

МЕТАЛУРГІЯ

DOI: 10.31319/2519-2884.38.2021.1

УДК 669.162

М.С. Кузнецов¹, здобувач, maks_kuznetsov82@mail.ru

Г.Ю. Крячко², к.т.н., доцент, krachkogennadij@gmail.com

¹ПАТ «Дніпровський металургійний комбінат», м. Кам'янське

²Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське

ВПЛИВ ПАРАМЕТРІВ ДУТТЯ І ШЛАКОВОГО РЕЖИМУ НА ВМІСТ КРЕМНІЮ І СІРКИ В ЧАВУНІ ДОМЕННОЇ ПЛАВКИ

На двох доменних печах (ДП) об'ємом 1386 і 1500 м³ досліджували вплив параметрів дуттьового і шлакового режимів на вміст кремнію і сірки в чавуні. Дуттьовий режим оцінювали витратами пиловугільного палива (ПВП) та кисню, шлаковий режим — його основністю CaO/SiO₂. Встановлено, що вдування ПВП в горн ДП 1500 м³ в діапазоні витрат від 108 до 120 г/м³·с, а на ДП 1386 м³ в діапазоні від 90 до 110 г/м³·с супроводжувалося зниженням вмісту кремнію в чавуні. Погіршення переходу кремнію в чавун зі збільшенням витрати ПВП пояснюється комплексною дією факторів, що гальмують відновлення його оксидів. Встановлено також екстремальні зв'язки інтенсивності плавки за витратою кисню з вмістом кремнію в чавуні досліджуваних печей. Екстремальні залежності досліджуваних змінних обумовлені подвійним впливом інтенсивності плавки на відновлення оксидів кремнію — скорочення часу контакту металу з пічними газами знижує можливості переходу кремнію в метал, а зростання об'єму зони відновлення кремнію покращує ці можливості.

Ключові слова: доменна піч; дуття; шлак; режим; пиловугільне паливо; інтенсивність; чавун; кремній; сірка.

At two blast furnaces (BF) with a volume of 1386 and 1500 m³, the influence of the parameters of blast and slag modes on the content of silicon and sulfur in cast iron was investigated. The blast mode was evaluated by the consumption of pulverized coal fuel (PCF) and oxygen, the slag mode was evaluated by its basicity CaO / SiO₂. It was found that the injection of pulverized coal into the hearth of 1500 m³ BF in the range of flow rates from 108 to 120 g/m³·s, and in the hearth of 1386 m³ BF in the range from 90 to 110 g/m³·s was accompanied by a decrease in the silicon content in cast iron. The deterioration of the transition of silicon into cast iron with an increase in the consumption of pulverized coal is explained by the complex effect of factors that retard the reduction of its oxides. Extreme relationships were also established between the intensity of melting in terms of oxygen consumption and the silicon content in the cast iron of the furnaces under study. The extreme dependences of the studied variables are due to the dual effect of the melting intensity on the reduction of silicon oxides: a reduction in the time of contact of the metal with furnace gases reduces the possibility of transition of silicon into metal, and an increase in the volume of the silicon reduction zone improves these possibilities.

Keywords: blast furnace; blowing; slag; mode; pulverized coal fuel; intensity; cast iron; silicon; sulfur.

Постановка проблеми

Дослідження факторів, що визначають перехід кремнію в чавун і зв'язку вмісту сірки в чавуні з основністю шлаку в умовах роботи доменних печей з вдуванням пиловугільного палива.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Домішки переробного чавуну впливають не тільки на результативність та ефективність доменної плавки, але й справляють вплив на подальшу переробку чавуну в сталь. Загальновідомий вплив найбільшої за масою макродомішки вуглецю на прихідну частину теплового балансу конвертерної плавки. Однак у зв'язку із відсутністю технологічних важелів управління

вмістом вуглецю в чавуні основну увагу приділяють регулюванню вмісту таких домішок, як кремній і сірка.

На основі розрахунків змін статей теплових балансів доменної і конверторної плавки з витратою чавуну 860 кг/т сталі було показано [1], що при зростанні вмісту кремнію в чавуні на 1 кг/т (0,1 %) з урахуванням витрати теплоти на обпал вапна загальне збільшення витрати тепла на металургійному інтегрованому підприємстві складає 34,6 МДж/т сталі.

Питання про вплив параметрів дуття на умови відновлення кремнію в чавуні не нове — ще М.А. Павлов свого часу, формулюючи умови отримання кремнистого чавуну, вказував на необхідність високого нагріву дуття і пониженої інтенсивності плавки при високому нагріванні палива. Вірогідно однією з перших робіт, в якій було звернуто увагу на залежність відновлення кремнію від інших параметрів дуттьового режиму було дослідження [2]. Автори згаданої роботи відмітили, що в період активного переходу на комбіноване дуття на ряді підприємств збільшення витрати природного газу без зміни інших параметрів дуттьового режиму призвело до значного зменшення вмісту кремнію в чавуні при постійному і навіть більш підвищеній його температурі. Було також зазначено, що порушення відповідності між температурою чавуну і його складом відбулося і в дослідах на Карагандинському металургійному комбінаті, де теж був змінений тільки один параметр дуттьового режиму — збільшено вміст кисню в дутті до 25—27 %. В результаті виявилось неможливим виплавити чавун з колишнім вмістом кремнію : спроби отримати такий чавун супроводжувались похолоданням рідких продуктів плавки і підвищенням вмісту сірки в чавуні.

