

Ванюков А.А., Ковальов Д.А., Камкіна Л.В., Комар А.С.

**Спiкання залiзорудних обкотишiв iз пiдвищеним вiмiстом твердого палива Досвiд виробництва.***Vanyukov A.A., Kovalev D.A., Komar A.S.***Sintering of iron ore pellets with an increased content of solid fuel***Анотація.*

*В роботі розглянуто питання підвищення продуктивності доменних печей. Одним із способів, поряд зі збільшенням кількості дуття і зменшенням витрати коксу, є використання високоякісної металізованої шихти. Тому обґрунтування можливості широкого використання твердого палива, як джерела теплової енергії, так і відновника оксидів заліза, у виробництві залізорудних обкотишів є актуальним. Завдання дослідження при виробництві обкотишів: підвищення міцності офлюсованих обкотишів, що вміщують тверде паливо фракції 0,08—0,8 мм, покращення їх ступеня металізації та можливість перенесення частини процесу відновлення з доменної печі на стадію спiкання гiбридних згрудкованих шихтових матерiалiв. Наукова новизна:*

Вступ

Відомо, що найбільш перспективним напрямом розвитку доменного виробництва є покращення якості вихідних шихтових матеріалів [1]. Від якості приготовленої шихти прямо пропорційно залежать питома витрата коксу, швидкість протікання хімічних реакцій та фізико-хімічних перетворень у доменній печі, що істотно впливає на інтенсифікацію доменного технологічного процесу [1, 2]. Останнім часом особлива увага приділяється удосконаленню доменного процесу як на стадії підготовки металургійної сировини, так і безпосередньо при веденні плавки в плавильному агрегаті.

Останніми роками розроблена низка технологій спiкання агломерату, що включають поліпшення якості згрудкованої агломераційної шихти, підвищення кисню в повітрі, попереднє підігрівання шихти до запалювання [3, 4]. У праці [5] встановлено, що продуктивність доменної печі різко зростає при сумісному використанні вугільнопорошкового палива з природним газом і високим вмістом кисню в дутті. Дослідженнями [6] встановлено, що додавання твердого палива до шихти і використання його у вигляді водно-вугільної суспензії на випалювальних конвеєрних машинах дає змогу знизити питому витрату природного газу, підвищити міцність котунів і зменшити вихід дріб'язку в спеченому продукті.

Відомостей про використання у доменному процесі попередньо металізованої залізорудної шихти в періодичних виданнях майже не наводиться, хоча у підручниках [1, 2] відзначається, що одним із ефективних способів підвищення продуктивності доменних печей, поряд зі збільшенням кількості дуття і зменшенням витрати коксу, є використання високоякісної металізованої шихти. Тому можливість широкого використання твердого палива, як джерела теплової енергії, так і відновника оксидів заліза, у виробництві залізорудних котунів постійно перебуває в полі зору спеціалістів. У зв'язку з цим важливо вирішити такі завдання при виробництві котунів, як підвищення міцності офлюсованих котунів, що вміщують тверде паливо фракції 0,08—0,8 мм, покращення їх ступеня металізації та можливість перенесення частини процесу відновлення з доменної печі на стадію спiкання гiбридних згрудкованих шихтових матерiалiв.

**Процес спiкання залiзорудних котунiв i з'ясування їх основних властивостей**

Актуальність проведення досліджень у зазначеному напрямі не викликає сумніву, оскільки виготовлення якісних офлюсованих котунів із підвищеним вмістом вуглецю сприятиме підвищенню ступеня їх металізації і подальшому використанню металізованої шихти в доменному процесі, що забезпечить зниження витрати коксу, підвищення інтенсивності роботи і продуктивності плавильного агрегату.

Вивчення процесу спiкання залiзорудних котунiв iз пiдвищеним вiмiстом твердого палива i впливу на цей процес деяких факторiв становить значний інтерес. Тому в процесі дослідження було з'ясовано роль таких факторів, як основність залізорудних котунів, вміст у них твердого палива і температура спiкання, на показники міцності при ударі й стиранні та ступінь металізації спеченого продукту.

Як основний сировинний матеріал використовували концентрат залісної руди, що був отриманий із використанням флотаційного способу збагачення та мокрої магнітної сепарації і який має такий хімічний склад, %: 67,6 Fe; 23,1 FeO; 5,6 SiO<sub>2</sub>; 2,05 MnO; 1,05 CaO; 0,5 MgO; 0,14 S; 0,06 P, при вологості маси 9,8 %. Зазначений концентрат використовували для виготовлення як неофлюсованих, так і офлюсованих котунів з основністю 1,4 і 1,9. Відсотковий хімічний склад котунів основністю 1,4 становив: 63,5 Fe; 20,2 FeO; 2,05 MnO; 7,23 CaO; 0,75 MgO; 5,7 SiO<sub>2</sub>; 0,14 S; 0,05 P, при вологості маси 8,8 %, а котунів основністю 1,9: 58,9 Fe; 18,9 FeO; 2,05 MnO; 5,8 SiO<sub>2</sub>; 10,1 CaO; 1,0 MgO; 0,12 S; 0,05 P, при вологості маси 7,8 %.

Котуни випалювали в печі Таммана в кварцовій трубці діаметром 40 мм, через яку продували підігріте повітря в кількості 35 л/хв. Випалювання котунів (після попереднього підігрівання до 573K протягом 5 хв) проводилось за температур 1553, 1573 і 1593K протягом 10 хв їх завантаженням у розігріту кварцову трубку. Після короткої витримки котунів у печі за вказаних температур їх охолоджували сумісно з піччю до 1173 K, а потім видаляли з печі і охолоджували потоком холодного повітря.

