

Винахід стосується способу підвищення продуктивності виробництва чавуну в доменній печі відповідно до преамбули п.1 формули.

Взагалі винахід стосується впливу на реакції між доменним газом і мінералами, присутніми в шахті доменної печі, а також стосується розподілу мінералів у зв'язі з формуванням розплавленого шлаку. Розглядаються також фактори, пов'язані із заглушенням пилу в залізорудному агломераті під час його переробки, як вантажу, і транспортування.

Котуни оксиду заліза зазвичай використовуються окремо або разом з природними кусковими рудами або окалиною, котрі в доменних печах виконують роль залізовмісних компонентів. У високотемпературній області печі, де температура перевищує приблизно 1000°C, швидко прискорюється відновлення оксиду заліза до металічного заліза. Було з'ясовано, що під час цього етапу швидкого відновлення залізорудні агломерати можуть збиратися в кластери за рахунок спікання заліза до заліза або утворення поверхневого шлаку з низькою точкою плавлення. Оскільки температури продовжують рости, то шлакоутворюючий матеріал в агломератах починає плавитися і врешті виділяється з них. Первинні шлаки за своєю природою мають тенденцію бути кислотними. Ці так звані первинні шлаки містять залишковий FeO, який потім відновлюється при контакті з відновлювальним газом або вуглецем. В контакті з вуглецем залізо науглецьовується і плавиться. Шлаки, утворені в первинному процесі, реагують з іншими грудкуватими шлакоутворюючими матеріалами в шихті, формуючи вторинні шлаки, а врешті реагують із залишковою золю коксу, формуючи кінцевий шлак, який випускають з печі. Виявилось, що цей процес плавлення - котрий охоплює формування шлаку та розплавлення і науглецьовування заліза - сильно впливає на стабільність в зоні плавлення і в подині печі, а також може впливати на газовий потік. Утримання рідких шлаків упродовж цього процесу є критичним фактором для стабільної роботи. Це особливо важливо для печей, що працюють при дуже малих об'ємах шлаку, коли підвищується основність вторинного шлаку в шарі руди, з більшим ризиком отримання величезних різниць між температурами плавлення первинного і вторинного шлаків. У деяких випадках, завдяки ендотермічному відновленню FeO і плавленню заліза, шлак може повторно затверднути, блокуючи газовий потік через шар руди і затримуючи подальше відновлення та плавлення. Покращання розподілу шлакоутворюючих матеріалів зменшує величину різниці між температурами плавлення шлаків.

При дуже високих температурах біля фурм і подини печі деякі з лугів (калій і натрій), що надходять разом із завантажуваним матеріалом, відновлюються і випаровуються, піднімаючись у шахті разом із газом. По мірі підйому лугів спочатку вони реагують з кислотними компонентами шихти, котрі, як добре відомо, захоплюють луги. Луги, не захоплені кислотними компонентами, продовжують підніматися і осаджуються у вигляді карбонатів і ціанідів. Як відомо, ці осади спричиняють зависання шихти, її затримку при спускові, а також реагують з вогнетривкою футерівкою печі. Було показано також, що присутність лугу у відновлювальному газі спричинює деградацію коксу і залізорудних агломератів, а це призводить до проблем, пов'язаних з проникністю ущільненого шару. Ступінь циркуляції лугів та поведінка коксу і залізовмісної шихти в присутності лугів є постійними джерелами турботи при роботі доменної печі.

Явище кластеризації руд, мляве утворення шлаків і протікання процесу розплавлення, а також циркуляція лугів має своїм наслідком менш ефективне контактування газу з твердими компонентами, нестабільний схід шихти і нестабільну якість гарячого металу, а це вимагає збільшення витрат палива в доменній печі і призводить до зниження її продуктивності.

Існує кілька мінералогічних факторів, що їх слід розглянути, які впливають на таку поведінку. Покращання будь-якої з наступних характеристик покращує доменний процес і може збільшити продуктивність і ефективність доменної печі.

Перш за все, кислотні матеріали, а саме, матеріали, що містять істотні кількості кремнезему або глинозему, енергійно реагують з лугами, зв'язуючи їх у формах, більш стабільних, ніж карбонати або ціаніди. Луги, які циркулюють у формі карбонатів або ціанідів, осаджуються в шахті і блокують газовий потік, призводять до утворення перемичок на стінках, до утворення кластерів в рудних шарах, і реагують з коксом або агломератами, викликаючи їх деградацію. Додавання кремнезему, наприклад, у вигляді щебеню, ефективно регулює склад кінцевого шлаку, котрий випускається, проте розміри частинок такого гравію, який зазвичай завантажуються при +6мм, забезпечують доволі малу площу поверхні для протікання реакції газ-тверде тіло. Через те, що ця поверхня насипних добавок мала, реакція з лугами не досягає максимуму.

По-друге, коли агломерати починають розплавлятися, із залізорудних агломератів спочатку випливають кислі шлаки. Ці шлаки вимагають розріджування з допомогою таких руйнуючих каркас оксидів, як CaO і MgO, котрі можуть бути додані у вигляді насипних твердих компонентів, як от: грудкуватого вапняку, конверторного шлаку, доломіту або олівину, типово у вигляді частинок, розміри яких значно перевищують 6мм. Однак, через неоднорідний розподіл розріджувальних частинок можуть виникати екстремальні композиції шлаку, які призводять до шлаків з високою в'язкістю, котрі блокують газовий потік і потенційно спричиняють кластеризацію котунів, або в найгіршому випадку, призводять до повторного затвердіння шлаку, що є причиною надзвичайно інтенсивного утворення каналів для газу і зависання шихти.

По-третє, кластеризація залізорудних агломератів, чи то через спікання заліза у твердому стані, чи через поверхневий шлак з низькою точкою плавлення, може бути зменшена шляхом застосування, в точках контакту між агломератами, шару мінералу з високою температурою

плавлення. В процесі прямого відновлення кластеризація була зменшена шляхом нанесення мінералів з високою точкою плавлення на поверхню котунів, що використовуються в цьому процесі.

Останнім розглядуваним питанням, яке не пов'язане з хімічними параметрами режиму роботи печі, є розпилення води, що типово застосовується для мінімізації пилоутворення при транспортуванні. Слід уникати вологи в котунах, оскільки вона знижує температуру газів у колошнику доменної печі, і в деяких випадках це вимагає витратити більше палива, а отже, продуктивність доменної печі знижується. В доменному процесі також важливе заглушення пилу, оскільки пил, що виходить разом з доменним газом, необхідно уловлювати і видаляти. Такі пили, котрі зазвичай називають колошниковими пилами, є, з одного боку, втратою залізовмісних компонентів, а з іншого боку, їх важко видалити або повторно використати. До того ж, зменшення пилоутворення при транспортуванні зменшує втрати залізовмісних компонентів і при виробництві чавуну в доменній печі покращує аспект охорони довкілля.