З часу публікації згаданої вище роботи [2] минуло багато років, за які відбулися суттєві зміни в технології доменної плавки. Головною паливною добавкою у комбінованому дутті замість природного газу стало пилувугільне паливо (ПВП), що суттєво змінило характер протікання процесів в робочому просторі печі. Застосування ПВП викликало пошук компенсаційних заходів, спрямованих на послаблення дії від'ємних факторів вдування вугільного пилу, одним з яких був перехід на шлаки зі зниженою основністю CaO/SiO_2 . Перехід з планової на суто ринкову економіку призвів до необхідності роботи печей з різним рівнем форсування плавки дуттям. Все це обумовило актуальність дослідження змін у дуттьовому і шлаковому режимах на поведінку домішок металу, зокрема кремнію.

Відомо [3], що підвищення вмісту сірки в чавуні на кожні 0,01 % призводить до збільшення продуктивності на 1 % і зменшення витрати коксу також на 1 %. Однак не зовсім досліджено, яким чином ці покращені показники доменної плавки позначаться на подальшій переробці чавуну, враховуючи витрати на установки доведення чавуну, конвертерній плавці і доведенні сирової сталі на установках піч-ковш. Оскільки умови десульфурзації у відновлювальному середовищі доменної плавки більш сприятливі ніж у плавці окислювальній, тому процес знесірчення в робочому просторі доменної печі на повинен залишатися поза увагою технологів.

Хоча поведінка сірки в доменному процесі на сьогоднішній день вивчена достатньо ґрунтовно, з'являються публікації, в яких наводяться дані, що спростовують загально прийняту уяву. Так, наприклад, в роботі [4] отримано дані про відсутність зв'язку вмісту сірки в чавуні з основністю шлаку, хоча відомо, що підвищення основності є краскутовим каменем в технології доменного знесірчення, особливо при роботі на кальційних шлаках.

Формулювання мети дослідження

Дослідження проводились на двох доменних печах ПАТ «Дніпровський металургійний комбінат» об'ємом 1386 і 1500 м³ в періоди сталої роботи у відносно постійних сировинних умовах у листопаді 2015 і серпні-вересні 2017 року відповідно. Печі оснащені двома чавунними льотками і типовими двоконусними пристроями.

У період досліджень доменні печі працювали з вдуванням пилувугільного палива з додаванням в дуття технологічного кисню. Для аналізу використовували суміжні в часі середньодобові показники за вирахуванням діб з простоями або роботою на знижених параметрах. Оскільки ступінь відновлення кремнію залежить від тиску в робочому просторі печі вибірку періодів проводили за умови коливання тиску газу на колошнику в межах, що не перевищують 5 кПа. Діапазон зміни надлишкового тиску колошникового газу на обох печах склав 130—135 кПа.

Дуттьовий режим оцінювали витратами пиловугільного палива та кисню, шлаковий режим — його основністю CaO/SiO_2 . В якості показника витрати ПВП використано густину потоку, відносну витрату пилу до кубічного метра дуття, що подавалося в горн печі за одну секунду в одиницях $\text{г/м}^3\cdot\text{с}$. На відміну від широкого вживаного критерію відносної витрати ПВП в часі [5] запропонований в роботі [6] показник враховує часову густину пилового потоку в одиниці дуття, що подається в горн в одиницю часу. Тобто новий критерій пов'язує витрату ПВП з інтенсивністю дуття. І сам по собі характеризує інтенсивність подавання вугільного пилу, як складової дуттьового режиму. Інтенсивність форсування плавки дуттям оцінювали витратою загального кисню (атмосферного + технологічного) поданого в горн за одну секунду.

Виклад основного матеріалу

Розрахункові дані приведені на рис.1, звідки видно, що найбільш тісний зв'язок існує між інтенсивністю вдування ПВП і вмістом кремнію в чавуні, причому на обох печах (рис. 1, а, г). Із збільшенням подачі вугільного пилу вміст $[\text{Si}]$ знижувався також на двох досліджуваних печах. На печі об'ємом 1386 м^3 ступінь тісноти зв'язків між цими змінними виявився досить високим ($R = 0,673$). Причини існування виявлених закономірностей вимагають пояснення.