Випалені котуни піддавали механічним випробуванням на деформаційне стиснення і стирання із застосуванням стандартних методик дослідження.

З допомогою хімічного і рентгеноструктурного методів аналізу визначали у складі котунів монооксид заліза, фазовий склад та їх ступінь металізації.

Для отримання ступеня металізації котунів близько 35 % до зазначених сумішей, хімічний склад яких наведений вище, додавали пилоподібний кокс фракції 0,08...0,8 мм як відновник оксидів заліза. Котуни для доменного виробництва чавуну, як правило, не містять твердого палива або містять його в кількості 1...2 %, тоді як для прямого отримання заліза за технологією ITmk-3 вміст твердого палива в котунах коливається в межах 20...30 % [1, 3, 6]. Тому в складі котунів дослідної серії вміст твердого палива змінювали в межах 4—12 %.

Використання дисперсного твердого палива в складі котунів дало можливість отримати значною мірою відновлювальну атмосферу замість інтенсивного окиснення котунів у зоні їх нагрівання (випа-

лювання). В інтервалі температур випалювання 1553...1593 К протягом 5 хв відбувається прогрівання котунів, що супроводжується формуванням розплаву, причому в рідкій фазі превалює вже оксид FeO замість Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, як у застосуванні традиційної технології при спіканні котунів без наявності у складі твердого палива. В результаті замість воластоніту (CaSiO<sub>3</sub>) і двокальцієвого силікату (Ca<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>), які мають поля кристалізації в системі CaO·Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·SiO<sub>2</sub>, утворюються олівін (CaFeSiO<sub>4</sub>) і ферити кальцію з широким полем кристалізації в системі CaO·FeO·SiO<sub>2</sub>, що дає можливість різко зменшити рівень внутрішніх напруг і підвищити механічну міцність спеченого продукту.

Змінення міцності котунів різної основності з вмістом твердого палива до 10 %, випалених протягом 10 хв за температур 1553, 1573 і 1593 К, показано на рис. 1.

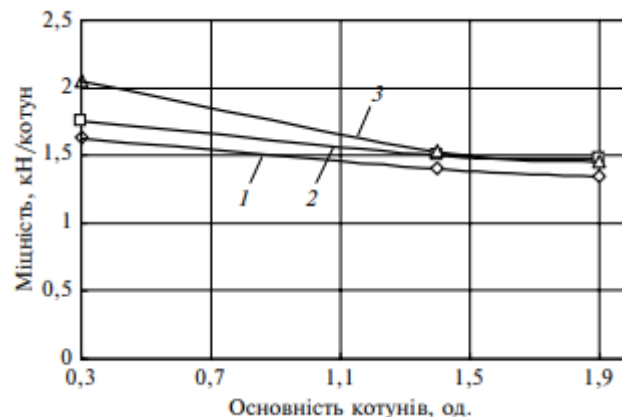


Рис. 1 Змінення міцності котунів різної основності з вмістом палива 10 %, випалених протягом 10 хв: 1 — 1553 К; 2 — 1573 К; 3 — 1593 К

Котуни, отримані за цією технологічною схемою, характеризуються достатніми показниками міцності в холодному стані і не руйнуються при відновленні, оскільки вони мають міцні шлакові силікатні зв'язки і значно менший рівень рекристалізації. Наявність у склад котунів оксиду магнію до 1,0 % дає змогу не тільки істотно підняти температуру випалу (до 1593 К), але й розширити температурний інтервал випалу. В процесі зміцнення MgO проникає в решітку магнетиту методом дифузії в твердій фазі, утворюючи сполуку (Mg,Fe)·Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> на межі зерен, і діє як сильна в'язуча речовина між зернами оксидів заліза.

Наведена на рис. 2 залежність міцності випалених котунів від температури вказує на той факт, що з підвищенням температури до 1593 К міцність їх зростає незалежно від основності. Проте з підвищенням основності їх міцність дещо знижується. Зниження міцності пояснюється тим, що в міру підвищення температури відбуваються інтенсивне оплавлення силікатних мінералів, частка яких з

ростом основності збільшується, і утворення значної кількості більш крихкого шлакового каркасу. Крім того, наявність у складі котунів дисперсного твердого палива в кількості 4...12 % призводить до збільшення відновного потенціалу, зменшення ступеня окиснення котунів і, як наслідок, до зменшення кількості гематитової зв'язки, міцність якої в інтервалі температур 1473—1493 К досягає максимальних значень [7, 8].

З іншого боку, в міру підвищення температури до 1573 К і вище в результаті інтенсифікації процесу відновлення, видалення кисню і перебудови кристалічної решітки (у зв'язку з дисоціацією залишкового гематиту і утворенням вторинного магнетиту) по зовнішньому периметру котуна збільшується мікропористість, яка послаблює зв'язки між агрегатами кристалів [7, 8].

Підтвердженням такої закономірності щодо змінення міцності котунів різної основності з підвищенням температури випалювання є результати барабанних проб спеченого продукту (рис. 2).