В документі US 4 350 523 показано, що залізородні котуни, при їх використанні в доменній печі, зменшують витрати коксу і палива, а також частоту зсувів і флуктуацій в доменному процесі. Згідно з цим документом здатність котунів до відновлення (так зване уповільнення відновлення) у високотемпературній зоні покращується за рахунок підвищення пористості окремих котунів і діаметра пор. Котуни виготовляються шляхом додавання до них горючого матеріалу під час процесу виробництва котунів перед їх обпалюванням.

В документі [RU 173 721] розглядаються проблеми розпушування і подрібнення котунів у верхній частині відновлювального вузла та проблеми злипання котунів під час інтенсивного утворення металічного заліза в середній і нижній частинах пічної шахти. Згідно з положеннями цього документу дані проблеми зменшуються за рахунок використання покриття сирих котунів матеріалами, що містять CaO та/або MgO , безпосередньо перед обпалюванням. Шляхом зміни основності поверхневого шару покращуються відновлювальні властивості котунів.

Хоча з допомогою різноманітних засобів ефективність і продуктивність доменних печей постійно покращувалася, процес все ще може бути кращим. А тому задачею даного винаходу є запропонувати спосіб, який покращує ефективність і стабільність використання палива, а отже, покращує продуктивність, так, щоб не змінювалася здатність обпалених котунів до відновлення або ж властивості, пов'язані із зниженням відновлення. Засобами, що забезпечують такі покращання, є зменшення кількості утворених каналів для газу, зменшення зсування та пилоутворення за рахунок кращих характеристик шлакоутворення і плавлення, зменшення ступеня кластеризації залізородних агломератів і зменшення або видозмінення циркуляції лугів у доменній печі.

Запропоновані відповідно до цього розробки і пропозиції несподівано показали підвищення ефективності і продуктивності доменних печей.

Винаходом пропонується спосіб підвищення продуктивності виробництва чавуну в доменній печі, яку завантажують залізовмісними агломератами, де спосіб полягає у створенні контакту між завантажуваним залізовмісним матеріалом і ефективною кількістю дисперсії модифікуючого шлаку матеріалу у вигляді частинок, причому створення згаданого контакту передують доменному процесу. Покриття залізовмісного матеріалу, такого як котуни, котрий негайно завантажують у доменну піч, дає багато переваг у порівнянні з нанесенням покриття на сирі котуни. Однією з переваг покриття відпалених котунів є те, що процедура покриття не змінює основних властивостей котунів, а тому, без зміни міцності котунів або їх здатності до відновлення, може бути використаним будь-який покривний матеріал. Другою перевагою від покриття відпалених котунів є те, що покривний матеріал надходить у доменну піч без зміни мінералогічного складу і зі значно більшою площею поверхні, де відбувається реакція, а тому це сприяє протіканню бажаних реакцій газ-тверде тіло.

Ефективний матеріал у вигляді частинок для модифікації шлаку може бути вибраним з групи, до складу якої входять вапновмісний матеріал, куди відносяться негашене вапно, вапняк, доломіт; магнезієвмісний матеріал, куди відносяться магнезит, олівін, серпентин і периклаз; алюмінієвмісний матеріал, куди відносяться боксит, бокситні глини, а також каолініти, каолінітні глини, муліт, корунд, бентоніт, сіліманіти, вогнетривкі глини; або кремнієвмісний матеріал, куди відносяться кварцит або будь-які кремнієві мінерали; або оксидовмісний матеріал, куди відноситься оксид барію; або інші типово використовувані матеріали, такі як ільменіт, рутит.

Покриття відпалених доменних котунів треба проводити переважно перед першою їх вантажопереробкою, такою як вантаження в порту, внаслідок чого пилоутворення стає неуразливим для оточуючого середовища. Нанесення покриття може бути здійснене зразу (після відпалювання або безпосередньо) перед завантаженням у доменну піч.

Частиною покривної суміші може бути зв'язувальна речовина, така як глина, або матеріали типу цементу, які можуть тверднути на частинках, нерухомо утримуючи покривну суміш на їх поверхні.

З метою зменшення циркуляції лугів у доменному процесі або покращання здатності шлаку плавити залізородні котуни, автори цього винаходу докладно дослідили можливість максимізації площі поверхні хімічно активних мінералів та покращання розподілу шлакоутворюючих матеріалів. Наслідком цієї максимізації стало розпилення покриття з різних мінералів на поверхню відпалених котунів. З метою досягнення кількох вигод від одного винаходу, разом із вивченням максимізації площі хімічно активної поверхні, проводилися дослідження з регулювання пилоутворення

при транспортуванні, вантажопереробці та з регулювання утворення колошникового пилю, для можливого покращання цих процесів.

Після низки досліджень було доведено, що покращання доменного процесу можна досягти шляхом нанесення дисперсії, котра містить частинки певних твердих матеріалів, про які відомо, чи як це здається, що в доменному процесі вони повинні надавати особливі характеристики залізородним котунам. Крім того, покриття дисперсією може бути оптимізоване для максимального заглушення пилю, за рахунок чого мінімізується кількість вологи в покритих котунах, яка необхідна для їх транспортування і переробки, як вантажу.

Ефективна площа поверхні пульпи на кілька порядків величини більша, ніж у випадку, коли покривний мінерал завантажуються як засипний твердотільний компонент, а тому вона набагато більш активна. Таким чином, мінерали, що реагують з лугами, які далі називатимемо активними до лугів матеріалами, можуть захоплювати максимальну кількість, лугу у більш стабільній формі, ніж карбонати або ціаніди, котрі, як відомо, відповідальні за циркуляцію лугів високо в шахті доменної печі. Видалення лугів з газу з допомогою мінералу, диспергованого на поверхні котунів, обмежує реакцію лугів з коксом, що призводить до деградації коксу або до осадження на вогнетривких матеріалах, наслідком чого є зависання шихти і ушкодження цих матеріалів.

