

А.П. Мішалкін, канд. техн. наук, доц., e-mail: meshalkin@ukr.net

Д.В. Маловік, аспірант, e-mail: dmitriyvm2008@gmail.com,

<https://orcid.org/0009-0000-4223-7004>

В.Г. Чистяков, канд. техн. наук, доц., проф. кафедри, e-mail: chist.chvg60@gmail.com,

<https://orcid.org/0000-0003-4233-3797>

В.О. Петренко, д-р техн. наук, проф., зав. кафедри, e-mail: petrenko_v@email.ua,

<https://orcid.org/0000-0001-5017-1674>

Український державний університет науки і технологій (Дніпро, Україна)

Аналіз впливу стабілізації вихідних властивостей агломерату на фізико-хімічні процеси в характерних зонах доменної печі

У статті досліджено стабілізацію фізико-хімічних властивостей залізорудного агломерату та окатишів, як основних компонентів доменної шихти на фізико-хімічні процеси в характерних зонах доменної печі, що є актуальною проблемою для подальшого удосконалення технології виплавки чавуну. Отримання якісного агломерату є комплексною задачею, а її вирішення базується на стабілізації його вихідних властивостей. Обґрунтовано, що до найбільш ефективних за впливом на результати процесу доцільно віднести підвищення механічної міцності, термічної, фізико-хімічної та гранулометричної стабільності агломерату, які впливають на умови та поведінку компонентів в характерних зонах при відповідних умовах доменної печі.

Досліджено стабілізацію фізико-хімічних характеристик агломерату як одного з важливих факторів забезпечення найбільш раціонального використання його фізико-хімічного потенціалу при проходженні через високо-температурні зони доменної печі. Визначено ключові реологічні властивості гранулярних потоків доменної шихти, що є важливим в плані обґрунтування ефективних способів завантаження та технічних рішень щодо розподілу шихтових компонентів в доменній печі. Досліджено вплив фракційного складу шихти та співвідношення основних її компонентів на газодинамічні умови, особливо, в сухій зоні, найбільш протяжної зони фізико-хімічних перетворень доменної печі, що є одним із ключових факторів, що визначають ефективність доменного процесу.

У дослідженні застосовано теоретико-аналітичні методи з акцентом на фізико-хімічну складову, які охоплюють аналіз, узагальнення та інтерпретацію отриманих результатів у контексті відповідності теоретичних концепцій та положень практичним результатам.

Отримано узгоджені уявлення про особливості поведінки компонентів шихти в доменній печі. Порівняння таких даних, отриманих різними дослідниками, в подальшому, може бути використане для ідентифікації відповідних параметрів. Останні як показники, що визначають умови раціонального використання ефектів, джерелом яких є взаємодія корисних властивостей фізико-хімічного потенціалу вихідної шихти та факторів зовнішньої дії, дозволять визначити надійні інтерпретації явищ, прогнозувати результати та показники доменного процесу. Також, стануть основою для наукового обґрунтування підходів до вибору ефективних способів стабілізації властивостей агломерату з встановленням надійних зв'язків між способами завантаження, розподілу компонентів вихідної шихти та газодинамічними умовами в печі.

Обґрунтовано, що для забезпечення стабільності ходу доменного процесу необхідно забезпечити постійність гранулометричного, хімічного складу, мінералогії вихідних залізорудних матеріалів (агломерату та окатишів), коксу, а також високу якість і однорідність агломерату. Систематичний контроль і поточне регулювання цих параметрів є основою для подальшої оптимізації доменного процесу, раціонального за питомими витратами ресурсів сировини та енергії та ефективного за результатами реалізації властивостей його вихідного фізико-хімічного потенціалу.

Доведено, що стабілізований, зокрема, за крупністю, пористістю, міцністю, хімічним складом, агломерат сприяє підвищенню продуктивності печі, зниженню витрат палива та поліпшенню якості чавуну шляхом оптимізації фізико-хімічних процесів у доменній печі за рахунок стабільності ходу газів, що є носіями енергії, зниження флуктуацій температури в характерних зонах печі, поліпшення умов відновлення оксидів заліза, зменшення пилоутворення та втрат заліза, економію коксу. Узагальнення результатів досліджень дозволить уточнити фізико-хімічні особливості взаємодії компонентів гранулярних потоків в мінливих умовах доменної печі.

Ключові слова: доменна піч, агломерат, гранулометрія, мінералогія, стабілізація, газопроникність, енергетичні ресурси, завантаження шихти.

Вступ. Процес виробництва сталі базується на проведенні комплексу технологічних операцій, випереджаючих виплавку та позапічну обробку сталі. Їх результати впливають на особливості, алгоритми, результати та ефективність сучасних сталеплавильних процесів. Чавун переробний є основним компонентом металозавалки та джерелом багатьох ефектів, які визначають фізико-хімічну сутність, умови та спрямованість відповідних процесів, які мають синергетичний характер взаємозв'язків.

Ефективність його використання значною мірою визначаються ще на етапах підготовки/виробництва залізорудних матеріалів як основи доменної шихти. Конкретно — їх співвідношенням, хімічним, гранулометричним та мінералогічним складом, що формують властивості вихідного внутрішнього фізико-хімічного потенціалу мінеральної сировини.

Зміна вихідного гранулометричного складу компонентів доменної шихти суттєво впливає на організацію системи завантаження та розподілу шихти на колошнику доменної печі як первинної ланки фізико-хімічних перетворень в стовпі шихти. Розміри частинок шихти визначають її сипучість, опір газопроникності та стабільність профілю засипки. Реакція системи завантаження й колошникового обладнання на нестабільність гранулометрії та компонентного складу може проявлятися в зміні геометрії шихтових валів, розподілі матеріалів за радіусом, які відповідають за стабільність газодинамічних умов у печі.

Удосконалення системи завантаження повинно ґрунтуватися на дослідженні фізико-хімічних особливостей доменного процесу в характерних зонах шихти, особливо, при зміні його технологічних параметрів, питомих витрат сировини та палива, вихідної гранулометрії її основних компонентів. Оптимізація фракційного складу компонентів доменної шихти, стабілізація їх фізико-хімічних характеристик, зокрема агломерату, є ключовими факторами забезпечення ефективності доменного процесу. Попередній аналіз взаємозв'язків результатів агломерації залізних руд з можливостями доменного процесу, а також результатів доменного процесу з технологічними особливостями виплавки сталі, дозволяє стверджувати, що на визначених виробничих етапах вони стають джерелами позитивних ефектів, що мають фізико-хімічну спрямованість.

Стабілізація доменного агломерату як процес підвищення механічної міцності, термічної та хімічної стабільності агломерату, оптимізації його фракційного складу, повинна забезпечити збереження цілісності агломерату при транспортуванні, завантаженні, нагріванні в сухій зоні печі та необхідні фізико-хімічні властивості агломерату при подальшому його проходженні через високотемпературні зони доменної печі. Важливими завданнями його виробництва залишаються підвищення його якості, знижен-

ня витрат енергоресурсів та екологічно шкідливих викидів.

Актуальність. Актуальні проблеми розвитку доменного виробництва значною мірою пов'язані з ефективністю використання сировинних ресурсів, його енергоємністю та екологічними викликами. Одним із ключових факторів, що впливають на ці аспекти, є гранулометричний склад залізорудних компонентів і коксу. Відхилення від раціонального розміру частинок шихтових матеріалів негативно впливає на газопроникність колошника, пилоутворення, стійкість фурменої зони та загальну стабільність фізико-хімічних перетворень при трансформації вихідних властивостей доменної шихти під дією зовнішніх факторів.

Мета дослідження. Стабілізація фізико-хімічних характеристик агломерату як одного з важливих факторів забезпечення найбільш раціонального використання його фізико-хімічного потенціалу при проходженні через високотемпературні зони доменної печі. Визначення ключових реологічних властивостей гранулярних потоків доменної шихти є важливим в плані обґрунтування ефективних способів завантаження та технічних рішень щодо розподілу шихтових компонентів в доменній печі. Вплив фракційного складу шихти та співвідношення основних її компонентів на газодинамічні умови, особливо, в сухій зоні, найбільш протяжної зони фізико-хімічних перетворень доменної печі, є одним із ключових факторів, що визначають ефективність доменного процесу.

Методи дослідження. У дослідженні застосовано теоретико-аналітичні методи з акцентом на фізико-хімічну складову, які охоплюють аналіз, узагальнення та інтерпретацію отриманих результатів у контексті відповідності теоретичних концепцій та положень практичним результатам.

Важливим завданням роботи є отримання узагальнених уявлень про особливості поведінки компонентів шихти в доменній печі. Порівняння таких даних, отриманих різними дослідниками, в подальшому, може бути використане для ідентифікації відповідних параметрів. Останні як показники, що визначають умови раціонального використання ефектів, джерелом яких є взаємодія корисних властивостей фізико-хімічного потенціалу вихідної шихти та факторів зовнішньої дії, дозволять визначити надійні інтерпретації явищ, прогнозувати результати та показники доменного процесу. Також, стануть основою для наукового обґрунтування підходів до вибору ефективних способів стабілізації властивостей агломерату з встановленням надійних зв'язків між способами завантаження, розподілу компонентів вихідної шихти та газодинамічними умовами в печі.