Рис. 2 Результати барабаних проб котунів різної основності, випалених протягом 10 хв: 1 — 1593 К; 2 — 1573 К; 3 — 1553 К

Важливим завданням покращення якості зрідкованого матеріалу для доменного виробництва чавуну, крім підвищення його основності і “холодної” міцності, є збільшення ступеня металізації після його термообробки. Одна з умов вирішення цієї проблеми — це перенесення частини процесу відновлення з доменної печі на стадію спікання металургійної сировини. Для цього до складу зазначених вище котунів додавали 4...12 % пилового коксу фракції 0,08...0,8 мм. Використання в доменній печі попередньо металізованої залізорудної шихти зі ступенем металізації 30—35 %, за рахунок додаткового введення в склад котунів пилового коксу або вугілля, дасть мож-

ливість знизити витрати коксу приблизно на 7 % та збільшити її продуктивність приблизно на 8 % на кожні 10 % металевого заліза в шихті [1]. Наявність твердого палива у складі котунів у сполученому процесі спікання і металізації приведе до зменшення витрати природного газу приблизно в 1,5 разу. Отримання таких шихтових матеріалів з високими металургійними властивостями дасть змогу підвищити ефективність роботи доменного виробництва.

Зміну ступеня металізації офлюсованих і неофлюсованих котунів залежно від вмісту в них твердого палива показано на рис. 3

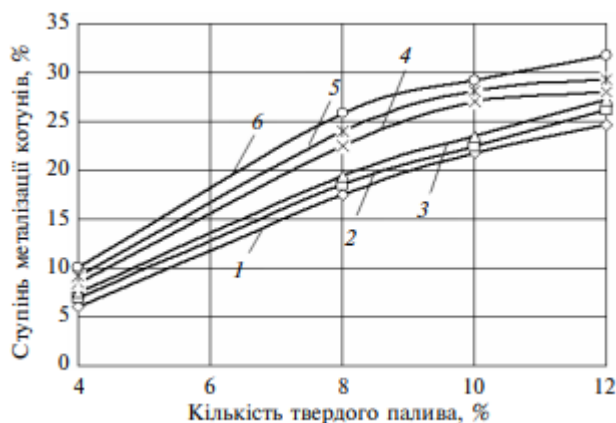


Рис. 3. Зміна ступеня металізації котунів різної основності за температур спікання 1553 і 1593 К залежно від вмісту в них твердого палива: 1 — неофлюсовані котуни, випалені за температури 1553 К; 2 — котуни основністю 1,4, випалені за температури 1553 К; 3 — котуни основністю 1,9, випалені за температури 1553 К; 4 — неофлюсовані котуни, випалені за температури 1593 К; 5 — котуни основністю 1,4, випалені за температури 1593 К; 6 — котуни основністю 1,9, випалені за температури 1593 К

Із рис. 3 видно, що зі збільшенням вмісту твердого палива у складі котунів ступінь металізації спеченого продукту постійно зростає і досягає свого максимуму, економічно вигідного для доменного процесу, за наявності в складі шихти близько 12 % вуглецю. З підвищенням вмісту вапна (CaO) у складі котунів (за однакової кількості твердого палива) їх ступінь металізації також підвищується, хоча значно меншою мірою, ніж при зміні в них

вмісту твердого палива. Так, ступінь металізації неофлюсованих котунів за температури випалу 1593 К і вмісту в них твердого палива 12 % становить 27,5 %, тоді як ступінь металізації офлюсованих котунів (1,9 од.) за тієї ж температури випалу сягає вже 31,5 %. Підвищення ступеня металізації котунів зумовлюється тим, що в інтервалі температур 1553—1593 К з підвищенням їх основності активно відбувається процес утворення рідкої фа-

зи. Причому чим більше вапна у складі котунів, тим більша кількість рідкої фази. З іншого боку, з підвищеннями основності котунів ступінь окиснення спадає [9], оскільки випалювання згрудкованого матеріалу супроводжується утворенням значної кількості рідкої фази, що ускладнює подальший доступ окисника до ядра гранули, а одночасний перебіг процесу дисоціації гематиту сприяє утворенню в центральній зоні котунів переважно магнетитової структури з підвищеним вмістом заліза.

Більш помітна залежність зміни ступеня металізації від температури спікання вказує на той факт, що підвищення температури призводить до збільшення кількості рідкої фази в котунах і до прискорення процесу рідкофазового спікання в них, а також, як наслідок, до зниження ступеня ізотермічного окиснення [9]. Наявність частинок твердого палива в складі котунів сприяє підвищенню вмісту CO в газовій фазі, що супроводжується ростом відновного потенціалу спеченого шару. Підтвердженням такого явища є утворення в центральній зоні гранул магнетитової структури з наявністю в твердому розчині оксиду заліза (FeO) і збільшеної кількості відновленого заліза, тоді як при високотемпературному випалюванні котунів без палива відбувається дисоціація гематиту з утворенням через стадію магеміту магнетитової структури з високим вмістом оксиду заліза (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) без наявності включень відновленого заліза.

Ефективність часткової заміни природного газу твердим паливом для випалу залізородних окатишів.

В даний час більшість фабрик огрудкування використовують в якості теплоносія природний газ і рідке паливо. Однак, з огляду на перспективи розвитку енергетики, швидке виснаження запасів нафти і газу в порівнянні з запасами вугілля, слід визнати, що збільшення масштабів використання вугілля дозволить уникнути енергетичної кризи. До теперішнього часу обставини змінилися таким чином, що необхідність економії теплоти при виробництві окатишів стала ще більш актуальною.

