатокомпонентних сумішей (3б) найкращі за рівномірністю показники просочування вологи належать композиту з концентрату, руди та вапняку, в результаті використання якого отримуємо усереднене значення – 2.5-3.1 см, що спричинене взаємодією компонентів з різною активністю поверхневих властивостей.

Це дозволяє обґрунтувати ефективність застосування роздільної підготовки шихти, завдяки якій будуть створені умови формування гранул не лише навколо крупних кусків руди та звороту, а й під час взаємодії між собою дрібних компонентів з активними поверхневими властивостями.

Згідно з наведеними у табл. 2 даними можна відзначити, що використання роздільного грудкування в цілому позитивно впливає на процес підготовки шихти. Так, після грудкування шихти з використанням попередньо підготовлених композитів у порівнянні з сумісним грудкуванням значно зменшується кількість незгрудкованої фракції 0-1 мм та збільшується еквівалентний діаметр гранул; зменшуються показники середньо-квадратичного відхилення та коефіцієнту варіації, що свідчить про отримання більш однорідного гранулометричного складу сирих гранул.

У той же час слід відзначити, що при роздільному грудкуванні в сирих гранулах збільшується вміст фракції +10 мм, яка негативно впливає на процес спікання агломерату. Основною причиною цього може бути наявність в шихті крупних часток руди та звороту, які суттєво впливають на процеси утворення та росту гранул.

Використання роздільної підготовки шихти, незважаючи на покращення гранулометричного складу сирих гранул, неоднозначно впливає на процес спікання та показники якості агломерату, що видно з табл. 3.

Серед двокомпонентних композитів, представлених у табл. 3, слід відзначити позитивний вплив флюсів при додаванні до концентрату. Формування композиту «концентрат – руда» призводить до значного перезволоження та утворення крупних гранул, а також не дозволяє рівномірно розподіляти флюс, що в свою чергу погіршує процес спікання та якість агломерату. Через значну кількість залишкової шихти, використання двокомпонентних композитів не дозволяє ефективно покращувати процес утворення гранул.

Спікання агломератів, підготовлених з використанням трикомпонентних композитів підтвердило, що додавання вапняку та вапна до концентрату та руди покращує процес їхнього зволоження, і ця активна взаємодія компонентів з водою дозволяє рівномірно розподіляти флюс в утворених гранулах.

Найкращу якість агломерату отримали під час спікання шихти, підготовленої з використанням чотирикомпонентного композиту з «концентрату – руди – вапна – вапняку». У той же час результати дослідження підтвердили необхідність коригування цієї технології.

Для покращення ефективності грудкування, прийнято рішення розділити руду на фракції: 0-3 мм, яка подаватиметься до складу композиту, та 3-10 мм, яка буде використовуватися у залишковій шихті.

Найкраща якість агломерату досягається при спіканні шихти, підготовленої з використанням композиту з «КРВоВк», кількість вапняку у якому забезпечує його основність на рівні 0,9-1,0 од., та залишкової шихти основністю на рівні 1,6-1,8 од. (табл. 4). Таким чином створюються найбільш сприятливі умови для формування міцної зв'язки з залізо-кальцієвих олівінів та феритів кальцію (рис. 2). Спікання агломерату, шихта якого підготовлена запропонованим способом у порівнянні з сумісною підготовкою (табл. 3), характеризується збільшенням виходу придатного агломерату на 10,25%, збільшенням виходу фракції +5 мм на 11,5% після випробування на міцність та зменшення вмісту фракції 0-5 мм на 11,5%.

Мінералогічний аналіз агломератів, представлений на рис. 4, підтвердив ефективність запропонованих заходів по підготовці шихти до спікання.