Аналіз фізико-хімічних особливостей стабілізації властивостей агломерату. В сухій зоні, яка представляється як більша частина шахти доменної печі, де газу, що піднімаються, не

зіткнулися ще з частково розплавленими продуктами плавки, переважають газодинамічні процеси. В цих умовах газодинамічний стан стовпа доменної шихти визначається особливостями руху висхідного гарячого газового потоку та зустрічного — твердих компонентів вихідної шихти. Основним з них є доменний агломерат. Їх взаємодія визначає кінетику хімічних реакцій між відновниками (C, H₂, CO) та окислювачами (кисень дуття та оксидів, в основному, Fe, Mn, Si). Можливість виникнення, напрямки руху, умови розвитку та очікувані рівні завершеності яких прогноуються за результатами розрахунку термодинамічних параметрів, а кінцеві результати визначаються параметрами реальної кінетики [1]. В реальних умовах доменної печі важливим параметром, що впливає на кінетику фізико-хімічних перетворень, визначають вихідні властивості агломерату. Їх стабілізація є умовою досягнення раціональних рівнів використання складових потенціалу вихідних властивостей доменного агломерату.

До основних способів стабілізації гранулометрії агломерату як засобу підвищення його металургійних показників доцільно, згідно з даними [2], віднести наступні:

— контроль параметрів змішування шихти перед спіканням — забезпечує однорідність розподілу вологи, флюсів і пилу; оптимізацію процесу грануляції шихти з використанням барабанів-грануляторів;

— оптимізація режимів агломерації шляхом контролю швидкості просмокування повітря через шар агломераційної шихти; регулювання температури горіння та товщини шару аглошихти; використання раціональних за впливом зв'язуючих матеріалів, що не знижують металургійну цінність агломерату;

— використання стабілізуючих добавок — більш повно буде розглянуто нижче за текстом.

До інших, найбільш поширених в практиці агломерації залізородних матеріалів, способів стабілізації доменного агломерату, доцільно віднести наступні, визначивши їх фізико-хімічну сутність, переваги, недоліки та особливості реалізації.

На міцність агломерату суттєво впливає мінералогічний склад спеку. Сутність мінералогічної стабілізації полягає в формуванні компактної стабільної за властивостями фази, яка виконує роль зв'язки: фаяліт, акерманіт, муліт, силікати кальцію, магнію та ін. За результатами [3] оптимізація співвідношення FeO/SiO₂ сприяє утворенню щільної феритосилікатної матриці, яка зміцнює структуру агломерату.

В дослідженні [4], результати якого опубліковано в журналі ISIJ International, з'ясовано, як структура мінеральної фази змінюється в процесі нагрівання й охолодження, та як швидкість охолодження спеку впливає на склад і структуру мінералів. Встановлено, також, що особливо негативний вплив на міцність агломерату мають включення вапняку та вапна. Взаємодія вапна з вологою сприяє руйнації цілісності кусків агломерату. Негативно впливає на міцність також і присутність в його структурі скла, особливо у вигляді двокальцієвого силікату

(~ при 675 °C відбувається поліморфне перетворення $\nu\text{-Ca}_2\text{SiO}_4 \rightarrow \chi\text{-Ca}_2\text{SiO}_4$).

Технологічна стабілізація здійснюється за рахунок регулювання температури горіння вуглецю коксу та швидкості охолодження; введення зв'язуючих добавок (наприклад, бентоніту, вапна чи доломіту) для покращення фізичних характеристик та металургійних властивостей агломерату; застосування зворотного матеріалу (відсіву агломерату) для підвищення міцності за рахунок гомогенізації шихти [5] та ін. заходів.

Температурний режим агломераційного процесу є ключовим фактором, що визначає якість агломерату, енергоефективність виробництва та стабільність хімічного складу кінцевої продукції [6]. Тепловий режим спікання здійснюється в температурному інтервалі 1100±1300 °C шляхом горіння палива в шарі шихти, за якого відбувається утворення рідкої оксидної фази, кількості якої достатньо для міцного зв'язування спечених часток агломерату. Таким чином, вона виконує роль високотемпературного зв'язуючого, яке переважно представляється кальцієвими та феритними силікатами.

В умовах доменної плавки застосування вапняку, кількість якого забезпечить $\text{CaO/SiO}_2 \approx 1,2$, сприяє утворенню найбільш стабільних фаз кальцієво-феритного типу, що забезпечує значний рівень використання спектру властивостей шлакової фази. За температур 1250—1400 °C відбувається інтенсивне спікання з формуванням рідкої оксидної фази. Її кількість в процесі охолодження забезпечує високу міцність агломерату [7].

Значне перевищення кількості рідкої високотемпературної фази, причиною чого може бути занадто збільшена витрата палива, не забезпечує в умовах доменного процесу досягнення необхідної швидкості відновлення заліза, що містить агломерат у вигляді оксидів. Рідка оксидна фаза представляє феросилікатну систему (FeO·SiO₂, CaFeSiO₄, 2CaO·SiO₂·Fe₂O₃), а її вихідними компонентами є FeO, SiO₂, CaO, Al₂O₃ [8]. Мікроструктурний аналіз, що використано в цьому дослідженні, показав, що стабільність агломерату залежить від кількості й рівномірності розподілу ферито-силікатних фаз у матриці.

Наступний спосіб визначається як гранулометрична стабілізація агломерату. Включає поточний контроль розміру часток шихти в інтервалі 0,2±10 мм, що дозволяє досягти рівномірного прогрівання, структурної цілісності агломерату та забезпечує найбільш оптимальний для відповідних умов реалізації процесу гранулометричний склад, який є важливою умовою формування міцної структури доменного агломерату [9].

Мінералогічний склад агломерату, умови формування якого досліджені в [9], визначається вихідними фізико-хімічними властивостями компонентів аглошихти, співвідношенням основних компонентів (залізородних матеріалів, флюсів палива), їх гранулометричним складом та факторами зовнішнього впливу на умови спікання шихти. Формується з стабільних

фаз: кальцієво-феритних, залізо-кальцієво-силікатних та шпінелей. Основними мінеральними фазами, що формуються в процесі агломерації, визначено магнетит (Fe_3O_4) — забезпечує міцність агломерату; гематит (Fe_2O_3) — є основою складовою фазою, що містить залізо; ферити кальцію ($CaFe_2O_4$) — утворюються при введенні в аглошихту вапняку.

Ці мінерали формуються в результаті високотемпературного спікання шихти, до складу якої входять залізорудні концентрати, флюси та паливо, впливаючи на мінералогічний склад агломерату. Останній визначає його фізико-хімічні властивості, такі як міцність, пористість та відновлюваність, що є важливими параметрами при подальшому використанні їх потенціалу в доменному виробництві [10]. Таким чином, під час спікання компонентів вихідної аглошихти, ключову роль у формуванні рідкої оксидної фази, її кількості та складу, яка, застигаючи при охолодженні, зв'язує тверді частинки в монолітний агломерат, відіграють окислювально-відновлювальні реакції. Ступені їх завершеності визначаються умовами спікання: кількістю палива, часом і його температурними можливостями.

Хімічна модифікація агломерату є процесом спрямованого впливу на його мінералогічний і хімічний склад шляхом введення спеціальних добавок — модифікаторів. Останні змінюють фазовий склад, фізико-хімічні властивості і, в подальшому, визначають поведінку агломерату при реалізації доменного

процесу. Визначено роль окремих компонентів — модифікаторів (MgO ; TiO_2 ; Al_2O_3 ; Na_2O ; K_2O та ін).

Так, в дослідженні [11] показано, що ці компоненти, впливаючи на фазовий склад агломерату, змінюють його термохімічні, фізичні й механічні властивості, включаючи температуру плавлення, пористість, реакційну здатність.

Але певний надлишок в агломераті скловидної фази, утворенню якої сприяє застосування модифікаторів, знижує стабільність характеристик агломерату [7]. Лужні оксиди (Na_2O , K_2O) є шкідливими домішками у складі доменного агломерату. Накопичуються в шлаку, газовому просторі, утворюють на стінках печі ці відкладення [12], викликають розривлення агломерату та знижують його міцність. За рахунок створення лужних сульфатів та карбонатів при суттєвих температурних коливаннях здійснюється руйнування вихідної структури агломерату.

Необхідно відмітити, що при достатньо високому рівні результатів дослідження способів стабілізації властивостей агломерату, неузгодженими залишаються питання про вплив на них введення в склад аглошихти матеріалів техногенного походження. Не визначено і вплив модифікаторів як джерела формування шлаку, частина якого разом з чавуном потрапляє в сталеплавильний агрегат з основним футеруванням, на рафінування металевого розплаву в окислювальних умовах. Тому, потребують уточнення й інтервали вмісту модифікаторів, що вводяться

Таблиця 1

Основні металургійні ефекти хімічної модифікації залізорудного агломерату

| № | Параметр/властивість | Ефекти/наслідки |
|----|--|---|
| 1. | Фазовий склад | Зміна співвідношення гематиту, магнетиту, феритів, силікатів. Можливе утворення нових складних фаз (ферити Mg, Ti, Al). |
| 2. | Механічна міцність | Зростання при правильному підборі модифікаторів, особливо, TiO_2 , MgO . |
| 3. | Реакційна спроможність до взаємодії з CO | Підвищення або зниження залежно від складу: MgO і TiO_2 знижують, а $\Sigma(Na_2OK_2O)$ — підвищують. |
| 4. | Температура плавлення | MgO та Al_2O_3 можуть підвищувати, а надлишок Al_2O_3 і оксидів лужних металів — знижують. |
| 5. | Режим шлакоутворення | Змінюють склад шлаку, впливають на його текучість, в'язкість, агресивність до вогнетривів футерування. |

для хімічної стабілізації властивостей агломерату. Надмірний їх вміст у вихідній аглошихті може ускладнювати роботу доменної печі через збільшення в'язкості шлаку, негативні наслідки для стійкості вогнетривів футерування домни, екології та ін.