При застосуванні покриття з мінералів на поверхні котунів, можна зробити так, щоб витікання первинних шлаків з котунів було більш однорідним в критичній поверхні реакції, де, як правило, починають виділятися кислотні первинні шлаки. Слід відмітити, що для кислотного матеріалу, який реагує з лугами, формування шлаку проходитиме краще, оскільки оксиди калію і натрію дуже сильно знижують в'язкість кислотних шлаків.

При нанесенні дисперсії, що містить маленькі тверді частинки з регульованими розмірами зерна та іншою, ніж у оксидів заліза, поверхневою поляризацією, окремі частинки, які в іншому разі перетворилися б у вивільнений пил, більш ефективно прилипають до поверхні котунів. Це міцне прилипання зменшує і пилоутворення при транспортуванні, і винесення пилю колошниковим газом доменної печі.

Нижче винахід пояснюється більш детально на основі прикладу, представленого на ілюстраціях.

Фіг.1. Опір газовому потоку (коефіцієнт опору шихти, BRI) та швидкість сходу шихти в дослідях на експериментальній доменній печі з котунами МРВО, випробуваними з покриттям олівіном, кварцитом і доломітом.

На Фіг.2 показано вміст оксиду калію в шлаку як функція оптичної основності в дослідях на експериментальній доменній печі з котунами МРВ1, випробуваними з покриттям олівіном і кварцитом.

На Фіг.3 показана залежність між температурою гарячого металу і вмістом кремнію в дослідях на експериментальній доменній печі з котунами МРВ1, випробуваними з покриттям олівіном і кварцитом.

Фіг.4. Формування шлаку, збагаченого K_2O , на поверхні покритого каолінітом котуна МРВО, який виїнято з нижньої частини шахти експериментальної доменної печі.

Даний винахід стосується способу покращання виробництва чавуну в доменній печі, яку завантажують залізовмісними агломератами, де спосіб полягає в створенні контакту між завантажуваним залізовмісним матеріалом і ефективною кількістю дисперсії модифікуючого шлаку матеріалу у вигляді частинок. Створення згаданого контакту відбувається після агломерації залізної руди і передують завантаженню в шахту доменної печі.

Завантажуваний агломерований матеріал згідно з даним винаходом може знаходитися в будь-якій формі, типовій для переробки в доменній печі. Як приклад, що не вносить обмежень, цим завантажуваним матеріалом можуть бути руди, агломеровані до стану котунів, брикетів, гранул тощо, або природні агломеровані залізооксидні руди, зазвичай відомі як кускова руда або дрібнозерниста руда.

Використаний тут термін "дисперсія" означає будь-який розподіл або суміш дрібних, подрібнених та/або порошкових твердих матеріалів у рідкому середовищі. Терміном "дисперсія" охоплюються також подібні терміни "пульпа", "суспензія" тощо.

Використаний тут термін "матеріал, що модифікує шлак" слід розуміти як будь-які матеріали, що беруть активну участь у процесі формування шлаку. Основною дією такого матеріалу може бути захоплення лугу доменним газом. Використаний тут термін "активний до лугів матеріал" слід розуміти як будь-який матеріал, що може сприяти процесу формування шлаку шляхом покращання розподілу або складу доданих шлакоутворюючих матеріалів. Далі, використаний тут термін "ефективно розріджувальний матеріал" означає будь-який матеріал, основна дія якого полягає в тому, аби зменшувати кластеризацію завантажуваного залізовмісного матеріалу після відновлення, шляхом перешкоджання спіканню у твердій фазі або утворенню поверхневого шлаку з низькою точкою плавлення. Ці матеріали відомі також як матеріали, що "ефективно зменшують кластеризацію".

В одному з варіантів здійснення винаходу залізовмісні агломерати мають форму котунів, до складу яких входить зв'язувальна речовина або інші добавки, що використовуються при формуванні залізородних котунів. Типові зв'язуючі і добавки, а також метод їх застосування добре відомі. Як приклади, що не вносять обмежень, цими зв'язувальними речовинами і добавками можуть бути глини, такі як бентоніт, сіль лужного металу карбоксиметилцелюлози (СМС), хлорид

натрію і гліколят натрію та інші полісахариди або синтетичні водорозчинні полімери.

Термін "дисперсія" згідно з даним винаходом може додатково охоплювати систему стабілізації, яка сприяє підтримувannya стабільної дисперсії і підсилює адгезію матеріалу у вигляді частинок до здатних відновлюватися залізовмісних агломератів та/або уможлиблює більший вміст твердих тіл в дисперсії. У цьому відношенні може бути використана будь-яка відома стабілізуюча система за умови, що вона сприяє стабілізації дисперсії. Прикладами таких стабілізаторів є органічні диспергатори, як от: поліакрилати, похідні поліакрилатів та подібні речовини, а також неорганічні диспергатори, куди входять каустична сода, зола, фосфати та подібні речовини. До стабілізаторів, яким віддається перевага, відносяться і органічні, і неорганічні стабілізатори, куди входять ксантанові смоли або їх похідні, похідні целюлози, такі як гідроксиетилцелюлоза, карбоксиметилцелюлоза і синтетичні модифікатори в'язкості, наприклад, поліакриламід і подібні речовини.

Використаний тут термін "матеріал у вигляді частинок" є подрібненим порошкоподібним матеріалом, здатним формувати дисперсію в рідкому середовищі, наприклад, у воді.

В дисперсії згідно з даним винаходом можуть бути застосовані будь-які розріджувальні речовини або добавки, котрі звичайно використовуються при виробництві чавуну і сталі. Перевага віддається вапновмісним або магнієвмісним матеріалам, і низкою прикладів, що не вносять обмеження, є негашане вапно, магнезит, доломіт, олівін, серпентин, вапняк, ільменіт.

В дисперсії згідно з даним винаходом можуть бути застосовані будь-які активні до лугів матеріали. Типовими прикладами, що не вносять обмеження, є кварцит, боксит або бокситні глини, каолініт або каолінітні глини, муліт.

Розмір частинок в дисперсії визначається типом матеріалу у формі частинок та його здатністю утворювати дисперсію в такому середовищі, як вода. Середній розмір частинок матеріалу, як правило, буде в інтервалі від 0,5мкм до порядку 500мкм.

При здійсненні запропонованого способу можуть бути застосовані численні методи створення контакту між завантажуваними залізовмісними агломератами і матеріалом у формі частинок. Методи, які переважно застосовувалися, полягають у формуванні дисперсії, котра контактує з агломерованим матеріалом.