З рисунка 4А видно, що агломерат, отриманий за традиційною технологією підготовки та спікання шихти, характеризується значною неоднорідністю мінералогічного складу та високим вмістом силікатних озер. Агломерат, спечений з шихти, підготовленої з використанням композиту з «КРВоВк» основністю 0,9-1,0 од. та залишкової шихти основністю 1,6-1,8 од. (рис. 4Б), має більш однорідний мінералогічний склад з високим вмістом олівінів та феритів кальцію, які забезпечують йому високу міцність. Порівняння якості підготовки агломерату за класичною та запропонованою схемою (табл. 5-6) показали, що агломерат, підготовлений до спікання за запропонованою технологією та оброблений в пристрої барабанного типу зі змінною кількістю

та шириною полиць, характеризується: рівномірністю гранулометричного складу (рис.5), збільшенням коефіцієнту форми кусків та загального вмісту заліза, реалізацією внутрішніх напружень, що дозволить запобігти подрібненню агломерату під час транспортування, зберігання та завантаження в доменну піч.

Механічна обробка в пристрої барабанного типу призводить до збільшення вмісту дріб'язку у порівнянні з агломератом, не обробленим в барабані, на 7.1%. Проте це компенсується збільшенням виходу придатного агломерату на 10,25% при спіканні агломерату, підготовленого за запропованою схемою.

Після грохочення агломератів, отриманих за класичною та запропованою схемами, вміст дріб'язку в них складав 10% та 4% відповідно.

Дослідження міцності отриманих агломератів шляхом скидання з копра показало, що підготовлений за класичною технологією матеріал має показник у 90,3%, а підготовлений за запропованою технологією – 95,7%. Отримані навантаження в запропонованому барабані-стабілізаторі дозволяють виділити міцну складову спеченого продукту та уникнути подрібнення агломерату до потрапляння в доменну піч, на відміну від звичайного агломерату, та знизити величину його руйнування у самій печі.

Рівномірність гранулометричного складу агломерату та зменшення кількості дріб'язку позитивно впливає на порозність і газопроникність шару шихти, що покращує умови роботи доменної печі.

Використання запропонованої схеми отримання стабілізованого за крупністю та міцністю агломерату призведе до зниження питомої витрати ко-

ксу на 4%, та збільшення продуктивності доменної печі на 8%.

Висновки.

Доведено, 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.

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.

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.

Використання запропонованої схеми отримання стабілізованого за крупністю та міцністю агломерату, яка включає спікання роздільно підготовленої шихти з використанням композиту заданого складу та крупності та механічну обробку спеченого матеріалу у пристрої барабанного типу, що має три характерні зони з різним механізмом руйнування, призводить до зменшення вмісту дріб'язку в агломераті з 10 до 4%, та до покращення міцності матеріалу, що відобразиться на зниженні питомої витрати коксу на 4%, та збільшенні продуктивності доменної печі на 8%.

Бібліографічний опис

1. Лялюк В.П., Тараканов А.К., Журавлев Ф.М., Кассим Д.А., Чупринов Е.В., Главное направление инновационного совершенствования доменной технологии – использование одного вида железорудного сырья, сочетающего лучшие свойства агломерата и окатышей. *Сталь*. 2018. №1. С.6-11.
2. Лялюк В.П., Шеремет В.А., Тараканов А.К., та ін.. Опыт использования высококачественного окускованного железорудного сырья в доменной плавке. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2010. №6. С.6-9.
3. Малышева Т.Я., Павлов Р.М. Влияние минералогического состава связей на прочностные свойства агломератов различной основности. *Известия Высших Учебных Заведений. Черная Metallургия*. 2012. 55(11). С. 6-10.
4. Хопунов Э.А. Селективное разрушение минерального и техногенного сырья. Екатеринбург: УИПЦ, 2013. 429 с.
5. Лившиц Б.А., Васильев Г.С. Исследование механических свойств основных компонентов железорудных агломератов. *Известия Высших Учебных Заведений. Черная металлургия*. 1964. №6. С.23-25.
6. Lu, L., Ishiyama O. (2015). Iron ore sintering. *Iron Ore*, 395–433. doi:10.1016/b978-1-78242-156-6.00014-9
7. L. Lu. Important iron ore characteristics and their impacts on sinter quality – a review. *Minerals & Metallurgical process*. 2015. 32. 88-96.
8. O. Komatsu, H. Noda, H. Fukuyo, N. Sakamoto, Evaluation of granulation characteristics and properties of quasi-particles using a large amount of iron ore fines. *CAMP-ISIJ* 5. 1992. 1042–1045.
9. Романенко В.П., Попов Г.Н., Технология двухстадийного окомкования агломерационной шихты. Республиканская научно-техническая конференция «Теоретические основы и технология подготовки металлургического сырья к доменной плавке». Днепропетровск. 1980. С. 13-15.
10. Коршиков Г.В., Шаров С.И. и др. Влияние способа подачи топлива, его вида и крупности на показатели процесса спекания концентрата КМА. *Известия ВУЗов. Черная металлургия*. 1971. № 6. С. 39-42.
11. Вылупко Е.Е., Игнатов Н.В., Губа О.В., Усенко В.А., Белова А.П. Получение окускованного железорудного материала блочно-ячеестого строения. *Сучасні проблеми металургії*. № 14. 2011. С. 50-57.