Узагальнені та узгоджені за сутністю та впливом результати хімічної модифікації залізорудного агломерату наведено в табл. 1.

Необхідно визначити, що хімічна модифікація агломерату за допомогою оксидів MgO , TiO_2 , Al_2O_3 та лужних елементів може бути ефективним інструментом керування вихідними металургійними властивостями агломерату. Вона дозволяє їх поліпшити, але вимагає ретельного контролю дозування — перенасичення ними шихти може призвести до погіршення ходу доменної печі, зниження ефективності процесу на етапах виплавки чавуну та сталі.

Теплова обробка як спосіб стабілізації, здійснюється шляхом контрольованого охолодження гарячого агломерату, що сприяє формуванню щільних і рівномірно розосереджених кристалічних фаз [13].

Аналіз недоліків та переваг відомих способів впливу на якість агломерату дозволив авторам визначити, що найбільш дієвим напрямом удосконалення способу його виробництва, є обґрунтування раціонального вмісту палива у вихідній аглошихті. Особливо важливим вирішення даного питання стає через пошук заміників традиційного палива — коксу, а саме різних видів біопалива, піролізного вуглецю, що містять відходи рослинного походження та ін. [14]. Показано, що підвищення його частки збільшує міцність агломерату, але сприяє зниженню продуктивності установки через зменшення швидкості спікання компонентів

вихідної шихти.

В роботі [2] автор уточнив механізм формування характерних зон спікання залізородної аглошихти та визначив їх фізико-хімічні та теплові особливості. Представлені результати дослідно-промислових спікань аглошихт при зміні основних параметрів процесу, які впливають на горіння палива, свідчать, що кращі результати за продуктивністю процесу та якістю агломерату отримано при здійсненні попереднього підігріву шихти та збагаченні повітря киснем. Застосування вказаних технологічних прийомів, за думкою автора, забезпечать підвищення рівня енергоефективності спікання вихідної шихти. Таким чином, організація управління якістю агломерату через контроль показників вихідної шихти значною

мірою залежить від хімічного, компонентного та фракційного складу залізородних матеріалів — основних компонентів вихідної аглошихти. Ці фактори, в подальшому ланцюгу трансформування властивостей вихідного потенціалу аглошихти, визначають фізико-хімічні особливості спікання вихідних компонентів в агломераційному процесі, а нові, набуті при спіканні шихти властивості агломерату, використовуються в доменному процесі.

Нижче, в табл. 2 наведено очікувані ефекти стабілізації властивостей агломерату, що отримані шляхом узагальнення результатів [1, 3, 13, 15].

Застосування точних методів визначення хімічного складу залізородної шихти (наприклад, рентгенофлуоресцентного аналізу), дозволяє забезпечити

Таблиця 2

Узагальнені результати стабілізації металургійних властивостей доменного агломерату

| № | Показник | Без стабілізації | Після стабілізації |
|----|---|---------------------|-----------------------|
| 1. | Міцність на стиск, Н/гранула | 150—200 | 250—300 |
| 2. | Термостійкість | Низька | Висока |
| 3. | Ступінь пиловиділення при транспортуванні | Високий | Низький |
| 4. | Газопроникність шихти в доменній печі | Нестабільна | Рівномірна, покращена |
| 5. | Втрати Fe при агломерації, % | 5—10 | 2—3 |
| 6. | Структурна цілісність у гарячій зоні печі | Часткове руйнування | Збереження форми |

стабільність основності агломерату та його фізичних показників, що, в свою чергу, позитивно впливає на продуктивність доменного процесу та зменшує втрати коксу [16].

Автори досліджень, що проаналізовано в роботі, важливим параметром, що суттєво впливає на газодинаміку печі, вважають гранулометрію шихтових матеріалів доменної плавки. Цей параметр визначає розподіл частинок шихтових матеріалів (агломерату, руди, окатишів, флюсів, коксу) за розмірами. Її вплив на газодинамічні умови, особливо, в сухій зоні доменної печі, на що вони звертають увагу, є одним із ключових факторів, що визначають ефективність та показники процесу. У доменній печі, за даними досліджень, що проаналізовано, бажаними вважають міцні, термостійкі гранули розміром 10—40 мм для рудної частини шихти та 25—80 мм для коксу. Встановлено, що рівномірний розподіл температури в шихтових матеріалах по перерізу шахти, що сприяє стабільному протіканню хімічних реакцій та зменшенню утворення шкідливих домішок, значною мірою досягається також шляхом оптимізації гранулометричного складу [17]. Автором, також, визначе-

но сучасні підходи до реконструкції доменних печей, які ґрунтуються з урахуванням гранулометричного складу шихти.

Згідно з даними, що наведено в [18], визначено основні наслідки впливу гранулометрії на газодинаміку та тепловий стан: зміна опору газопроникненню; газорозподілу та стабільності фізичних характеристик шихти. Опір газопроникненню через шар шихти, як один з основних параметрів доменного процесу, значною мірою визначається співвідношенням крупних частинок, дрібних та пилу — гранулометрією шихти. Аналіз динаміки зсуву гранульованих матеріалів [19] дозволяє, за висновками авторів, моделювати поведінку шихти в умовах, наближених до реальних умов доменної печі.

Аналіз попередніх досліджень, в яких визначався вплив гранулометрії на параметри доменного процесу, співставлення та узагальнення їх результатів, дозволив встановити вірогідний її вплив на газодинаміку вихідної шихти (табл. 3).

Таким чином, якщо у складі вихідної шихти переважають крупні частинки, вони утворюють порожнини між гранулами. Це сприяє зменшенню гідравлічного

Таблиця 3

Вплив гранулометричного складу доменної шихти на газодинамічні параметри доменного процесу

| Вплив гранулометричного складу на газодинамічні параметри | | |
|---|---|--|
| № | Параметр гранулометрії шихти | Вплив на стан газодинаміки в шарі компонентів доменної шихти |
| 1. | Зменшення середнього розміру | Зниження газопроникності, підвищення опору |
| 2. | Надмірне збільшення вмісту дрібних фракцій | Ущільнення шихти, підвищення опору, нерівномірний розподіл газів |
| 3. | Розмір частинок компонентів, близький до оптимального | Стабільний газовий потік, рівномірна температура та розподіл газів |

опору та полегшує рух газів через шар шихти. Якщо — переважають дрібні частинки — забивається простір між гранулами, що збільшує опір і може призвести до порушення рівномірності руху газу, що спричинить рід негативних наслідків для ходу печі. Зниження газопроникності шихти ускладнює проходження газів, спричиняє нерівномірний розподіл температур і знижує ефективність тепломасообміну, що, відповідно, зменшує рівень використання фізичної теплоти (CO_2 , N_2) та хімічної (CO).

Результати дослідження. До найбільш важливих проблем розвитку доменного виробництва в сучасних сировинно-енергетичних умовах та на відповідному рівні науки про технологію доменного виробництва доцільно віднести наступні:

1. Погіршення газопроникності стовпа шихтових компонентів, викликане надмірною кількістю дрібних фракцій руди, агломерату або коксу, що супроводжується збільшенням перепаду тиску та надмірним зменшенням швидкості потоку газів.

2. Інтенсивне утворення пилу та виносу з ним заліза — дрібна фракція залізородної частини шихти та коксу сприяє пилоутворенню, що зменшує вихід придатного чавуну.

3. Нерівномірний хід доменного процесу — виникає через нераціональний розподіл газових потоків у шахті печі при відхиленні від раціональної гранулометрії компонентів як фактору, що впливає на алгоритм завантаження та їх розподілу на колошнику печі.

4. Підвищене навантаження на газоочисне обладнання — велика кількість пилу потребує удосконалення систем очищення та технології, яка є джерелом його виникнення і як наслідок — підвищення експлуатаційних витрат.

5. Зменшення терміну служби фурм і охолоджувальних елементів через нерівномірний тепловий режим і фокусування потоків гарячих газів — їх канально-периферійний хід.

На основі аналізу проблем розвитку доменного виробництва, можна визначити і вірогідні шляхи їх вирішення шляхом оптимізації крупності залізородних компонентів вихідної шихти та стабілізації їх фізико-хімічних характеристик.

Так, оптимізація гранулометричного складу залізородної частини, очевидно, може бути досягнута шляхом збільшення частки агломерату та окатишів розміром $10\div 25$ мм [20]. Реалізація такого технічного рішення дозволить забезпечити раціональний рівень

газопроникності шихти; оптимізувати пилоутворення та покращити рівномірність температурного режиму плавки. Останній впливає на режим шлакоутворення. Якщо ж використовується дрібнодисперсний залізородний концентрат, то перед агломерацією необхідно впроваджувати вдосконалену схему підготовки компонентів аглошихти, що сприяє стабілізації процесу спікання, покращує фізико-механічні властивості доменного агломерату.

Для отримання як найбільш оптимальної фракції палива, інтервал якої за даними досліджень, що проаналізовано в роботі, становить $40\div 60$ мм, ефективним вбачається контроль крупності коксу. Досягається такий інтервал крупності шляхом сортування коксу перед подачею у піч. Її сутність — дроблення з метою стабілізації його розміру на коксохімічних заводах та, вірогідно, зниження тиску в шарі шихтових матеріалів. Результатом стабілізації властивостей коксу стане покращення механічної стійкості коксу та зменшення втрат на стирання.