Можливі три основних напрямки використання твердого палива для випалу окатишів: шляхом його газифікації повітрям або киснем з отриманням низько і середньокалорійного газу; безпосереднім спалюванням пилоподібного палива в спеціальних виносних топках з отриманням високотемпературних димових газів, а також при спалюванні його в пальниках трубчастих обертових печей; шляхом добавки твердого палива в шихту для огрудкування [10].

Якщо ефективність застосування пиловугільного палива для зниження витрати коксу при виплавці чавуну не викликає сумніву, то заміна природного газу для виробництва залізородних окатишів недостатньо обґрунтована. Перевага на відміну від агломерації при випалюванні окатишів полягає в тому, що в газах, що викидаються в атмосферу не виявлено CO і ціана (CN)<sub>2</sub> [11]. При цьому найважливіше врахувати шкоду навко-

лишньому середовищу, який наноситься агломераційним виробництвом в результаті викидів в атмосферу оксидів сірки, азоту, окису вуглецю і ціану [12].

Спалювання пиловугільного палива здійснюється на теплоелектростанціях, в обертових печах при виробництві цементу, в горні доменної печі та інших теплових агрегатах. Спалювання вугілля в надшаровому просторі обпалювального агрегату стосовно випалу окатишів виконано на дослідній установці в США з використанням бітумінозного і бурого вугілля. Подрібнене вугілля подавали повітряним потоком в пальник трубчастого типу, де забезпечували повне згоряння вугілля. За цією схемою при одному пальнику вилучається максимальна кількість теплової енергії. Однак, для конвеєрних машин схема ускладнюється, де кількість пальників збільшується до 24 штук (ОК - 306), 34 штук (ОК - 552), що потребує перед кожним пальником необхідність встановлення бункера з дозуючим пристроєм.

При використанні цієї системи зола вугілля потрапляє в шар окатишів і виникає ймовірність утворення настилів в обертовій печі і утворення спеченців при випалюванні на конвеєрних машинах. Найбільш прийнятним для цих цілей є вугілля, температура розм'якшення золи якого повинна бути близько 1480°C.

Найбільш перспективним способом використання твердого палива для випалу залізородних окатишів є введення його в шихту для огрудкування. Подача палива в окатиш може здійснюватися накочуванням на поверхню сформованої сирової гранули, розподілом палива рівномірно за обсягом окатишів шляхом окатування рудовугільної шихти.

Виконано значний обсяг досліджень з випалювання залізородних окатишів з використанням твердого палива. Це пов'язано як з різноманіттям видів окатишів, так і палив. Вивчено рудно-паливні окатиші, отримані хіміко-каталітичним методом, двошарові окатиші з різним вмістом вуглецю в зовнішньому і внутрішньому шарах і металізовані окатиші. Зазначені способи виробництва окатишів через складність технології промислового виробництва поширення не отримали.

Стимулом до використання твердого палива при виробництві звичайних доменних окатишів, крім причин вище перерахованих, є все більш значне залучення в процес огрудкування гематитових концентратів [13].

Дослідження по використанню вугілля при виробництві окатишів на випалювальних конвеєрних машинах проведені фірмою Лургі [14]. На конвеєрній машині в Ліберії при введенні в шихту 0,6% вугілля приріст продуктивності отриманий в 15% при незначному збільшенні температури окатишів при розвантаженні [15].

У разі збереження температури нижніх ділянок оброблюваного шару такої ж, як і при звичайному режимі випалу (1100°C), добавка твердого палива призводить до збільшення продуктивності обла-

лювальної машини на 11,2%, при цьому економія природного газу складає 1,64 м<sup>3</sup>/т, а питома витрата тепла скорочується на 171,7 МДж/т. Питома витрата електроенергії зменшується при цьому на 2,6 кВт·г/т додатних окатишів.

Температурно-тимчасові характеристики випалу окатишів такі як рівень температури, тривалість термообробки забезпечують отримання окатишів необхідної якості.

На фабриці для огрудкування фірми «Сідбек-Нормайнс» в Канаді було вироблено 8 млн. т окатишів з добавкою в середньому 0,85% коксика в шихту. Витрата мазуту скоротилась з 21 до 13,5 л/т окатишів. Металургійні властивості окатишів не змінилися. За рахунок різниці у вартості коксика і мазуту економія витрат склала 4,5 млн. доларів на рік.

Одним із способів використання твердого палива для виробництва окатишів є накочування його на поверхню окатишів. При цьому відбувається вирівнювання температури по висоті шару в разі комбінованого обігріву. При введенні в шихту твердого палива можливе отримання вюститно-магнетитових обкотишів. Такі окатиші отримані при вмісті в шихті 2% твердого палива при температурі 1200...1250°C, а одержана вюститно-магнетитова структура забезпечує високі показники при відновлювально-тепловій обробці.

#### Дослідження технології виробництва окатишів з добавкою твердого палива в шихту на обпалювальній машині ок324/336

Випалювальна машина нового покоління ОК - 324/336 з візком 4 м, забезпечена інжекційними

пальниками в зонах випалу і пристроями для подачі газу знизу. Його спалювання в шарі здійснюється за допомогою газоповітрярозподільних пристроїв (ГПРП), змонтованих в дуттевих камерах. Відпрацьований в лабораторних умовах режим комбінованого випалу окатишів був випробуваний, а потім впроваджений у виробництво на фабриці огрудкування ЦГЗК. Сутність технології полягає в тому, що в шихту вводиться тверде паливо, а шар обігривається продуктами горіння природного газу. У базовий і дослідний період фізико-хімічні характеристики концентрату вапняку і бентоніту були практично однаковими. Використовували залізородний концентрат, який мав вміст:

Fe<sub>зат</sub>-65,82-65,5%; SiO<sub>2</sub>-7.9-8.38%; вапняк CaO-50.45-46.2%; CaO + MgO-52.45-52.77%; вугілля: зола-20-22%; вуглець-74-76%.