Вплив винаходу на доменний процес було перевірено в низці експериментів, проведених як в лабораторії, так і в масштабі дослідів. Випробувані два види залізородних котунів з різними покриттями: котуни МРВО (стандартні олівінові котуни фірми LKAB) та котуни МРВ1 (експериментальні котуни фірми LKAB). Покращання заглушення пилу під час транспортування і переробки вантажів перевірялося в повномасштабних випробуваннях на покритих котунах МРВО.

В першій серії дослідів оцінювалися стандартні котуни МРВО. Хімічний аналіз цих котунів показано в Таблиці 1. МРВО-2 і МРВО-3 є котунами подібних видів, обидва з яких є олівіновими котунами з додаванням олівину і незначної кількості вапняку, а до котунів МРВО-3 додана також невелика кількість кварциту.

Для експериментів з покриттям як базовий використано котун МРВО-3, в той же час в експериментальній доменній печі обидва непокриті котуни МРВО-2 і МРВО-3 були використані як еталонні матеріали. Котуни покривалися різними видами покривних матеріалів, з яких у цих експериментах були використані три види: олівін, кварцит і доломіт. Кожен з них змішували з 9% бентоніту, як зв'язуючої фази. Хімічний аналіз покривних матеріалів також показаний в Таблиці 1, а розподіл покривних матеріалів за розмірами показано в Таблиці 2, у вигляді часток розподілу цих матеріалів по різних інтервалах розмірів. Всі використані матеріали дуже подібні за розмірами, їх більша частина <45мкм (65-70%) і лише невелика кількість >0,125мм (1-6%).

Під час процедури покриття котуни виймалися з бункера на стрічку конвейера. В точці перенесення на другу конвеєрну стрічку на потік котунів через два сопла розпилялася попередньо змішана покривна пульпа. Покривна пульпа являє собою покривну речовину, змішану з бентонітом, як описано вище, а вода додана як носій при вмістові твердої фази в 25%. Потіки покривної пульпи і котунів регулювалися, аби на одну тонну котунів наносити тверді покривні матеріали в кількості 4кг.

В таблиці 3 подано хімічний аналіз базових котунів і покритих котунів, і наведено також хімічний аналіз котунів, узятих, як зразок, біля доменної печі. Виявилося, що покривні матеріали залишалися на поверхнях котунів після зберігання, транспортування, їх переробки як вантажу і просіювання (перед завантаженням домни розміри нижче <6мм відсіяні).

Для дослідження поведінки покритих котунів, в лабораторних умовах були проведені досліді по розкисленню під навантаженням, які зазвичай застосовуються до доменних котунів, тест згідно з ISO 7992. Тест ISO 7992 був доповнений випробуванням на удар, з метою вимірювання прилипання після розкислення.

В тесті ISO 7992 1200г котунів відновлюються ізотермічно при 1050°C до ступеня відновлення 80%, при навантаженні на пробний пласт під час відновлення 500г/см², в атмосфері 2% Н₂, 40% СО і 58% Н₂. З точки зору моделювання умов у шахті доменної печі тест ISO 7992 з додатковим випробуванням на удар є придатним випробуванням на прилипання для доменних котунів. Випробувальна температура 1050°C є зручною, оскільки вона приблизно дорівнює температурі в нижньому кінці резервної зони, де котуни починають піддаватися дії більш сильного відновлюваного газу, і відновлення до металічного заліза починає прискорюватися. Може утворитися також невелика кількість розплавленого шлаку. Далі зразок охолоджують в азоті, і

кластеризована частина зразка випробовується на удар з висоти 1м, до 20 падінь. Результатом цих випробовувань є значення коефіцієнта прилипання, яке описує тенденцію до прилипання, SI, від 0 (перед початком випробовувань на удар агломеровані частинки відсутні) до 100 (всі частинки агломеровані навіть після 20 падінь). Результати цих випробувань показані в Таблиці 4. Без сумніву, доломіт і олівін мають вплив на вимірювання прилипання. Однак в лабораторних дослідках на прилипання кварцит не має помітного впливу. Слід відмітити, що мінералогічний склад покривного матеріалу може різко мінятися, завдяки реакціям всередині доменної печі, а коефіцієнт прилипання показує перш за все, що вплив здійснюється на поверхні, і на поверхні залишається матеріал. Отримані в лабораторії результати з розкислення та випробування на удар не обов'язково повинні корелювати або пояснювати ефекти, які відбуваються при роботі доменної печі.

В Таблиці 5 показані результати механічних випробовувань та металургійних тестів. Більшість параметрів, котрі пов'язані з якістю котунів, побічно зазнають, або зовсім не зазнають, впливу від застосування покриття. Отримано зменшення границі міцності при стисненні в холодному стані (CCS), від 13 до 29 daN/котун або від 6 до 12%, і зменшення ступеня низькотемпературного подрібнення (LTD), до 18 відсотків для фракції >6,3мм. Обидві ці зміни в дійсності були викликані добре відомими ефектами додавання води до залізрудних котунів, а не спричинені покривними матеріалами.

В першій серії дослідного варіанту випробовувань описані вище покриті котуни MPBO завантажували до висоти 1,2 діаметра подини в експериментальну домну фірми LKAB.

Дослід було поділено на п'ять різних робочих періодів:

MPBO-2	Еталонний період, де використані котуни без покриття
MPBO-O	Котуни MPBO-3, покриті олівіном
MPBO-D	Котуни MPBO-3, покриті доломітом
MPBO-Q	Котуни MPBO-3, покриті кварцитом
MPBO-3	Еталонний період, де використані котуни без покриття

Досліди з котунами обох видів MPBO-2 і MPBO-3 були проведені на фірмах SSAB Tunnplät (Luleå) і SSAB Oxelösund у Швеції та на фірмі Fundia Koverhar у Фінляндії, і суттєвої різниці в роботі доменних печей не виявилося.

В Таблиці 6 подано вміст вологи в котунах та кількість кускових шлакоутворюючих матеріалів, завантажених у доменну піч для кожного дослідного періоду. Котуни MPBO-2 були сухими (вологість менше 0,1%), а вміст вологи в котунах MPBO-3 складав 2,2%. Кількість вологи, доданої до котунів під час процедури покриття, відповідала порядку 1,5%, а виділення вторинних фаз призводило до підвищення вологості котунів ще на 0,6-0,8%.

Кількість вапняку, завантаженого в шихту, в усіх періодах підтримувалася майже на постійному рівні. Щоб підтримувати намічене значення основності шлаку і об'єм, підбиралася кількість добавки основного киснево-конверторного шлаку і добавки кускового кварциту, для компенсації різного хімічного складу при використанні різноманітних покривних матеріалів.