12. Худяков А.Ю., Бойко М.Н., Баюл К.В., Ващенко С.В., Полякова Н.В., Петренко В.И. Альтернативные способы грануляции тонкоизмельченных железорудных концентратов. Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2018. 1(1). С. 48-53.
13. Кривенко С.В., Божков Г.Г. Рациональное распределение флюса по высоте агломерируемого слоя. Металл и литье Украины. 2015. № 6. С. 23-25.
14. Сулименко С.Е. Перспективные направления создания экологически чистой технологии получения агломерата повышенного качества в современных условиях. Системные технологии. Региональный Межвузовский сборник научных трудов. Днепропетровск. 2014. Выпуск 4 (93). С. 32-38.
15. Ефименко Г.Г., Гиммельфарб А.А., Левченко В. Е. Металлургия чугуна : учебник для вузов - К.: Вища школа. 1981. 496 с.
16. Кольга А.Д., Айбашев Д.М. Возможности снижения нагрузок в щековых дробилках // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. Магнитогорск. 2013. № 4. С. 77-80.
17. Стабілізатор гранулометричного складу гарячого агломерату: пат. 26446 Україна: МПК С22В 1/26. , 2007 р. №200704033; заявл. 12.04.07; опубл. 25.09.07, Бюл. № 15. 4 с.
18. Стабілізатор гранулометричного складу гарячого агломерату: пат. 72711 Україна: МПК С22В 1/26. , 2012 р. №201201962; заявл. 21.02.12; опубл. 27.08.12, Бюл. № 16. 5 с.
19. Бочка В.В., Сова А.В., Двоглазова А.В. Исследование особенностей процесса разрушения агломерата в устройстве барабанного типа. Металл и Литье Украины. 2018. №11-12. С. 1-8.