Подрібнена суміш вапняку і вугілля містила 81,7 - 96,4% фракції менше 0,071 мм і 35 - 39% вуглецю. Суміш дозувалася в шихту в кількості 1% від маси концентрату. Продуктивність млина при подрібненні суміші вапняку і вугілля склала 15 ± 3 т/год. Інша частина вапняку, необхідна для офлюсування окатишів, подрібнювалася спільно з бентонітом.

Таблиця 1

Характеристика сирих окатишів

Періоди	Масова частка воло- ги, %	Міцність		Вміст класів, %		
		Скидання, раз,	Опір стиску, кг/ок	+18 мм	8 - 18 мм	8 мм
Базовий	10,20	4,2	1,1	10,1	83,8	6,0
Дослідний I	10,05	4,9	1,15	14,3	82,3	6,0
Дослідний II	10,15	4,0	1,0	14,8	82,0	6,4
Дослідний III	10,20	4,20	1,10	12,04	82,03	6,0

Режими роботи чашкових огрудковувачів в базових і дослідних періодах були практично однакові. Продуктивність огрудковувачів коливалася в межах 90...110 т/год. Гранулометричний склад сирих окатишів і їх характеристики міцності в базових і дослідних періодах наведені в таблиці 1. Введення в шихту тонкоздрібненого вугілля 0,7...1% не позначилося на технологічні параметри отримання сирих окатишів.

Режими термообробки обкотишів і параметри роботи обпалювальної машини в базовому і дослідному періодах наведені в таблиці 2. Введення

в шихту твердого палива дозволило збільшити швидкість руху випалювальних візків з 1,8...2,0 до 1,9...2,2 м/хв, при одночасному підвищенні температури в вакуум камері № 15 з 280...350°C до 340...360°C. Додаткова кількість тепла, що виділяється за рахунок згорання в окатишах твердого палива і нагрівання повітря в зоні охолодження, дозволило знизити загальну витрату газу, споживаного обпалювальною машиною, з 3960...4360 м<sup>3</sup>/год до 3470...3710 м<sup>3</sup>/год. Зросла температура теплоносія в перетічними колекторі з 860...870°C до 900...930°C.

Таблиця 2

Показники випалу окатишів на машині ОК-324/336Ц

Параметри режиму	Вміст антрациту в шихті, %		
Продуктивність по сирим окатишам, т/год	255,0	257,0	260,0
Відсів сирих окатишів після укладчика, т/год	30,3	31	30,5
Висота шару сирих окатишів, мм	400	400	400
Витрата, м <sup>3</sup> /год:			
Природного газу	3600	3450	3380
Повітря	4200	4180	4150
Температура під пальниками, °С			
1-2	850	850	850
3-4	1100-1150	1100-1150	1100-1150
5-6	1200-1250	1200-1250	1200-1250
7-8	1200-1250	1200-1250	1200-1250
9-10	1250-1270	1200-1210	1150-1200
11-12	1240-1260	1100-1150	1030-1060
13-14	1100-1150	1030-1040	100-1030
Температура в зонах, °С			
Сушка 2	150-200	150-200	150-200
Підігрів	350-400	350-400	350-400
Охолодження 2	200-250	200-220	180-200
Тиск (+) і вакуум (-) під шаром окатишів, мм вод. ст.			
Камери: № 7	300-350	-(300-350)	-(300-350)
№ 12	310-320	-320	-320
№ 14	260-280	-260	-260
Коллектор прямого перетоку над зонами: підігрів			
Тиск, мм. вод. ст	5-7	5-7	5-7
Температура, °С	860-890	850-880	850-860
Обпал 2			
Тиск, мм. вод. ст.	5-10	5-10	5-10
Температура, °С	860-890	850-880	850-860

У дослідних періодах знизилася кількість обпаленого звороту з 20-30 т/год до 15-20 т/год. При цьому годинна продуктивність обпалювальної машини зросла з 258,6 т/год до 281 т/год, питома витрата газу на випал окатишів знизилася з 16,8 м<sup>3</sup>/т до 12,3...13,1 м<sup>3</sup>/т, а питома витрата електроенергії - з 32,3...37,1 квт год/т до 29,3...33,8 квт год/т окатишів (таблиця 3). Міцність обпалених окатишів і вміст дріб'язку в готовій продукції не змінилися (таблиця 4). Слід зазначити, підвищення вмісту монооксиду заліза з 1,4% до 3,67...4,11%. Деяке зниження міцності пов'язано зі збільшенням пористості обпалених окатишів.

Наведені результати дослідження свідчать, що при роботі на окатишах, що містять тверде паливо зросла температура в перетічному колекторі на 40-70°С. Це є результатом окислення магнетиту в зоні охолодження. Виконаний розрахунок впливу витрати природного газу на температуру продуктів горіння, що входять в зону випалу показує, що збільшення витрат природного газу на кожні 100 м<sup>3</sup>/год підвищує температуру димових газів на 18,8...21,2°С, що знижує витрату природного газу на 212 м<sup>3</sup>/год...372 м<sup>3</sup>/год. По відношенню до от-

риманого зниження витрат природного газу це становить 65,2%, решта природного газу компенсується кількістю теплоти, що виділилася при окисленні вуглецю окатишів киснем теплоносія.