Основна мета цього дослідження полягала скоріше в тому, щоб підтримати стабільну роботу і вплинути на генерацію колошникового пилу, а не мінімізувати витрати палива та підняти до максимуму продуктивність печі. Умови в доменній печі показані в Таблиці 7. Первинними індикаторами стабільності процесу є стабільність сходу шихти і стабільність коефіцієнту опору шихти (BRI), розрахованого згідно з рівнянням 1.

$$\text{Рівняння 1: BRI} = \frac{[\text{тиск дуття}]^2 - [\text{тиск у колошнику}]^2}{(\text{об'єм газу в заплечиках})^{1,7} \times \text{constant}}$$

В першій серії дослідів швидкість сходу виявилася виразно кращою лише у випадку котунів MPBO, покритих олівіном, а опір потокові газу був явно стабільним, коли використовувалися котуни, покриті кварцитом, Фіг.1. Покращання швидкості сходу у випадку покриття олівіном може бути віднесене на рахунок зменшення ефекту кластеризації. Опір газовому потоку пов'язаний у першу чергу з процесом розплавлення котунів. Через флуктуації в системі інжекції вугілля, використовувати її для порівняння не переконаливо. Однак у випадку котунів MPBO, покритих кварцитом, стабільність особливо добра, і навіть під час повернення у вихідний стан від різкого охолодження подини в періоді з MPBO, покритими доломітом, опір газовому потоку залишався стабільним. Загальний висновок був таким, що робота з покритими котунами більш стабільна, ніж з еталонними непокритими котунами.

Об'єм пилу, винесеного колошниковим газом і зібраного як колошниковий пил, помітно зменшувалася для покритих котунів у порівнянні з непокритими. В Таблиці 8 показана кількість зібраного пилу і його склад. Усереднений розподіл за розмірами зібраного колошникового пилу наведено в Таблиці 2. Можна бачити, що в цьому досліді колошниковий пил був помітно грубшим, ніж матеріали, які використані для покриття. Менші частинки колошникового пилу проходять через циклон пилоуловлювача і збираються наступним вологим електрофільтром у вигляді шламу. В Таблиці 9 наведено склад доменного шламу, отриманого в різні робочі періоди.

Під час дослідів з покритими котунами, показаними в Таблиці 7, спостерігалася значне зменшення кількості доменного колошникового пилу, зібраного сухим циклоном пилоуловлювача. Для всіх трьох робочих періодів з покритими котунами, у порівнянні з непокритими котунами,

об'єми колошникового газу були помітно меншими. Баланси мас, розраховані на основі хімічного аналізу колошникового газу з Таблиці 7, показують, що кількість матеріалу котунів, який у вигляді колошникового пилу покидає піч, зменшилася приблизно на дві третини. Ці спостереження додатково підтверджені тим фактом, що у вогкій частині колошникового пилу, тобто в шлам, вміст заліза при використанні покритих котунів також зменшився, що можна бачити в Таблиці 8.

Слід також відмітити, що кількість дрібних частинок, сформованих за рахунок дрібних частинок коксу, а також завантаженими кусковими шлакоутворюючими матеріалами, для всіх робочих періодів при покритих котунах та при вогких котунах МРВО-3 була нижчою, ніж для періоду із сухим котуном МРВО-2. Причиною цього, як вважається, є ефект адгезії пилу до поверхні вогких або покритих котунів.

Очікувалося, що використання кислотних покривних матеріалів (чи то кварциту, чи то, у гіршому випадку, олівину) повинно забезпечити краще видалення лугу шлаком під час роботи доменної печі. Це очікування базувалося на дуже великій площі поверхні покривного матеріалу, доступного для реакції. Однак, під час першої серії дослідів з котунами МРВО цей очікуваний ефект не перевірявся. На основі зразків, взятих зондом з експериментальної домни, було вже відомо, що котун МРВО має відносно гарну здатність захоплювати луг, і впливати на віддачу лугу може лише склад кінцевого доменного шлаку. Однак, очікувалося, що внутрішня циркуляція лугів буде змінюватися кварцитовим покриттям за рахунок утворення силікатних шлаків з високим вмістом лугів на поверхні котунів, і це знаходить свій відбиток у кращій стабільності опору до газового потоку.

У другій серії дослідів оцінювався режим роботи експериментальної доменної печі з покритими експериментальними котунами, названими МРВ1, склад яких наведено в Таблиці 10. Детально вивчалася віддача лугів. Вважалося, що поглинання лугів цим видом котунів слабше, ніж котунами МРВО, завдяки мінералогічному складу шлаку, утвореного в котунах під час їх відпалювання. Котуни МРВО містять деяку кількість олівину, що не прореагував, та піроксенові фази, які реагують з лугами. В котунах МРВ1 шлакоформуючим матеріалом здебільшого є аморфний шлак, який, як виявилось, не реагує з лугом.

Котуни МРВ1 покривалися з використанням дисперсії на основі води, котрою наносилося 3,6кг кварциту і 0,4кг бентоніту; та 3,6кг олівину плюс 0,4кг бентоніту на тонну котунів, відповідно. Як еталон, котуни МРВ1 покривалися водою без будь-яких частинок. Процедура покриття була по суті такою ж самою, як і для описаних раніше дослідів з МРВО. Тут знову метою роботи була скоріше стабільність, ніж витрати палива і оптимізація продуктивності.

На Фіг.2 показана віддача лугів через шлак, де чітко видно краще видалення лугів шлаком при котунах МРВ1, покритих олівиним або кварцитом, порівняно з еталонними котунами МРВ1. В робочому періоді з котунами МРВ1, покритими кварцитом, піч була теплішою, що призвело до іншого розподілу основності шлаку. Незважаючи на це, для заданої оптичної основності шлаків обидва види покриттів виявили кращий відбір лугів. Схід шихти при використанні покритих котунів також був більш плавним, як це видно з Таблиці 11. Коефіцієнт опору шихти залишився незмінним, з відхиленням у вигляді невеликого росту для котунів, покритих кварцитом, але це має пояснюватися у поєднанні з доволі високим вмістом кремнію в гарячому металі, що викликано подаванням надлишку палива в піч. При незначному обмеженні швидкості подавання палива під час робочого періоду з котунами, покритими олівиним, опір газовому потоку зменшувався і був більш стабільним, ніж в еталонному періоді.