References

1. Lialiuik V.P., Tarakanov A.K., Zhuravlev F.M., Kassym D.A., Chuprynov E.V., Hlavnoe napravleniye ynnovats - onnoho sovershenstvovaniya domennoi tekhnolohyy – yspolzovaniye odnogo vyda zhelezorudnogo syria, sochetaiushcheho luchshye svoystva ahlomerata y okatyshei. Stal. 2018. №1. S.6-11.
2. Lialiuik V.P., Sheremet V.A., Tarakanov A.K., ta in.. Opyt yspolzovaniya vysokokachestvennogo okuskovannogo zhelezorudnogo syria v domennoi plavke. Metallurhicheskaiya y hornorudnaiya promyshlennost. 2010. №6. S.6-9.
3. Malysheva T.Ia., Pavlov R.M. Vliyaniye myneralohyicheskogo sostava svyazok na prochnostnye svoystva ahlomeratov razlychnoi osnovnosti. Yzvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenyi. Chernaiya Metallurhiya. 2012. 55(11). С. 6-10.
4. Khopunov E.A. Selektivnoye razrusheniye myneralnogo y tekhnolohennogo syria. Ekaterynburh: UYPTs, 2013. 429 s.
5. Lyvshyts B.A., Vasylev H.S. Yssledovaniye mekhanicheskykh svoystv osnovnykh komponentov zhelezorudnykh ahlomeratov. Yzvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenyi. Chernaiya metallurhiya. 1964. №6. S.23-25.
6. Lu, L., Ishiyama O. (2015). Iron ore sintering. Iron Ore, 395–433. doi:10.1016/b978-1-78242-156-6.00014-9
7. L. Lu. Important iron ore characteristics and their impacts on sinter quality – a review. Minerals & Metallurgical process. 2015. 32. 88-96.
8. O. Komatsu, H. Noda, H. Fukuyo, N. Sakamoto, Evaluation of granulation characteristics and properties of quasi-particles using a large amount of iron ore fines. CAMP-ISIJ 5. 1992. S. 1042–1045.
9. Romanenko V.P., Popov H.N., Tekhnolohiya dvukhstadiynoho okomkovaniya ahlomeratsyonnoi shykhty. Respublykanskaia nauchno-tekhnicheskaiya konferentsiya «Teoretycheskiye osnovy y tekhnolohiya podgotovky metallurhicheskogo syria k domennoi plavke». Dnepropetrovsk. 1980. S. 13-15.
10. Korshykov H.V., Sharov S.Y. y dr. Vliyaniye sposoba podachy topliva, eho vyda y krupnosta na pokazately protsessa spekaniya kontsentrata KMA. Yzvestiya VUZov. Chernaiya metallurhiya. 1971. № 6. S. 39-42.
11. Vylupko E.E., Yhnatov N.V., Huba O.V., Usenko V.A., Belova A.P. Poluchenye okuskovannogo zhelezorudnogo materiyala blochno-yacheestoho stroeniya. Suchasni problemy metalurhii. № 14. 2011. S. 50-57.
12. Khudiakov A.Iu., Boiko M.N., Baiul K.V., Vashchenko S.V., Poliakova N.V., Petrenko V.Y. Alternatyvnye sposoby hranuliyatsyy tonkoymelchennykh zhelezorudnykh kontsentratov. Chernaiya metallurhiya. Biulleten nauchno-tekhnicheskoi y ekonomicheskoi ynformatsyy. 2018. 1(1). S. 48-53.
13. Kryvenko S.V., Bozhkov H.H. Ratsyonalnoye raspredeleniye fliusa po vysote ahlomeryruemogo sloia. Metall y lyte Ukrayny. 2015. № 6. S. 23-25.
14. Sulymenko S.E. Perspektyvnye napravleniya sozdaniya ekolohyicheskyy chystoi tekhnolohyy polucheniya ahlomerata povyshennogo kachestva v sovremennykh usloviyakh. Systemnye tekhnolohyy. Rehyonalnyi Mezhvuzovskiy sbornik nauchnykh trudov. Dnepropetrovsk. 2014. Vypusk 4 (93). S. 32-38.
15. Efymenko H.H., Hymmel'farb A.A., Levchenko V. E. Metallurhiya chuhuna : uchebnyk dlia vuzov - K.: Vyshcha shkola. 1981. 496 s.
16. Kolha A.D., Aibashev D.M. Vozmozhnosti snyzheniya nahruzok v shchekovykh drobylkakh // Vestnyk MHTU ym. H.Y. Nosova. Mahnytohorsk. 2013. № 4. S. 77-80.
17. Stabilizator hranulometrychnoho skladu hariachoho ahlomeratu: pat. 26446 Ukraina: MPK S22V 1/26. , 2007 r. №200704033; zaiavl. 12.04.07; opubl. 25.09.07, Biul. № 15. 4 s.
18. Stabilizator hranulometrychnoho skladu hariachoho ahlomeratu: pat. 72711 Ukraina: MPK S22V 1/26. , 2012 r. №201201962; zaiavl. 21.02.12; opubl. 27.08.12, Biul. № 16. 5 s.
19. Bochka V.V., Sovva A.V., Dvoeglazova A.V. Issledovaniye osobennostey protsessa razrusheniya aglomerata v ustroystve barabannogo tipa. Metall i Lite Ukrainyi. 2018. №11-12. S. 1-8.

Стаття поступила 14.01.2019