Впровадження автоматизованого контролю крупності залізородних компонентів та коксу з використанням онлайн-аналізаторів забезпечить оперативне регулювання підготовки шихти перед її завантаженням. Ще одним дієвим способом підвищення ефективності доменного процесу треба визнати обґрунтування оптимального шихтового навантаження на характерних горизонтах стовпа компонентів шихти. Досягається це за рахунок диференційованої їх подачі при визначенні раціональних співвідношень компонентів різної крупності [20]. Це дасть можливість сформувати зони з оптимальним газодинамічним режимом. В табл. 4 наведено очікувані результати стабілізації гранулометрії залізородних компонентів, які впливають на основні параметри процесу.

Щодо впливу крупності компонентів шихти на газорозподіл в шарі доменної шихти, то цей фактор, на нашу думку, значною мірою впливає на розвиток фізико-хімічних перетворень в характерних зонах печі та, в цілому, на ефективність доменного процесу. А однорідний, наблизений в реальних умовах процесу до оптимального, гранулометричний склад забезпечить рівномірне проходження газів у всіх напрямках шихтових матеріалів. Необхідно відмітити, що гетерогенна суміш (дрібні + крупні частинки) може викликати створення окремих каналів, що може призвести до виникнення, на що було звернено увагу вище, струменевої течії газів (канального ходу). Це є негативним явищем, виникнення якого знижує

Таблиця 4

Результати якісного прогнозування очікуваних результатів стабілізації гранулометрії залізородних компонентів

| Показник процесу | До оптимізації | Після оптимізації |
|----------------------------|----------------|-------------------|
| Газопроникність колошника | Низька | Висока |
| Пилоутворення | Високе | Низьке |
| Стабільність плавки | Нестабільна | Стабільна |
| Витрати коксу | Підвищені | Знижені |
| Температура гарячого дуття | Нерівномірна | Стабільна |
| Екологічне навантаження | Високе | Знижене |

ефективність використання потенціалу хімічної та фізичної теплоти газів.

Наступним і не менш важливим фактором впливу на газодинамічний стан доменної шихти є стабільність вихідних фізичних властивостей шихти. Однорідна міцна фракція краще зберігає форму засипки, що дозволяє забезпечити після завантаження шихти отримання стабільної структури газопроникного шару. Пилоподібні частинки, якщо компоненти шихти не відповідають відповідним вимогам щодо міцності, знижують стійкість шару і можуть створювати «мертві зони» з низьким обдувом. Це призводить до зменшення поверхні контакту відновника (CO) з компонентами оксидного походження та інтенсивності видалення із активних зон продуктів їх взаємодії. В більшості випадків до цього має відношення агломерат як компонент, частка якого в шихті сучасних доменних печей постійно збільшувалась.

Застосування математичних моделей для прогнозування впливу гранулометричного складу шихти на параметри доменного процесу дозволить оптимізувати способи завантаження та режими розподілу компонентів вихідної шихти. Це сприятиме стабільній роботі печі та зниженню витрат енергоресурсів, на що звернута увага в [21]. Оперативно реагувати на зміни в шихтовому режимі та підтримувати оптимальні умови плавки дозволяє оснащення сучасних доменних печей системами автоматичного контролю параметрів шихтового режиму: хімічного та гранулометричного складу, вологості, швидкості опускання шихти та ін. Основні наслідки порушення гранулометрії, визначені в роботі, наведено в табл. 5.

Важливими при організації ведення доменного процесу, що дозволяє раціонально витрачати вихідні потенціали властивостей джерел енергії та

Таблиця 5

Ознаки параметрів стану та наслідки порушення гранулометрії залізородних компонентів

| № | Характерні ознаки параметрів стану | Наслідки порушення вимог до гранулометрії |
|----|------------------------------------|--|
| 1. | Підвищений гідравлічний опір | Зменшення продуктивності, підвищення тиску газів |
| 2. | Нерівномірний газорозподіл | Локальні перегіви або недогіви шихти |
| 3. | Зміщення гарячої зони | Порушення рівня відновлення заліза, зростання витрат коксу |
| 4. | Нестабільна робота печі | Зниження якості чавуну. Необхідність перегляду режиму завантаження та технічного стану системи БКЗ |

залізородних матеріалів, є способи оптимізації гранулометричного складу доменної шихти. До основних, найбільш ефективних за результатами застосування, доцільно віднести, згідно з [22], наступні:

— сортування і грануляція шихтових матеріалів перед завантаженням;

— застосування моделей розподілу газових потоків для визначення оптимального алгоритму завантаження та розподілу шихти;

— контроль за вмістом в доменній шихті дрібних фракцій (не більше 5—10 % частинок < 5 мм).

Автором встановлено, що зміна одного або кількох газодинамічних параметрів, наприклад, перепаду тиску, швидкості газового потоку, проникності шару, залежить від розміру частинок агломерату та їх співвідношення. Результати досліджень підтверджують існування оптимального гранулометричного складу та раціонального співвідношення компонентів шихти, яке сприяє покращенню газодинаміки, що особливо важливо для стабільної роботи печі. Збільшення розміру фракцій понад оптимально-раціонального, на нашу думку, при зростанні газопроникності шихти не поліпшить умови газорозподілу в ній і не сприятиме підвищенню ступенів завершення відновлювальних реакцій внаслідок зменшення рівня використання як фізичної, так і хімічної теплоти газів через зменшення часу їх перебування в стовпі шихти.

Для оптимізації умов реалізації властивостей фізико-хімічного потенціалу відповідних технологічних процесів виробництва металів та сплавів проводять оцінку втрат потенціалу системи

через аналіз ексергії — як показника корисної енергії [23]. Ексергія — це кількість роботоздатної (корисної) енергії, яку можна отримати з термодинамічної системи при приведенні її до стану рівноваги з навколишнім середовищем. Оцінка втрат вихідного потенціалу доменного процесу через аналіз ексергії дає змогу глибше зрозуміти ефективність використання енергії загального процесу та виявити джерела її нераціональних витрат. Таким чином, показники ексергійного аналізу свідчать про те, не скільки енергії витрачається, а наскільки ефективно вона використовується (табл. 6).

Вірогідні інтервали показників ефективності використання складових потенціалу корисної енергії доменного процесу, відповідно до його сучасного стану, становлять в %: - ККД первинної енергії — 45—55; ефективність ексергії системи — 35—45; частка втрат через доменний газ ~20—25 % ексергії; потенціал утилізації шлаку — до 10 від загальних втрат вихідного потенціалу енергії. Відповідно до результатів аналізу витрат корисної енергії доменного процесу та показників раціонального рівня використання її складових, може бути визначена схема втрат та напрямків підвищення ексергійної ефективності доменного процесу.

Якщо основні втрати ексергії відбуваються у вигляді невикористаної хімічної енергії доменного газу (CO, H₂), фізичної теплоти газоподібних продуктів хімічних реакцій відновлення оксидів заліза і високотемпературної шлакової фази, підвищення ексергійної ефективності процесу можливе через:

— застосування удосконалених конструкцій

Результати ексергійного аналізу ефективності витрат корисної енергії доменного процесу

| № | Компонент процесу | Джерело ексергії | Основні втрати ексергії | Способи зниження втрат енергії |
|----|-------------------|--|---|---|
| 1. | Кокс доменний | Хімічна ексергія (вуглець коксу) | Неповне згоряння і як наслідок — надмірний вміст CO | Частина ексергії втрачається з газами, які можуть бути джерелами вторинної енергії |
| 2. | Повітряне дуття | Фізична ексергія (температура + тиск) | Перегрів, втрати теплоти через футерування стінки | Слід оптимізувати параметри повітряного дуття |
| 3. | Агломерат/окатиші | Хімічна ексергія Fe ₂ O ₃ + інертні домішки залізорудних компонентів | Неповне відновлення, втрати зі шлаком | Частково відновлені компоненти знижують ексергію |
| 4. | Доменний газ | Недостатній рівень використання хімічної ексергії (CO, H ₂) | Викиди газу без рекуперації в навколишнє середовище | Використання паливної складової потенціалу газу для нагрівання повітряного дуття та ін. |
| 5. | Шлак | Високотемпературна ексергія | Не використовується повторно | Розробка заходів щодо теплорекуперації фізичної теплоти шлаку |
| 6. | Чавун | Концентрована хімічна ексергія (C, Si, Fe) | Втрати при перегріві | Оптимізація параметрів випуску рідкого чавуну. Розширення спектра функціонального застосування потенціалу властивостей чавуну, в тому числі і фізичної теплоти чавуну |

теплорекуператорів для ефективної акумуляції та використання фізичної теплоти шлаку;

— утилізацію теплового потенціалу доменного газу, наприклад в наступній схемі його генерації: тепло → електроенергія → водень → тепло (хімічна та фізична) → потреби технологічного процесу;

— оптимізацію дуття за температурою, вологістю, складом та тиском;

— вдосконалення способів підготовки компонентів вихідної шихти, а саме використання агломерату з високою відновлюваною спроможністю, раціональною його гранулометриєю та відповідним стабілізованим спектром фізичних властивостей. Таким чином, спосіб ексергійного аналізу, який дозволяє визначити, наскільки ефективно використовуються складові вихідного потенціалу енергії доменного процесу, є важливим інструментом екологічної оцінки його результатів. Дозволяє скоротити викиди CO₂ за рахунок більш раціонального використання складових вторинного потенціалу енергії газів — хіміко-фізичної енергії CO та фізичної енергії CO₂.