Отримані результати підтверджують справедливості нової теорії, що пояснює економію природного газу при випалюванні окатишів, отриманих з шихти з додавкою твердого палива. Зниження питомої витрати природного газу пояснюється також підвищенням продуктивності обпалювальної машини. Це збільшення склало 8,66%. Відповідно знизилася питома витрата електроенергії на 10%. Відзначимо збіг теоретичних висновків, результатів лабораторних, промислових випробувань і впровадження удосконаленої технології випалу окатишів отриманих з шихти з додавкою твердого палива. Додаткова кількість теплоти, що виділяється в результаті горіння частини твердого палива та внесене повітрям із зони охолодження і окислення обкатишів дозволило знизити загальну витрату природного газу, споживаного обпалювальною машиною з 3960...4360 м<sup>3</sup>/год до 3470...3710 м<sup>3</sup>/год. Зросла температура теплоносія в перетічному колекторі з 860...870°С до

900...930°C. У дослідних періодах знизилася кількість обпаленого звороту з 20...30 т/год до 15...20 т/год.

Таблиця 3  
Характеристика обпалених окатишів

Періоди	Хімічний склад, %					
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe	CaO	MgO	SiO <sub>2</sub>	S
Базовий	59,8	1,4	5,7	0,75	7,6	
Дослідний I	60,44	3,93	5,24	0,80	7,96	0,04
Дослідний II	59,8	4,11	5,43	1,03	8,31	0,08
Дослідний III	59,9	3,67	5,5	0,84	7,9	0,07
Періоди	Основність, ед.	Вміст дріб'язку, 5 мм, %	Опір стиску, кг/ок	Міцність в барабані, %		Продуктивність машини, т/год
				+5 мм	-0,5 мм	
Базовий	0,80	5,6	227	91,1	8,0	258,6
Дослідний I	0,74	5,2	213	87,9	10,5	281,6
Дослідний II	0,78	5,1	210	89,6	9,30	279,4
Дослідний III	0,80	5,3	217	88,6	10,1	272,0

При цьому годинна продуктивність обпалювальної машини зросла з 258,6 т/год до 281 т/год. Питома витрата природного газу знизилась з 16,8 м<sup>3</sup>/т окатишів до 12,3...13,1 м<sup>3</sup>/т, а з 32,3...37,1 кВт·год/т до 29,3...33,8 кВт·год/т окатишів. Міцність обпалених окатишів і вміст дріб'язку в готовій продукції не змінилась. Слід зазначити підвищення вмісту монооксиду заліза з 1,4% до 3,67...4,11%.

Технологія виробництва частково металізованої сировини для доменної плавки

Проблема виробництва високоякісної сировини для доменних печей все ще залишається актуальною. Його рішення в умовах заміни частини коксу на розпорошене вугільне паливо дозволить поліпшити техніко-економічні показники виплавки доменних печей. Аналіз показує, що виробництво високоякісної залізорудної сировини може бути організовано тільки зі значними змінами в його технології виробництва.

Перспективним напрямком вдосконалення ефективності виплавки доменних печей полягає у використанні частково металізованої сировини в шихті. У цих умовах створюються передумови для зниження енергетичних витрат на виплавку чавуну шляхом перенесення частини процесів відновлення від доменної печі до існуючих агрегатів з виробництва огрудкованої сировини, де джерелом тепла і відновлювального газу є дешевше тверде паливо, ніж кокс.

В даний час набули поширення способи виробництва залізорудної сировини зі ступенем металізації понад 90%. Такий продукт виробляють у спеціально розроблених агрегатах шляхом обробки сировини відновлювальними газами CO, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> при температурі до 1100°C, отриманими конверсією газу або газифікацією твердого палива [12]. Застосування такої сировини в доменній шихті дозволяє суттєво підвищити продуктивність печей +(5-6) % та знизити питому витрату коксу відповідно на (5-7) % на кожні 10% ступеня металізації. У той же час слід наголосити, що темпи

зростання продуктивності печей та зниження питомої витрати коксу зі збільшенням ступеня металізації знижуються. Так, зі збільшенням ступеня металізації до 30-40% темп зміни продуктивності та питомої витрати коксу змінюються повільно, а вище цього ступеня – різко падає [16]. Обмеження ступеня металізації доменного сировини до 30-40 % дає можливість його отримання за умов діючих фабрик окускування з використанням існуючого технологічного устаткування і на більш високому температурному рівні процесу з суміщенням технологій зміцнення та відновлення у межах одного агрегату. Вищий температурний рівень процесу металізації дозволяє забезпечити ущільнення гранул шихти за рахунок появи рідких фаз, що у свою чергу виключає значне окиснення свіжовідновленого заліза. У НМетАУ розроблено технологію отримання металізованих окатишів на конвеєрних машинах, що дозволяє у вакуумнодуфттьовому режимі спікання та комплексному використанні енергії твердого палива отримувати продукт із заданим ступенем металізації та високим вмістом закису заліза. Перехід на агломерацію із нижнім дуттям дозволяє забезпечити процес металізації необхідною кількістю теплоти та відновлювальних газів, що утворюються при спалюванні твердого палива у замкнутому просторі нижній частині шару спікаємої шихти. Пропонований спосіб спалювання твердого палива в замкнутому просторі дозволяє забезпечити при температурі в цій зоні 1300...1350 °C умови для утворення шлакової зв'язки, яка блокує гранули шихти і дозволяє проводити охолодження повітрям без застосування додаткових заходів для захисту від окислення свіжовідновленого заліза. Важливим для здійснення пропонованої технології є застосування як шихти котунів крупністю 9,5...12,5 мм, що виключає за умов роботи з нижнім дуванням перехід шихти у зважений стан із порушенням технології процесу. Послідовність формування шару шихти для отримання частково металізованої си-