Крім того, використання покритих котунів типу МРВ1 покращило залежність температури гарячого металу від вмісту кремнію в гарячому металі. На Фіг.3 наведені ці залежності для котунів МРВ1, покритих кварцитом та олівиним. Робота з меншим вмістом кремнію, який підтримує температуру гарячого металу, має переваги в доменному процесі, оскільки це дозволяє зменшити витрати коксу, а отже, підвищити продуктивність, а також мінімізувати втрати заліза в конверторний шлак, і тим самим підвищити загальний вихід чавуну в процесі виробництва сталі. І відновлення при кластеризації, і циркуляція лугів є факторами, які впливають на залежність температури від вмісту кремнію в гарячому металі. Менший розкид даних для вмісту кремнію і для температури у випадку покритих котунів МРВ1 вказує на наявність більш стабільних зони плавлення і контакту газ-тверде тіло в нижній частині печі. Різка «пастеризація може призвести до того, що нерозплавлений кластеризований матеріал буде сходити на подину, зменшуючи температуру розплавленого чавуну. По-друге, циркуляція лугів діє як тепловий насос, за рахунок розкислення у високотемпературній зоні та окислення і твердіння при нижчих температурах у шахті, внаслідок чого наявне тепло переноситься до металу у високотемпературній зоні. Крім того, осаджування лугів у шахті викликає утворення пилу, наприклад, карбонатів, які легко піддаються повторній циркуляції і можуть осісти високо в шахті, а також, як відомо, спричинити зависання шихти і її затримку при спускові.

В третій серії дослідів котуни МРВО покривалися з використанням такої ж самої дисперсійної системи, котра наносила 3,6кг каолініту і 0,4кг бентоніту на тонну котунів. У Таблиці 12 наведено склад еталонних котунів МРВО, оброблених розпиленою водою в тій же кількості, що і покриті котуни, та склад покритих котунів. В шихту промислової доменної печі було додано 20% інших котунів, які використовувалися разом з 80% котунів МРВО.

Структура шихти підтримувалась незмінною при 80% котунів МРВО (покритих або непокритих) і 20% інших котунів.

З метою оптимізації витрат палива в дослідних періодах з котунами МРВО, покритими каолінітом, і з еталонними котунами МРВО швидкість подавання палива під час цих періодів різко зменшувалась. Піч працювала з інжекцією нафти, що дає більш стабільні і надійні робочі показники, ніж при впорскуванні вугілля. При швидкостях, використаних у цих дослідях, швидкість впорскування вугілля і характеристики горіння не такі стабільні, як системи впорскування нафти або горіння нафти.

Ключові результати роботи експериментальної домни показані в Таблиці 13. Котуни, покриті каолінітом, дали: більш плавний схід шихти, на рівні нижнього стандартного відхилення швидкості сходу, і при повній відсутності зсування; нижчі витрати палива - на 4кг/г гарячого металу; підвищення продуктивності; і дуже істотне зменшення об'єму колошникового пилу. Ці результати підтверджують результати раніше проведених дослідів і вказують на зменшення витрат палива, збільшення продуктивності і кращу стабільність роботи печі.

Дослідження зразків, взятих з нижньої зони пічної шахти з допомогою занурюваних у шихту зондів, вказують на наявність значної реакції між каолінітовим покриттям і калієм, як і передбачалося. На Фіг.4 показано приклад утворення алюмосилікату калію з каолінітового покриття. З допомогою дифракції рентгенівських променів було визначено, що важливим продуктом реакції каолінітового покриття з доменним газом є кальциліт.

При транспортуванні і вантажній переробці залізородних котунів проблемою для оточуючого середовища є пил. Були проведені повномасштабні транспортні випробовування котунів типу МРВО, покритих 4кг каолініту на тонну котунів розпиленням водної дисперсії, яка містить приблизно 25% твердих частинок і не містить бентоніту або іншої зв'язувальної речовини. Виявилося, що в цьому випадку під час вантажної переробки і транспортування при завантаженні, розвантаженні і перенесенні на конвейєрі, заглишення пилу було значно кращим, ніж при розпиленні однієї води.

Ефективність вибраних покривних матеріалів повинна розглядатися нерозривно від мінералогічного складу котунів, котрі підлягають покриттю. Покриття, ефективне для котунів одного виду, може виявитися неефективним для іншого виду котунів. При виборі покриття важливими є умови в печі, особливо, що стосується чутливості її роботи до циркуляції лугів. Для вибору оптимального покриття для конкретного виду котунів необхідно розуміти хімічні реакції між газом і мінералами та фактори, вирішальні для процесу формування шлаку.

Таблиця 1. Хімічний аналіз оксидних котунів і покривних матеріалів (вагові %).

Матеріал	МРВО-2	МРВО-3	Олівін	Кварцит	Доломіт	Бентоніт
Fe(%)	66,6	66,6	5,0	0,3	1,0	3,8
SiO ₂ (%)	1,78	2,00	42,20	98,00	2,00	56,30
CaO (%)	0,32	0,22	0,80	0,02	29,50	2,83
MgO (%)	1,48	1,42	49,50	0,09	21,00	3,73
Al ₂ O ₃ (%)	0,2	0,29	0,44	1,00	0,37	18,60
TiO ₂ (%)	0,39	0,37	0,03	0,03	0,00	0,83
MnO (%)	0,06	0,05	0,00	0,01	0,10	0,06
K ₂ O (%)	0,02	0,02	0,02	0,29	0,09	0,57
V ₂ O ₅ (%)	0,26	0,25	0,02	0,01	0,00	0,05
P ₂ O ₅ (%)	0,017	0,017	0,030	0,011	0,050	0,160

Таблиця 2. Розподіл за розмірами матеріалів, використаних як покривні матеріали, та колошникового пилу з експериментальної доменної печі.

Інтервали розмірів (мм)	< 0,045	0,045 – 0,063	0,063 – 0,075	0,075 – 0,125	0,125 – 0,250	0,250 – 0,500	0,500 – 1	> 1
Олівін (%)	68	11	5	13	2	1	0	0
Доломіт (%)	67	13	7	11	1	1	0	0
Кварцит (%)	70	9	4	10	6	1	0	0
Бентоніт (%)	65	21	10	3	1	0	0	0
Колошниковий пил (%)	9	11	8	24	35	12	1	0

Таблиця 3. Склад котунів перед нанесенням покриття та після нього (вагові %). Наведені результати: а) хімічного аналізу перед покриттям, б) очікуваного аналізу після покриття (дані розрахунку), с) хімічний аналіз котунів після покриття, та д) хімічний аналіз зразків, взятих біля доменної печі, тобто після зберігання (надворі від 4 до 6 тижнів), транспортування, переробки як вантажу і відсівання великих розмірів (+ 6 мм).