Результати проведеного аналізу поведінки залізорудних компонентів вихідної шихти в умовах доменного процесу дозволяють визначити вплив їх гранулометрії. Так, гранулометричний склад агломерату та його співвідношення, як частки основного залізорудного компоненту доменної шихти до інших її компонентів, доцільно визнати визначальним для стабільності процесу виплавки чавуну. Причиною порушення співвідношення дрібних та крупних фракцій як умови ефективного реалізації процесу, може стати нестабільність характеристик агломерату, а саме його міцності при нагріванні під час проходження характерних зон печі. До цього призводить відхилення процесу спікання від найбільш раціональних умов, що сприяє нестабільності мінералогічного складу.

Щодо впливу мінералогічних аспектів, необхідно

визнати, що хімічний склад є важливим параметром, але гранулометрія компонентів вихідної шихти сприяє визначенню послідовності, місця та умов утворення фаз. При цьому, дрібні частки беруть більш активну участь у формуванні первинного розплаву, а крупні — забезпечують ядра і необхідну, для організації інтенсивного трафіку компонентів та продуктів їх взаємодії, газопроникність реакційно-спроможного середовища.

Окрім вирішення задач стабілізації властивостей агломерату як основного залізорудного компонента доменної шихти, проблемним питанням доменщиків є дослідження впливу збільшення в її складі залізорудних матеріалів на параметри, умови завантаження та особливості реалізації фізико-хімічних процесів виробництва чавуну в доменній печі. Так, найбільш ефективними шляхами зменшення енергоємності доменної плавки при використанні багатокомпонентної шихти, автори [24] визначили проведення попереднього перед завантаженням змішування її залізорудних компонентів з коксом, введення добавок цільового призначення, в тому числі некондиційних відходів, що є відсівом шихтових матеріалів. Таким чином, автори пропонують ще більш розширити спектр вихідних властивостей багатокомпонентної шихти (її хімії та гранулометрії, в тому числі), визначаючи як умову вирішення даної технологічної задачі вибір раціональних параметрів формування шихти та режимів її завантаження.

Треба відзначити, що автори в своїх попередніх дослідженнях визнають, що причиною поширеного застосування багатокомпонентної шихти стало підвищення цін на сировину та паливо, що на їх думку, сприяло використанню матеріалів зниженої металургійної якості. Висновок може бути однозначним — економіка є фактором, вплив якої на розвиток і удосконалення доменного процесу переважає науко-

во обґрунтовані шляхи розвитку сучасних технологій. Одним з головних напрямів інноваційного удосконалення доменної плавки, згідно з [25], є використання одного виду залізорудної сировини, яка б об'єднувала кращі властивості агломерату та окатишів.

Таким чином, відсутність компромісу при вирішенні економічних та виробничих проблем сучасності, є, на нашу думку, причиною того, що науковцям в своїх дослідженнях, іноді, за причинами суб'єктивного характеру, доводиться вирішувати проблеми розвитку і стійкого функціонування металургійних виробництв, на перший погляд, регресивними методами [26].

В дослідженні умов роботи доменної печі з нестабільною якістю шихтових матеріалів, причиною чого може стати надмірне збільшення числа залізорудних матеріалів та джерел їх постачання, визначені раціональні режими завантаження доменної печі з безконусним завантажувальним пристроєм (**БЗП**) [27]. В подальшому автором [27] на основі науково-практичного досвіду визначені сучасні підходи щодо управління завантаженням доменної печі, яка обладнана **БЗП**.

Гранулометричний склад агломерату є ключовим параметром, що визначає газопроникність шихти, рівномірність проходження газів та теплових потоків, а також утворення зон відновлення у доменній печі. У разі змін крупності агломерату (зменшення, збільшення, зміна розподілу за фракціями), необхідно адаптувати систему безконусного завантаження (**БКЗ**) з метою збереження стабільності процесів у печі. Система безконусного завантаження дозволяє керувати розподіляти матеріал за радіусом колошника, формуючи завантажувальні профілі відповідно до фізичних властивостей матеріалу. Таким чином, при зміні крупності агломерату, система повинна забезпечити адаптивний розподіл за зонами: периферія — центр, змінюючи кути розвантаження, траєкторії, кількість шарів та ін. параметри.

Враховуючі результати досліджень [28—31], доцільно, в якості основних положень реагування си-

стеми **БКЗ** на зміну гранулометрії визначити наступні:

1. Врахування крупності в алгоритмі розподілу визначення оптимальної зони укладки для агломерату різної крупності (крупніший — ближче до периферії, дрібніший — до центру).

2. Зміна схеми завантаження шляхом корекції кута нахилу жолоба, частоти обертання плити, параметрів секторного або кільцевого завантаження.

3. Регулювання шаруватості через контроль товщини шару агломерату та чергування з іншими компонентами (руда, окатиші, кокс).

4. Моніторинг зворотного зв'язку шляхом використання датчиків рівня засипу, температури та тиску для оцінки ефективності завантаження і повторне налаштування системи. Ще одним фактором впливу фізико-хімічного походження представляється відношення CO/CO_2 , значення якого опосередковано визначає вплив розподілу компонентів на рівень використання хімічної енергії CO .

5. Автоматичне моделювання профілю завантаження здійснюється шляхом адаптації до прогнозованих змін крупності агломерату на основі систем онлайн-аналізу.

Доцільним, також, є узгодження дій в системі «порушення гранулометрії як виклик системі завантаження — спосіб реагування системи на нього». Дані їх узагальнення щодо вірогідних відхилень від гранулометрії і відповідних дій на виклики системи наведено в табл. 7.

В дослідженні [29] доведено, що об'єм або глибина воронки на поверхні шихти є основним узагальнюючим показником, що істотно впливає на радіальний розподіл шихти, і змінюється пропорційно розвитку газового потоку практично без затримки. Цей висновок підкреслює взаємозв'язок між способом розподілу компонентів шихти, розвитком газового потоку та фізико-хімічними процесами в шарі шихти на відповідних зонах печі.

Щодо ролі в доменному процесі гранулометрії залізорудних компонентів різного походжен-

Таблиця 7

Способи реагування системи безконусного завантаження на вірогідні порушення крупності агломерату

| № | Порушення гранулометрії агломерату | Спосіб реагування системи безконусного завантаження та розподілу шихти |
|----|--|--|
| 1. | Зменшення середнього розміру (зростання дріб'язку) | - Переміщення зони укладки ближче до центру - Зменшення кута розвантаження жолоба - Зменшення товщини шару шихти |
| 2. | Збільшення середнього розміру (крупніші гранули) | - Переміщення зони укладки ближче до периферії - Збільшення кута нахилу жолоба - Збільшення товщини шару шихти |
| 3. | Нерівномірний розподіл (поява широкої фракційності) | - Формування багатшарового укладення шихти з розділенням фракцій - Чергування шарів різної крупності |
| 4. | Надлишок дрібних фракцій у партії | - Частіше чередування залізорудних компонентів з коксом для підвищення газопроникності шихти - Перенесення укладки ближче до центру |
| 5. | Раптова зміна фракційного складу шихти (нестабільне надходження) | - Адаптивна зміна траєкторій жолоба в реальному часі - Увімкнення алгоритмів швидкої корекції |
| 6. | Системне зменшення однорідності | - Перехід до зонального (секторального) завантаження - Підвищення ролі датчиків і цифрового моделювання |

ня. Узагальнюючи результати проаналізованих досліджень, необхідно визнати, що більш дрібні фракції підвищують тиск газу, що є небезпекою закупорки; більш крупні фракції сприятимуть стабільній газопроникності та зменшенню опору; збалансована гранулометрія як оптимальна для певних умов забезпечить необхідну міцність компонентів шихти та оптимізує газодинамічний режим доменного процесу. Зменшення середнього розміру частинок або збільшення вмісту дрібних фракцій (< 5 мм) призводить до ущільнення шихти, що знижує її газопроникність та ускладнює проходження газів, спричиняє нерівномірний розподіл температур і знижує ефективність тепломасообміну між нагрітим газом та компонентами шихти.

Наявність великої кількості дрібних частинок збільшить опір газовому потоку, що може призвести до утворення застійних зон, в яких розвиток фізико-хімічних процесів трансформування вихідних властивостей шихти буде мати затухаючий характер. Це стане причиною збільшення витрати палива та зниження загальної продуктивності печі.

Крупність агломерату суттєво впливає на ефективність і основні показники доменного процесу. Оптимальна крупність забезпечує кращу газопроникність шихти, рівномірний розподіл температурного поля та стабільне згоряння палива. Занадто дрібний агломерат призводить до ущільнення шихти, збільшення опору газовому потоку, погіршення тепломасообміну та зростання витрат коксу. Надто крупний — ускладнює рівномірність розподілу компонентів і знижує якість плавки. Таким чином, раціональна крупність агломерату є ключовим чинником стабільної роботи доменної печі, зменшення витрат палива та підвищення продуктивності.

Попередня стабілізація вихідних властивостей доменного агломерату (зокрема крупності, пористості, міцності, хімічного складу) має важливе значення для оптимізації фізико-хімічних процесів у доменній печі. Вона забезпечує:

- рівномірність газорозподілу на колошнику, що сприяє стабільному ходу газів, що є носіями теплоти;
- зниження флуктуацій температурного режиму в характерних зонах печі;
- поліпшення умов для відновлення оксидів заліза та інших елементів, що підвищує ефективність відповідних реакцій;
- зменшення пилоутворення та втрат заліза;
- економію коксу за рахунок стабільності матеріального та енергетичного балансу плавки чавуну.