ровини з підвищеним вмістом кисню заліза включає укладання на ліжку шару регенерації з твердого палива в кількості, що забезпечує необхідний тепловий рівень нижньої та верхньої частин спекаемого шару в режимі дуття. Підготовка сирих котунів включає введення до їх складу 12% палива крупністю <math><0,1\text{ мм}</math>. Крім того, для створення необхідного теплового рівня процесу у межгранульній простір вводиться тверде паливо крупністю до 10 мм, тривалість горіння якого забезпе-

чує процес зміцнення та відновлення на необхідному рівні. Методика досліджень Оцінку технологічних можливостей отримання частково металізованої сировини в шарі при використанні дутьового режиму проводили на лабораторній установці НМетАУ. Як вихідну сировину використовували залізорудний концентрат ПГЗК, що містить  $\text{Fe}_{\text{зар.}}$  - 64,85%,  $\text{CaO}$  - 0,06%,  $\text{SiO}_2$  - 8,47%. Основність котунів крупністю 9,5...12,5 мм природна.

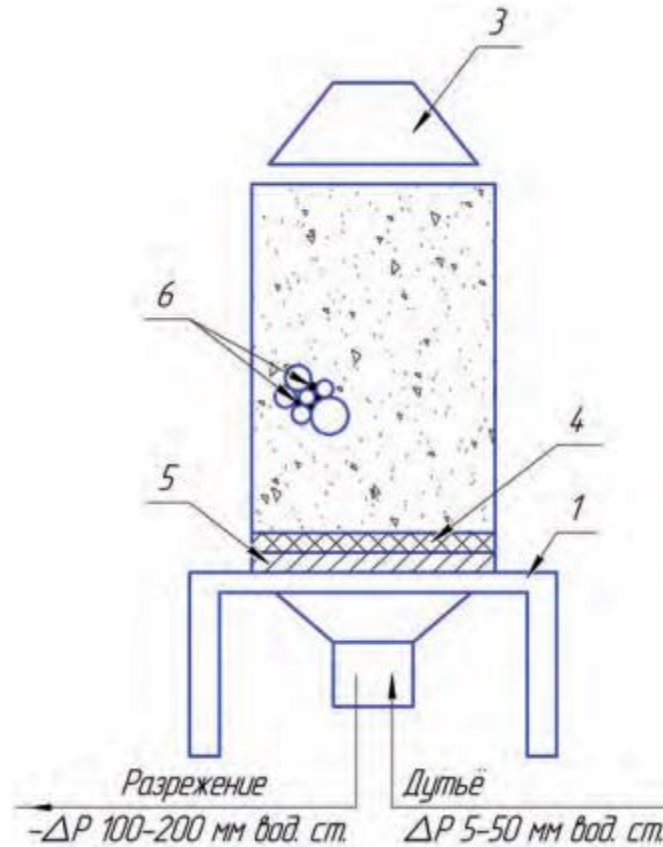


Рис.4. Схема лабораторної установки

На рис. 4 наведена схема лабораторної установки, що складається зі стелі 1, який встановлюється чаша 2 діаметром 200 мм та висотою 300 мм. Запалювання палива 4 шару регенерації покладеного на шар ліжка 5 здійснюється горном 3 режимі прососа гарячих горнових газів при розрідженні 100...200 мм вод. ст. тривалість запалення палива регенераційного шару становила 20 с. Після запалення палива регенераційного шару на нього укладається шар котунів з накатаним на них частинками твердого палива 6. Після завантаження шару шихти здійснюється перехід на режим продування повітря через шар під тиском до 50 мм вод. ст. Контроль температури в шарі здійснюється термопарами, покладеними між поверхнею шару регенерації 4 і шихти, а також над поверхнею шихти у верхній частині шару, що спікається. Перехід на режим дуття супроводжується інтенсивним видаленням вологи у вигляді пари та переміщенням зони спікання знизу вгору. Після видалення вологи шихти із зони спікання

починається виділення монооксиду вуглецю, який спалахує над верхньою частиною спекаемого шару. У міру вигорання палива інтенсивність виділення монооксиду вуглецю знижується, що може бути непрямим показником закінчення процесу.

**Результати досліджень.** Лабораторні дослідження технології отримання частково металізованої сировини показали, що наявність зони горіння палива в нижній частині спекаемого шару позитивно впливає на температурно-тепловий режим, а також сприяє утворенню відновлювальної атмосфери, необхідної для отримання частково металізованої сировини. Характерною особливістю даної технології отримання частково металізованої сировини є наявність по висоті двох зон з різними продуктами металізації: у I зоні – спіки в нижній частині шару, що спікається ( $t = 1300-1350\text{ °C}$ ); ось II зоні – окатиші у верхній частині шару ( $t = 1100-1150\text{ °C}$ ). При цьому вміст металевих заліза в котунах становить 10-12%, а в

спеках 20-30%. Ступінь металізації для спеків 30-35% і 20-25% для котунів. Питома продуктивність установки 0,4-0,8 т/м<sup>2</sup> год. Важливим є те, що пропонується технологія металізації дозволяє отримувати продукт, що містить не лише металеве залізо, але і до 40-50% закису заліза.