Матеріал	Зразок	Покриття	SiO ₂ (%)	MgO (%)	CaO (%)	Fe (%)
МРВО-3	а) Основний матеріал	Відсутнє	2,00	1,42	0,22	66,60
МРВО-О	б) Теоретичні значення	Олівін	2,16	1,60	0,22	66,33
МРВО-О	с) На фабриці котунів	Олівін	2,16	1,65	0,26	66,39
МРВО-О	д) Біля домни	Олівін	2,15	1,64	0,20	66,44
МРВО-К	б) Теоретичні значення	Кварцит	2,37	1,42	0,22	66,33
МРВО-К	с) На фабриці котунів	Кварцит	2,42	1,40	0,20	66,24
МРВО-К	д) Біля домни	Кварцит	2,50	1,44	0,19	66,24
МРВО-Д	б) Теоретичні значення	Доломіт	2,01	1,50	0,31	66,33
МРВО-Д	с) На фабриці котунів	Доломіт	2,01	1,50	0,38	66,49
МРВО-Д	д) Біля домни	Доломіт	1,98	1,50	0,29	66,55

Таблиця 4. Коефіцієнт прилипання непокритих і покритих котунів після тестів згідно з ISO 7992 на відновлення під навантаженням і випробовування на удар (середні значення двох тестів).

Вимірювана властивість	МРВО-3	МРВО-О	МРВО-Д	МРВО-К
Коефіцієнт прилипання, SI	95	47	35	95
Тривалість відновлення (хв.)	73	75	75	83

Таблиця 5. Результати механічних випробувань і металургійних тестів оксидних котунів і покритих котунів.

	Стандарт ISO	MPBO-3	MPBO-O	MPBO-D	MPBO-Q
Границя міцності при стисненні в холодному стані (daN/котун)	ISO 4700	232	202	215	219
Міцність при обертанні в барабані (% +6,3 мм)	Удосконалений ISO 3271 ¹⁾	95,0	95,2	95,0	94,6
Абразивний знос (% -0,5 мм)		4,5	4,4	4,4	4,8
Низькотемпературна дезінтеграція (% +6,3 мм)	ISO 13930	67,7	49,6	67,3	56,6
(% -0,5 мм)		9,5	12,2	11,5	11,0
Відновлюваність, R40 (%O/хв.)	ISO 4695	0,52	0,53	0,56	0,54
ІТН (% +6,3 мм) ²⁾		71,8	74,8	68,4	74,1
Перепад тиску, Dp (мм рт. ст.)	ISO 7992	12,9	9,7	12,2	11,2
Зсідання шару (%)		6,0	3,6	6,2	6,3

¹⁾ Зразок вагою 3 кг (це менше, ніж за ISO 3271, де випробовуються зразки вагою 15 кг).

²⁾ Міцність після відновлення (відновлений матеріал згідно з ISO 4695 механічно оброблявся і просіювався).

Таблиця 6. Вміст вологи в котунах і кількість шлакоформуючих матеріалів, завантажених під час дослідів на експериментальній домі.

Робочий період	MPBO-2	MPBO-O	MPBO-D	MPBO-Q	MPBO-3
Вологість котуна (%)	0,1	2,1	2,2	2,3	2,2
Валік (кг/т гаряч. металу)	48	48	49	49	49
Конверторний шлак (кг/т гаряч. металу)	45	41	42	48	48
Кварцит (кг/т гаряч. металу)	17	15	17	11	17
Витрати коксу (кг/т гаряч. металу)	408	410	414	421	430

Таблиця 7. Робочі параметри доменної печі під час дослідів.

Робочий період	MPBO-2	MPBO-O	MPBO-D	MPBO-Q	MPBO-3
Тривалість (год)	85	83	48	68	27
Температура газу в печі (°C)	1198	1197	1198	1197	1197
Кількість подаваного дуття (нормальний м³/год)	1590	1589	1591	1590	1570
Індекс вугілля, PCI (кг/т гаряч. металу)	133	131	123	127	122
Збагачення дуття киснем (%)	3,3	3,4	3,5	3,4	3,4
Вологість дуття (нормальний м³)	26	26	27	27	27
Температура полуїла (розрахунок, °C)	2188	2195	2201	2201	2204
Тиск в колошнику (бар, манометр)	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0

Таблиця 8. Кількість колошникового пилю, його склад (вагові %) та оцінка джерела походження.

Робочий період	MPBO-2	MPBO-O	MPBO-D	MPBO-Q	MPBO-3
Колошниковий пил, сухий (кг/т гаряч. металу)	5,4	2,9	2,7	3,0	4,4
Fe (%)	21,6	13,8	дані відсутні	13,3	21,8
SiO ₂ (%)	11,1	15,9	дані відсутні	20,8	17,7
CaO (%)	16,2	14,1	дані відсутні	12,1	14,2
MgO (%)	4,3	9,2	дані відсутні	6,3	6,8
Al ₂ O ₃ (%)	3,0	4,2	дані відсутні	4,0	4,0
MnO (%)	0,3	0,4	дані відсутні	0,4	0,3
K ₂ O (%)	0,3	0,5	дані відсутні	0,4	0,6
C (%)	20,4	26,0	дані відсутні	31,2	16,5
З котуна (кг/т гаряч. металу)	1,5	0,5	дані відсутні	0,5	1,3
З коксу (кг/т гаряч. металу)	1,4	0,9	дані відсутні	1,1	0,9
З валіку (кг/т гаряч. металу)	1,0	0,5	дані відсутні	0,4	0,8
З конверторного шлаку (кг/т гаряч. металу)	1,0	0,5	дані відсутні	0,5	0,7
З кварциту (кг/т гаряч. металу)	0,5	0,3	дані відсутні	0,3	0,7
З осланеного покриття (кг/т гаряч. металу)	-	0,2	-	-	-
З кварцитового покриття (кг/т гаряч. металу)	-	-	-	0,2	-

Таблиця 9. Хімічний аналіз (вагові %) шлаку, зібраного вологим електрофільтром, в дослідях на експериментальній домі.