Оптимізація гранулометричного складу компонентів вихідної шихти забезпечить рівномірний розподіл температури по перетину шахти, що сприятиме стабілізації умов протікання основних відновлювальних реакцій. Таким чином, стабілізований агломерат сприяє підвищенню продуктивності печі, зниженню витрат палива та поліпшенню якості чавуну.

Результати, що отримані в дослідженні, дозволяють визначити гранулометричний склад доменної

шихти найбільш критичним фактором забезпечення стабільності складових доменного процесу: - раціональних умов для розвитку теплообмінних та газодинамічних процесів в характерних зонах доменної печі та, загалом, ефективності виробництва чавуну.

Висновки

На основі теоретико-аналітичного розгляду науково-технічних джерел, систематизації, узгодження та узагальнення результатів практичного досвіду організації доменного процесу визначено наступне.

Ефективність і стабільність виплавки чавуну значною мірою залежать від якості агломерату, який є основним залізородним компонентом доменної шихти. При цьому спостерігається тісна взаємозалежність між гранулометричним складом, фізико-хімічними властивостями вихідних залізородних матеріалів та кінцевими властивостями агломерату. Потенціал останніх необхідно раціонально використати.

Гранулометричний склад залізородної сировини та флюсів впливає на швидкість і рівномірність спікання компонентів вихідної шихти при агломерації. Наявність їх оптимального співвідношення за фракціями забезпечує кращу газопроникність шихти, що сприяє якісному прогріванню та спіканню матеріалу, формуванню агломерату з високою механічною міцністю, пористістю та мінералогією. Гранулометричний склад шихти безпосередньо впливає на газодинамічні умови в сухій зоні доменної печі. Оптимізація цього параметра є важливою умовою для забезпечення рівномірного газорозподілу, зниження енерговитрат і стабільної роботи печі. Цей важливий параметр доцільно, також, використати при розробці раціонально-ефективних конструкцій апаратів для завантаження та надійних алгоритмів розподілу компонентів вихідної доменної шихти в піч.

Фізико-хімічні властивості вихідних компонентів аглошихти (вміст заліза, вологи, домішок, вуглецю, модуль основності та ін.) визначають хімічний склад агломерату, температурний інтервал «розм'ягчення — плавлення» та реакційну здатність при доменному процесі та інші показники, що визначають спектр його функціонального призначення. Відхилення від оптимальних показників погіршує термічну стійкість агломерату, сприяє шлакоутворенню та зменшує вихід чавуну.

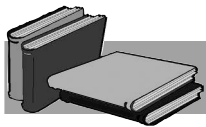
Стабілізація властивостей агломерату, а саме речовинного складу (мінералогії та хімії), його фізичних властивостей (пористості, газопроникності, кускуватості, механічної міцності) металургійних (відновлюваності), є критичним фактором, що забезпечує передбачуваність процесів у доменній печі, рівномірне спікання шихти, сталість теплового режиму та ефективне використання коксу. Коливання в якості агломерату призводять до перебоїв у роботі домни, підвищення витрат палива і зниження продуктивності процесу.

Отже, для забезпечення стабільності ходу доменного процесу необхідно забезпечити постійність

гранулометричного, хімічного складу, мінералогії вихідних залізородних матеріалів (агломерату та окатишів), коксу, а також високу якість і однорідність агломерату. Систематичний контроль і поточне регулювання цих параметрів є основою для подальшої оптимізації доменного процесу, раціонального за питомими витратами ресурсів сировини та енергії та ефективного за результатами реалізації властивостей його вихідного фізико-хімічного потенціалу.

Крупність агломерату суттєво впливає на ефективність і основні показники доменного процесу. Оптимальна крупність забезпечує кращу газопроникність шихти, рівномірний розподіл температурного поля та стабільне згоряння палива. Занадто дрібний агломерат призводить до ущільнення шихти, збільшення опору газовому по-

току, погіршення тепломасообміну та зростання витрат коксу. Надто крупний — ускладнює рівномірність розподілу компонентів і знижує якість плавки, тому, раціональна крупність агломерату є ключовим чинником стабільної роботи доменної печі, зменшення витрат палива та підвищення продуктивності. Таким чином, стабілізований, зокрема, за крупністю, пористістю, міцністю, хімічним складом, агломерат сприяє підвищенню продуктивності печі, зниженню витрат палива та поліпшенню якості чавуну шляхом оптимізації фізико-хімічних процесів у доменній печі за рахунок стабільності ходу газів, що є носіями енергії, зниження флуктуацій температури в характерних зонах печі, поліпшення умов відновлення оксидів заліза, зменшення пилоутворення та витрат заліза, економію коксу.

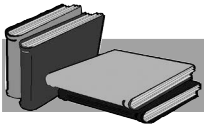


ЛІТЕРАТУРА

1. Охотський В.Б., Костьолов О.Л., Симонов В.К. та ін. Теорія металургійних процесів: Підручник. К.: ІЗМН, 1997. 512 с.
2. Кривенко С.В. Формирование зон в агломерируемом слое. *Металл и литье Украины*. 2014. № 10(257). С. 17—22.
3. Zhao Z., Li B., et al. Influence of Particle Size Distribution of Sinter on Blast Furnace Permeability. *Ironmaking & Steelmaking*. 2020. Vol. 47(3). P. 229—235.
4. Chen X., Wang W., Yang D., Zheng H., Wang B. Mineralization Characteristics of Iron Ore Sinter and the Effects of Cooling Rate on Mineral Phase Structure. *ISIJ International*. 2023. Vol. 63. Iss. 2. P. 261—270. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2022-348>
5. Терещенко А.В. Агломерацијне виробництво. Дніпро: Національний гірничий університет, 2019. 312 с.
6. Ефименко Г.Г., Гиммельфарб А.А., Левченко В.Е. Металлургия чугуна. Киев: Вища школа, 1988. 351 с.
7. Величко Г.П., Казаков А.І. Фізико-хімічні основи агломерації. К.: Техніка, 1986. С. 101—118.
8. Zervas E., de Souza R.G. Oxidation and reduction during iron ore sintering: Influence on sinter quality. *ISIJ Int*. 2017. Vol. 57(9). P. 1534—1542.
9. Бочка В.В., Тараканов А.К., Сова А.В., Бойко М.М., Ягольник М.В., Двоглазова А.В. Удосконалення технології виробництва якісного агломерату. *Теорія і практика металургії*. 2019. № 1. С. 5—14. <https://doi.org/10.34185/tpm.1.2019.01>
10. Чечель І.Ф. Агломерацијне виробництво. Дніпро: Пороги, 1998. С. 132—148.
11. Ільків В.Я., Зауличний Я.В., Гулько В.М., Зарко В.І., Яворський Ю.В., Карпець М.В., Дудка О.І. Енергетичний перерозподіл валентних електронів сумішей $Al_2O_3 + TiO_2$ з різним вмістом компонентів внаслідок механоактивації. *Фізична інженерія поверхні*. 2015. Т. 13. № 3. С. 390—398. URL: <https://periodicals.karazin.ua/pse/article/view/8033> (дата звернення: 01.08.2025).
12. Цюпа Н.О., Тогобицька Д.М. Оцінка корозійної активності луговмісних доменних шлаків по відношенню до вогнетривів. Тези Всеукраїнської науково-технічної конференції «Наука і металурія» 22—24 листопада. м. Дніпро. 2022. С. 28—29. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2022-conferens>
13. Кривенко С.В., Русских В.П., Томаш А.А. Улучшение структуры агломерата изменением интенсивности горения топлива шихты. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2010. № 2(260). С. 36—40.
14. Мянговська Я.В., Мішалкін А.П., Анкудінов Р.В., Токарев С.І., Дворковой О.І. Використання матеріалів рослинного походження в процесах переробки залізовмісних металургійних відходів. *Теорія і практика металургії*. 2019. № 4. С. 38—49. <https://doi.org/10.34185/tpm.4.2019.06>
15. Wang X.A., Jiang X., Gao Y., Huo H.Y., Shen M.F. Investigation on fluidity of SFCA and sintering strength based on phase diagram. *Iron and Steel*. 2019. Vol. 54. № 5. P. 9—13.