#### ВИСНОВКИ

Отримані результати підтверджують справедливості нової теорії, що пояснює економію природного газу при випалюванні окатишів, отриманих з шихти з додавкою твердого палива. Зниження питомої витрати природного газу пояснюється також підвищенням продуктивності обпалювальної машини. Це збільшення склало 8,66%. Відповідно знизилася питома витрата електроенергії на 10%. Відзначимо збіг теоретичних висновків, результатів лабораторних, промислових випробувань і впровадження удосконаленої технології випалу окатишів отриманих з шихти з додавкою твердого

палива. Додаткова кількість теплоти, що виділяється в результаті горіння частини твердого палива та внесене повітрям із зони охолодження і окислення обкотишів дозволило знизити загальну витрату природного газу, споживаного обпалювальною машиною з 3960...4360 м<sup>3</sup>/год до 3470...3710 м<sup>3</sup>/год. Зросла температура теплоносія в перетічному колекторі з 860...870°C до 900...930°C. У дослідних періодах знизилася кількість обпаленого звороту з 20...30 т/год до 15...20 т/год. При цьому годинна продуктивність обпалювальної машини зросла з 258,6 т/год до 281 т/год. Питома витрата природного газу знизилася з 16,8 м<sup>3</sup>/т окатишів до 12,3...13,1 м<sup>3</sup>/т, а з 32,3...37,1 кВт·год/т до 29,3...33,8 кВт·год/т окатишів. Міцність обпалених окатишів і вміст дріб'язку в готовій продукції не змінилась. Слід зазначити підвищення вмісту монооксиду заліза з 1,4% до 3,67...4,11%.

#### Перелік використаної літератури

1. Основи металургійного виробництва металів і сплавів / Д.Ф. Чернега, В.С. Богушевський, Ю.Я. Готвянський та ін. — К.: Вища школа, 2006. — 504 с.
2. Воскобойников В.Г., Кудрин В.А., Якушев А.М. Общая металлургия. — 5-е изд., перераб. и доп. — М.: Металлургия, 2002. — 768 с.
3. Оптимизация параметров работы окомкователя агломашин в промышленных условиях / С.В. Кривенко, А.А. Томаш, В.И. Левченко и др. // Металлургическая и горнорудная промышленность. — 2009. — № 9. — С. 101—105.
4. Кривенко С.В., Томаш А.А., Руських В.П. Эффективность спекания подогретой шихты с применением обогащенного кислородом воздуха // Сталь. — 2011. — № 1. — С. 2—6.
5. Исследование некоторых закономерностей процесса окомкования гематитовых концентратов / И.С. Вохлякова, С.И. Поколенко, Р.А. Полуяхтов и др. // Там же. — 2010. — № 9. — С. 30—31.
6. Производительность доменной печи при частичной или полной замене природного газа пылевидным топливом / С.А. Дубровский, А.А. Терновых, Р.А. Полуяхтов и др. // Там же. — 2011. — № 1. — С. 7—10.
7. О применении твердого топлива на обжиговых машинах / С.Н. Евстюгин, В.И. Клейн, В.В. Брагин и др. // Сталь. — 2009. — № 8. — С. 8—11.
8. Бондаренко Б.И., Шаповалов В.А., Гармаш Н.И. Теория и технология безкоксовой металлургии. — К.: Наук. думка, 2003. — 535 с.
9. Юрьев Б.П., Спиринов Н.А. Результаты исследования процессов окисления железорудных окатышей // Сталь. — 2011. — № 5. — С. 9—12.
10. Технология производства офлюсованных железорудных окатышей с вводом в шихту твердого топлива. / В.П. Мовчан, Н.Е. Пугач, О.П. Литвинов и др. // Горный журнал. — 2002. - № 6 — С. 58 — 59.
11. Мовчан В.П. Влияние добавок антрацита в шихту на запыленность газопотоков при обжиге окатышей // Разработка рудных месторождений. Научно-технический сборник. — Выпуск № 79. — Кривой Рог — 2002 — С. 72 — 76.
12. Губін Г. В., Півень В. О. Сучасні промислові способи безкоксової металургії заліза. — Кривий Ріг, 2010. — 331 с.
13. Мовчан В.П. Особенности формирования отходящих газов при агломерации. // Разработка рудных месторождений. Научно-технический сборник (к 80-летию КТУ) — Кривой Рог — 2002 — С. 145 — 148.
14. Hasanak N.A. The manufacture of basic pellets and their behavior in the blast furnace. // Iron mining Proceeding. - 1976 - № 35 — P. 144 — 153.
15. Г.Фон Струве. Новое в развитии процесса Лурги-Драво для производства железорудных окатышей // Aufbereitung Technik. — 1973 — 14. - № 12 — С. 783 — 788.
16. Иващенко В.П., Величко О.Г., Терещенко В.С., Чеченев В.А. Безкоксовая металлургия заліза. — Дніпропетровськ: РВА «Дніпро Вал», 2003. — 338 с.