Робочий період	MPBO-2	MPBO-O	MPBO-D	MPBO-Q	MPBO-3
Fe (%)	6,2	2,4	1,6	1,1	дані відсутні
SiO ₂ (%)	19,2	20,2	22,6	18,2	дані відсутні
CaO (%)	8,8	7,3	8,0	7,4	дані відсутні
MgO (%)	8,7	10,3	14,7	10,7	дані відсутні
Al ₂ O ₃ (%)	6,1	6,6	8,4	8,3	дані відсутні
MnO (%)	0,6	0,5	0,7	0,5	дані відсутні
K ₂ O (%)	1,2	1,1	1,0	0,7	дані відсутні
Na ₂ O (%)	10,4	9,2	6,5	7,7	дані відсутні
V ₂ O ₅ (%)	0,2	0,2	0,2	0,1	дані відсутні
P ₂ O ₅ (%)	0,1	0,2	0,2	0,1	дані відсутні
C (%)	16,0	17,0	11,8	12,3	дані відсутні
S (%)	0,3	0,2	0,1	0,2	дані відсутні

Таблиця 10. Склад і металургійні властивості котунів МРВ1 і покритих котунів МРВ1, випробуваних в експериментальній домні.

	Котуни МРВ1	Котуни МРВ1 з покриттям кварцитом	Котуни МРВ1 з покриттям олівіном
Fe (ваг. %)	66,8	66,6	66,3
CaO (ваг. %)	1,45	1,53	1,53
MgO (ваг. %)	0,31	0,35	0,49
SiO ₂ (ваг. %)	1,44	2,02	1,70
Al ₂ O ₃ (ваг. %)	0,35	0,37	0,38
Вологість (ваг. %)	0,7	1,0	1,2
Границя міцності при стисненні в холодному стані згідно з ISO 4700 (daN/котун)	291	277	279
Низькотемпературна дезінтеграція згідно з ISO 13930 (% +6,3 мм)	78	82	75
Низькотемпературна дезінтеграція згідно з ISO 13930 (% -0,5 мм)	12	10	15
Відновлюваність, R40, згідно з ISO 4695 (%O/хв.)	1,2	1,2	1,2
ІТН ¹⁾ (% +6,3 мм)	78	83	83

¹⁾ Міцність після відновлення (матеріал, відновлений згідно з ISO 4695, механічно оброблявся і просіювався).

Таблиця 11. Підсумкові результати роботи експериментальної домни, котуни МРВ1 у порівнянні з покритими котунами МРВ1.

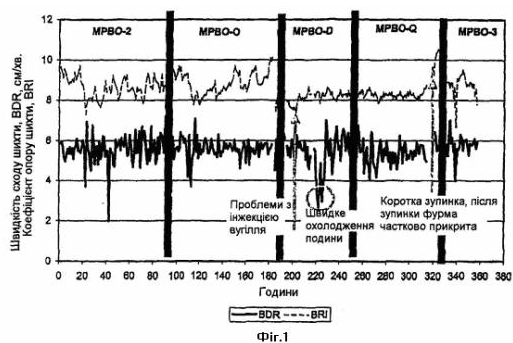
	МРВ1	МРВ1 з покриттям кварцитом	МРВ1 з покриттям олівіном
Тривалість досліду (год.)	42	67	76
Ета СО (%)	47,4	46,9	47,5
Стандартна швидкість сходу шихти (см/хв.)	0,52	0,35	0,48
Продуктивність (т/год.)	1,56	1,54	1,57
Витрати коксу	400	400	396
(кг/т гаряч. металу)			
Витрати вугілля	123	127	124
(кг/т гаряч. металу)			
Середня температура гарячого металу (°C)	1433	1445	1450
Середній вміст Si в гарячому металі (%)	1,62	1,71	1,53

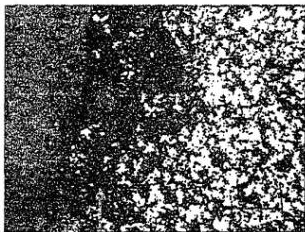
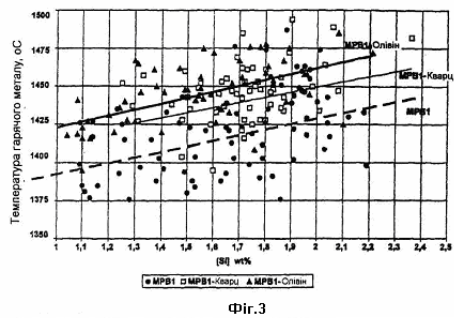
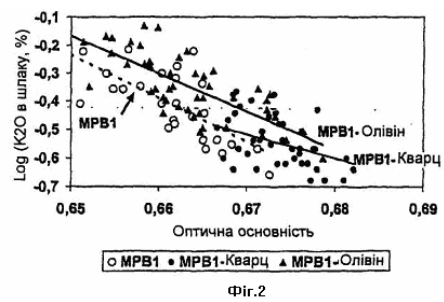
Таблиця 12. Склад котунів МРВО і котунів МРВО, покритих каолінітом, які випробувані в експериментальній домні.

Вагові %	Котуни МРВО	Котуни МРВО з покриттям каолінітом
Fe	66,6	66,4
CaO	0,38	0,40
MgO	1,52	1,49
SiO ₂	1,74	1,98
Al ₂ O ₃	0,33	0,52
Вологість	1,8	1,6

Таблиця 13. Підсумкові результати роботи експериментальної домни, непокриті котуни МРВО у порівнянні з котунами МРВО, покритими каолінітом.

	МРВО - еталон	МРВО, покритий каолінітом
Тривалість (год)	50	62
Кількість підведеного дуття (нормальний м ³ /год)	1516	1516
Збагачення дуття киснем (нормальний м ³ /год)	101	101
Продуктивність (т/день)	34,1	34,6
Стандартна швидкість сходу шихти (см/хв.)	1,53	1,15
Коефіцієнт опору шихти (-)	6,74	6,38
Стандартний коефіцієнт опору шихти (-)	0,33	0,21
Витрати коксу (кг/т гаряч. металу)	404	403
Витрати нафти (кг/т гаряч. металу)	121	118
Вміст Si в гарячому металі (%)	1,24	1,23
Температура гарячого металу (°C)	1422	1425
Вміст C в гарячому металі (%)	4,49	4,56
Колошниковий пил (кг/т гаряч. металу)	5,6	3,6
Кількість зсувань/день	3,8	0,0





приблизний хімічний склад: 30% K₂O, 35% SiO₂, 19% Al₂O₃

Фіг.4