16. Ryabchikov M.Yu. Metallurgical agglomerate quality management with the account of its impact on the blast-furnace process efficiency. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2018. Vol. 94. P. 3785—3794. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-1138-8>
17. Нікіфоров Д.С. Реконструкція доменної печі в умовах комбінату ПАТ «Запоріжсталь». URL: <https://dspace.znu.edu.ua/jspui/handle/12345/12337> (дата звернення: 01.08.2025).
18. Бочка В.В., Сова А.В., Двоглазова А.В. Улучшение качества агломерата путем усовершенствования способа подготовки шихты. *Металл и литье Украины*. 2019. № 1—2 (308—309). С. 3—10.
19. Bocquet L., Losert W., Schalk D., Lubensky T.C., Gollub J.P. Granular shear flow dynamics and forces: Experiment and continuum theory. *Physical Review E*. 2002. Vol. 65(1). 011307. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.65.011307>
20. Нікулін В.В. Вплив гранулометричного складу шихти на пилоунос та газопроникність колошника доменної печі. *Сталь*. 2012. № 10. С. 13—19.
21. Большаков В.И., Иванча Н.Г., Нестеров А.С., Муравьева И.Г., Тогобицкая Д.Н., Семенов Ю.С. ПРОЕКТ 7.12. Разработка мероприятий по продлению кампании доменных печей путем усовершенствования технологии загрузки, шлакового режима и автоматизированного контроля параметров доменной плавки в условиях нестабильности качества шихтовых материалов. 2015. С. 628—634. URL: https://www.researchgate.net/publication/336126543_Razработка_meropriatij_po_prodlenu_kampanii_domennyh_pecej_putem_usoversenstvovania_tehnologii_zagruzki_slakovogo_rezima_i_avtomatizirovannogo_kontrola_parametrov_domЕННОЙ_plavki_v_usloviah_nestabiln (дата звернення: 01.08.2025).
22. Гумін О.О. Математичне моделювання та оптимізація параметрів доменного процесу з урахуванням гранулометричного складу шихти. Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата техн. наук. НГУ. Дніпро, 2017. 218 с.
23. Бродянский В.М., Верхивкер Г.П., Карчев Я.Я. и др. Эксергетические расчеты технических систем: Справ. пособие. Киев: Наук. Думка, 1991. 360 с.
24. Иванча Н.Г., Муравьева И.Г., Вишняков В.И., Щербачев В.Р., Ермолина К.П. Повышение энергоэффективности доменной плавки за счет выбора рациональных параметров режима загрузки многокомпонентной шихтой. *Problemele energeticii regionale*. 2022. 2(54). С. 53—62.
25. Кассім Д.О., Лялюк В.П., Журавльов Ф.М., Ляхова І.А., Чупринов Є.В. Головний напрямок інноваційного вдосконалення доменної технології — використання одного виду залізорудної сировини, що поєднує кращі властивості агломерату та окатишів. *Вісник Приазовського Державного Технічного Університету. Серія: Технічні науки*. 2018. Вип. 36. С. 7—15. <https://doi.org/10.31498/2225-6733.36.2018.142462>
26. Семенов Ю.С. Выбор рациональных режимов загрузки доменной печи, оборудованной БЗУ, для условий работы с малой массой подачи и с нестабильным качеством шихтовых материалов. *«Черметинформация. Бюллетень Черная металлургия»*. 2013. № 12. С. 14—19.
27. Семенов Ю.С. Новые подходы в управлении загрузкой доменной печи, оборудованной БЗУ, в современных условиях работы. Пізнання процесів та розвиток технології доменної плавки: колективна праця другого міжнародного симпозиуму під науковою редакцією д.т.н., проф. І.Г. Товаровського. Дніпро: ЖУРФОНД, 2016. 382 с. С. 272—285.
28. Bhagyaraj D., Kalidhasan S.K., Satalgoan H.S., Srinivasan M., Sudharsan V., Krishana N.S.R. Blast Furnace process optimization for sustainable Iron making. *Journal of Emerging Technologies and Innovative Research*. 2023. Vol. 10. Iss. 10. URL: <https://www.jetir.org/papers/JETIR2310070.pdf> (дата звернення: 01.08.2025).
29. Golovchenko A., Pazynich Yu., Potempa M. Automated Monitoring of Physical Processes of Formation of Burden Material Surface and Gas Flow in Blast Furnace. *Solid State Phenomena*. 2018. Vol. 277. P. 54—65. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.277.54>
30. Golovchenko A., Dychkovskiy R., Pazynich Yu., Edgar C.C., Howaniec N., Jura B., Smolinski A. Some Aspects of the Control for the Radial Distribution of Burden Material and Gas Flow in the Blast Furnace. *Energies*. 2020. Vol. 13. Iss. 4. 923. <https://doi.org/10.3390/en13040923>
31. Мішалкін А.П., Турищев В.В., Камкін В.Ю., Колбін М.А. Теоретична оцінка ефективності заміни частини агломерату на залізну руду при виплавці чавуну. С. 744—752. Спеціальна металургія: вчора, сьогодні, завтра [Електрон. ресурс]: матеріали XIV Всеукраїнської науково-практичної конференції, Київ, 19 квітня 2016 р. / [редкол.: В.С. Богушевський (відпов. ред.) та ін.]. К.: НТУУ «КПІ», 2016. 1034 с.

Надійшла 16.08.2025



REFERENCES

1. Okhotskiy, V. B., Kostelov, O. L., Simonov, V. K. et al. (1997). Teoriia metalurhiinykh protsesiv: Pidruchnyk [Theory of metallurgical processes: Textbook]. IZMN [in Ukrainian].
2. Krivenko, S. V. (2014). Formirovanie zon v aglomeriruemom sloe [Formation of zones in the agglomerated layer]. *Metal and Casting of Ukraine*, 10(257), 17-22 [in Russian].
3. Zhao, Z., Li, B., et al. (2020). Influence of Particle Size Distribution of Sinter on Blast Furnace Permeability. *Ironmaking & Steelmaking*, 47(3), 229-235.
4. Chen, X., Wang, W., Yang, D., Zheng, H., & Wang, B. (2023). Mineralization Characteristics of Iron Ore Sinter and the Effects of Cooling Rate on Mineral Phase Structure. *ISIJ International*, 63(2), 261-270. <https://doi.org/10.2355/isijinternational>. ISIJINT-2022-348
5. Tereshchenko, A. V. (2019). Ahlomeratsiine vyrobnytstvo [Agglomeration production]. National Mining University [in Ukrainian].
6. Yefimenko, G. G., Himelfarb, A. A., & Levchenko, V. E. (1988). Metallurgiya chuguna [Metallurgy of cast iron]. Vyscha shkola [in Russian].
7. Velychko, G. P., & Kazakov, A. I. (1986). Fyzyko-khimichni osnovy ahlomeratsii [Physical and chemical bases of agglomeration]. Tekhnika [in Ukrainian].
8. Zervas, E., & de Souza, R. G. (2017). Oxidation and reduction during iron ore sintering: Influence on sinter quality. *ISIJ Int.*, 57(9), 1534-1542.
9. Bochka, V., Tarakanov, A., Sova, A., Boyko, M., Yaholnyk, M., & Dvoiehlazova, A. (2019). Improving the technology production of quality agglomerate. *Theory and practice of metallurgy*, (1), 5-14. <https://doi.org/10.34185/tpm.1.2019.01> [in Ukrainian].
10. Chechel, I. F. (1998). Ahlomeratsiine vyrobnytstvo [Agglomeration production]. Porogi [in Ukrainian].
11. Ilkiv, V. Ya., Zaulychnyy, Ya. V., Gun'ko, V. M., Zarko, V. I., Yavorskyi, Y. V., Karpetz, M. V., & Dudka, O. I. (2015). Effect of mass ratio of initial precursors and mechanical activation on distribution of valence electrons in Al_2O_3/Fe_2O_3 mixtures. *Journal of Surface Physics and Engineering*, 13(3), 390-398. <https://periodicals.karazin.ua/pse/article/view/8033> [in Ukrainian].
12. Tsiupa, N. O., & Tohobytska, D. M. (2022). Otsinka koroziiinoi aktyvnosti luhovmisnykh domennykh shlakiv po vidnoshenni do vohnetryviv [Assessment of the corrosion activity of alkali-based blast furnace slags in relation to refractories]. Abstracts of the All-Ukrainian Scientific and Technical Conference "Science and Metallurgy" November 22-24. Dnipro. 2022, pp. 28-29. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2022-conferens> [in Ukrainian].
13. Krivenko, S. V., Russkikh, V. P., & Tomash, A. A. (2010). Uluchshenie strukturyi aglomerata izmeneniem intensivnosti goreniya topliva shihtyi [Improving the structure of the sinter by changing the intensity of combustion of the charge fuel]. *Metallurgical and Mining Industry*, 2(260), 36-40 [in Russian].
14. Myanovska, Ya., Mishalkin, A., Ankudinov, R., Tokaryev, S., & Dvorkovoj, O. (2019). The use of vegetable materials in the processes of processing iron-metallurgical waste. *Theory and practice of metallurgy*, (4), 38-49. <https://doi.org/10.34185/tpm.4.2019.06> [in Ukrainian].
15. Wang, X. A., Jiang, X., Gao, Y., Huo, H. Y., & Shen, M. F. (2019). Investigation on fluidity of SFCA and sintering strength based on phase diagram. *Iron and Steel*, 54(5), 9-13.
16. Ryabchikov, M. Yu. (2018). Metallurgical agglomerate quality management with the account of its impact on the blast-furnace process efficiency. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 94, 3785-3794. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-1138-8>
17. Nikiforov, D. S. (2023). Rekonstruktsiia domennoi pechi v umovakh kombinatu PAT "Zaporizhstal" [Reconstruction of the blast furnace in the conditions of PJSC «Zaporizhstal» plant]. <https://dspace.znu.edu.ua/jspui/handle/12345/12337> [in Ukrainian].
18. Bochka, V. V., Sova, A. V., & Dvoeglazova, A. V. (2019). Improving of the quality of agglomerate by improving the method of charge preparation. *Metal and Casting of Ukraine*, 1-2 (308-309), 3-10 [in Russian].
19. Bocquet, L., Losert, W., Schalk, D., Lubensky, T. C., & Gollub, J. P. (2002). Granular shear flow dynamics and forces: Experiment and continuum theory. *Physical Review E*, 65(1). 011307. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.65.011307>
20. Nikulin, V. V. (2012). Vplyv hranulometrychnoho skladu shykhty na pylounos ta hazoprnyknist koloshnyka domennoi pechi [Influence of charge granulometric composition on dust and gas permeability of blast furnace grate]. *Steel*, (10), 13-19 [in Ukrainian].
21. Bolshakov, V. I., Ivancha, N. G., Nesterov, A. S., Muraveva, I. G., Togobitskaya, D. N., & Semenov, Yu. S. (2015). PROEKT 7.12. Razrabotka meropriyatij po prodleniyu kampanii domennykh pechey putem usovershenstvovaniya tehnologii zagruzki, shlakovogo rezhima i avtomatizirovannogo kontrolya parametrov domennoj plavki v usloviyah nestabilnosti kachestva shihtovykh materialov [PROJECT 7.12. Development of measures to extend the blast furnace campaign by improving the loading technology, slag regime and automated control of blast furnace melting parameters under conditions of deteriorating quality of charge materials], pp. 628-634. https://www.researchgate.net/publication/336126543_Razrabotka_meropriyatij_po_prodleniu_kampanii_domennykh_pecej_putem_usovershenstvovaniya_tehnologii_zagruzki_slakovogo_rezhima_i_avtomatizirovannogo_kontrolya_parametrov_domennoj_plavki_v_usloviyah_nestabiln [in Russian].

22. Humin, O. O. (2017). Matematychni modeliuvannia ta optymizatsiia parametriv domennoho protsesu z urakhuvanniam hranulometrychnoho skladu shykhty [Mathematical modeling and optimization of blast furnace process parameters taking into account the particle size distribution of the charge]. Thesis for the degree of Candidate of Technical Sciences. NSU. Dnipro, 218 p. [in Ukrainian].
23. Brodyanskiy, V. M., Verhivker, G. P., Karchev, Ya. Ya. et al. (1991). Eksergeticheskie raschetyi tehnicheskikh sistem: Sprav. Posobie [Exergy calculations of technical systems: a reference manual]. Nauk. Dumka [in Russian].
24. Ivancha, N. G., Muravyeva, I. G., Vishnyakov, V. I., Shcherbachev, V. R., & Yermolina, K. P. (2022). Povyshenie energoeffektivnosti domennoy plavki za schet vyibora ratsionalnykh parametrov rezhima zagruzki mnogokomponentnoy shihtoy [Increasing the energy efficiency of blast furnace melting by choosing rational parameters of the mode of loading with a multicomponent charge]. *Problemele energeticii regionale*, 2(54), 53-62 [in Russian].
25. Kassim, D. O., Lyalyuk, V. P., Zhuravlev, F. M., Lyakhova, I. A., & Chuprinov, E. V. (2018). Main direction of the innovative improving of the blast furnace technologies – use of one type of iron raw material, combining the best properties of agglomerate and pellets. *Reporter of the Priazovskyi State Technical University. Section: Technical Sciences*, (36), 7-15. <https://doi.org/10.31498/2225-6733.36.2018.142462> [in Ukrainian].
26. Semenov, Yu. S. (2013). Vyibor ratsionalnykh rezhimov zagruzki domennoy pechi, oborudovannoy BZU, dlya usloviy raboty s maloy massoy podachi i s nestabilnyim kachestvom shihtovykh materialov [Selection of rational loading modes of a blast furnace equipped with a BFU for operating conditions with a small feed mass and unstable quality of charge materials]. *Chermetinformatsiya. Bulletin "Black Metallurgy"*, (12), 14-19 [in Russian].
27. Semenov, Yu. S. (2016). Novyye podhody v upravlenii zagruzkoj domennoy pechi, oborudovannoy BZU, v sovremennykh usloviyakh raboty [New approaches to controlling the loading of a blast furnace equipped with a BFU under modern operating conditions]. Knowledge of processes and development of blast furnace smelting technology: collective work of the second international symposium under the scientific editorship of Doctor of Technical Sciences, Professor I. G. Tovarovsky. Dnipro: Zhurfond, 382 p. pp. 272-285 [in Russian].
28. Bhagyaraj, D., Kalidhasan, S. K., Satalgoan, H. S., Srinivasan, M., Sudharsan, V., & Krishana, N. S. R. (2023). Blast Furnace process optimization for sustainable Iron making. *Journal of Emerging Technologies and Innovative Research*, 10(10). <https://www.jetir.org/papers/JETIR2310070.pdf>
29. Golovchenko, A., Pazynich, Yu., & Potempa, M. (2018). Automated Monitoring of Physical Processes of Formation of Burden Material Surface and Gas Flow in Blast Furnace. *Solid State Phenomena*, 277, 54-65. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.277.54>
30. Golovchenko, A., Dychkovskiy, R., Pazynich, Yu., Edgar, C. C., Howaniec, N., Jura, B., & Smolinski, A. (2020). Some Aspects of the Control for the Radial Distribution of Burden Material and Gas Flow in the Blast Furnace. *Energies*, 13(4), 923. <https://doi.org/10.3390/en13040923>
31. Mishalkin, A. P., Turyshchev, V. V., Kamkin, V. Yu., & Kolbin, M. A. (2016). Teoretychna otsinka efektyvnosti zaminy chastyny ahlomeratu na zaliznu rudu pry vyplavtsi chavunu [Theoretical assessment of the efficiency of replacing part of the sinter with iron ore in iron smelting. Special metallurgy: yesterday, today, tomorrow]. [Electronic resource]: materials of the XIV All-Ukrainian scientific and practical conference, Kyiv, April 19, 2016 / [editors: V. S. Bogushevsky (ed.) et al.]. K.: NTUU "KPI", 2016. 1034 p. [in Ukrainian].

Received 16.08.2025

Summary

A.P. Mishalkin, PhD (Engin.), Associate Professor,
e-mail: meshalkin@ukr.net

D.V. Malovik, PhD student, e-mail: dmitriyvm2008@gmail.com,
<https://orcid.org/0009-0000-4223-7004>

V.G. Chistyakov, PhD (Engin.), Associate Professor, Professor of the
Department, e-mail: chist.chvg60@gmail.com,
<https://orcid.org/0000-0003-4233-3797>

V.O. Petrenko, Dr. Sci. (Engin.), Professor, Head of the Department,
e-mail: petrenko_v@email.ua, <https://orcid.org/0000-0001-5017-1674>

Ukrainian State University of Science and Technologies (Dnipro, Ukraine)

Analysis of the Influence of Stabilization of Sinter Initial Properties on Physicochemical Processes in the Characteristic Zones of a Blast Furnace

The article investigates the stabilization of the physicochemical properties of iron ore sinter and pellets, as the main components of the blast furnace charge, on physicochemical processes in the characteristic zones of the blast furnace, which is an urgent problem for further improvement of the technology of smelting cast iron. Obtaining high-quality sinter is a complex task, and its solution is based on the stabilization of its initial properties. It is substantiated that the most effective in terms of impact on the results of the process are the increase in mechanical strength, thermal, physicochemical and granulometric stability of the sinter, which affect the conditions and behavior of the components in the characteristic zones under the corresponding conditions of the blast furnace.

The stabilization of the physicochemical characteristics of the sinter is investigated as one of the important factors for ensuring the most rational use of its physicochemical potential when passing through the high-temperature zones of the blast furnace. The key rheological properties of granular flows of the blast furnace charge have been determined, which is important in terms of substantiating effective loading methods and technical solutions for the distribution of charge components in the blast furnace. The influence of the fractional composition of the charge and the ratio of its main components on gas-dynamic conditions has been investigated, especially in the dry zone, the most extensive zone of physicochemical transformations of the blast furnace, which is one of the key factors determining the efficiency of the blast furnace process.

The study used theoretical and analytical methods with an emphasis on the physicochemical component, which include analysis, generalization and interpretation of the results obtained in the context of the correspondence of theoretical concepts and provisions to practical results.

Consistent ideas about the peculiarities of the behavior of charge components in the blast furnace have been obtained. Comparison of such data obtained by different researchers can be used in the future to identify the relevant parameters. The latter, as indicators that determine the conditions for the rational use of effects, the source of which is the interaction of the useful properties of the physicochemical potential of the initial charge and external factors, will allow us to determine reliable interpretations of phenomena, predict the results and indicators of the blast furnace process. They will also become the basis for scientific substantiation of approaches to the selection of effective methods for stabilizing the properties of the sinter with the establishment of reliable relationships between the methods of loading, distribution of the components of the initial charge and gas-dynamic conditions in the furnace.

It is substantiated that to ensure the stability of the blast furnace process, it is necessary to ensure the constancy of the granulometric, chemical composition, mineralogy of the initial iron ore materials (sinter and pellets), coke, as well as high quality and uniformity of the sinter. Systematic control and current regulation of these parameters is the basis for further optimization of the blast furnace process, rational in terms of specific costs of raw materials and energy resources and effective in terms of the results of implementing the properties of its initial physicochemical potential.

It has been proven that a stabilized sinter, in particular in terms of size, porosity, strength, and chemical composition, contributes to increasing furnace productivity, reducing fuel consumption, and improving the quality of cast iron by optimizing physicochemical processes in the blast furnace due to the stability of the flow of gases, that are energy carriers, reducing temperature fluctuations in characteristic zones of the furnace, improving the conditions for the reduction of iron oxides, reducing dust formation and iron losses, and saving coke. Generalization of the research results will allow us to clarify the physicochemical features of the interaction of granular flow components in variable blast furnace conditions.

Keywords

Blast furnace, sinter, granulometry, mineralogy, stabilization, gas permeability, energy resources, charge loading.