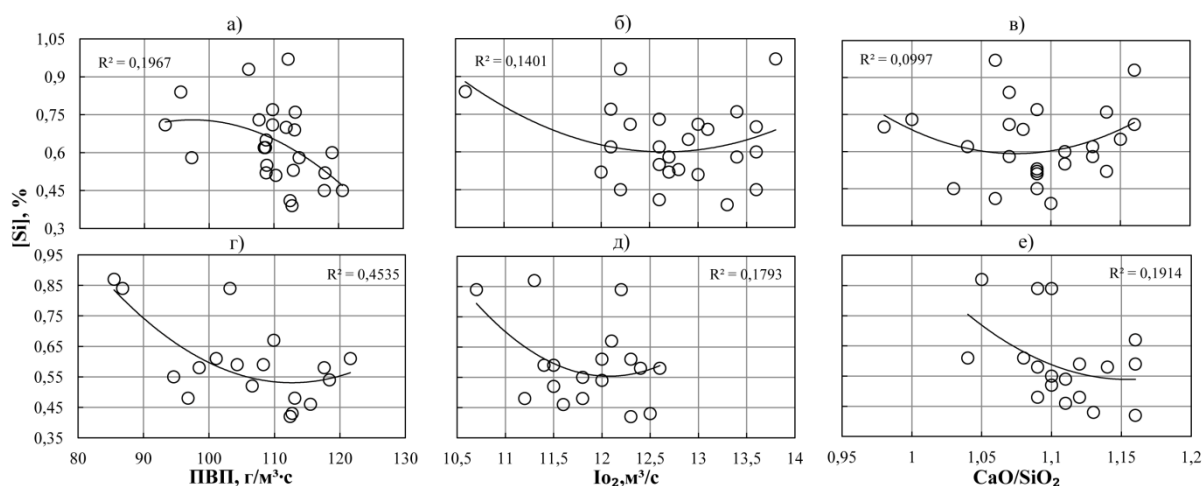


Рис. 1. Вплив витрати ПВП (а, г), витрати кисню з дуттям (б, д) і основності шлаку (в, е) на вміст кремнію в чавуні на доменних печах об'ємом 1500 м^3 (а, б, в) і 1386 м^3 (г, д, е)

В роботі Інституту чорної металургії (м. Дніпро) [7] узагальнено напрацювання в області впровадження технології доменної плавки з вдуванням ПВП і перераховано негативні явища в реалізації доменного процесу, викликані саме вдуванням вугільного пилу. Серед таких явищ слід відокремити ті, що можуть перешкоджати переходу кремнію в чавун.

По-перше, вдування ПВП обмежує розвиток фурмового вогнища і сприяє розвитку периферійного ходу. Внаслідок відбувається деформація в'язкопластичної зони у так звану W подібну з суттєвим зменшенням центральної частини. В результаті між зоною когезії і коксовою малорухомою насадкою суттєво зменшується об'єм області активного руху прогрітого коксу і знижуються температури для протікання реакцій відновлення кремнію через гальмування утворення первинної реакції утворення його монооксиду:



По-друге, зі збільшенням витрати ПВП частка неспаленого вугілля зростає. Частки неспаленого вугілля знижують фільтраційну здатність коксової насадки через погіршення текучості проміжного шлаку. Внаслідок погіршується проникнення фурмових газів в коксову насадку, знижуються температури в горні і, відповідно, умови для відновлення діоксиду кремнію у підфурменому середовищі.

Узагальнюючи дію перерахованих факторів можна зазначити, що при вдуванні ПВП відбувається погіршення умов відновлення оксидів кремнію в обох відомих зонах його відновлення — надфурменій і підфурменій [8].

По-третє, зменшення частки коксу в стовпі шихти і його ущільнення при вдуванні ПВП приводять до зниження газопроникності і, відповідно, інтенсивності плавки. Для компенсації погіршення газодинаміки процесу технологи намагаються працювати з максимально можливим тиском газів на колошнику, якщо мають відповідні можливості повітродувних засобів і засипних апаратів. Відомо [9], що на відновлення оксиду кремнію вплив справляє тиск в печі, чим воно вище, тим в меншій мірі відновлюється кремній, оскільки відбувається зсув реакцій (1) і (2) у бік утворення твердих компонентів.

Слід погодитися з цілком обґрунтованим висновком авторів роботи [7] про те, що застосування ПВП значно обмежує усталеність ходу доменних печей і ще в свою чергу не сприяє виплавці чавуну стабільного складу.

Є ще один фактор, що погіршує відновлення оксидів кремнію, обумовлений подаванням в горні ПВП. І вугільний пил і газ — носій пилу вдуваються в піч холодними в порівнянні з коксом, що потрапляє у фурмове вогнище при нормальному ході печі при температурі 1500°C.

Таким чином визначені негативні фактори, викликані застосуванням ПВП в якості заміни коксу сприяють позитивній для доменного і конвертерного процесів виплавці низькокремнистого переробного чавуну. Вірогідно, що низький вміст кремнію 0,40—0,45 % у високо нагрітих (1490—1510 °C) переробних чавунах печей дальнього зарубіжжя частково може пояснюватися саме застосуванням ПВП у значних обсягах.

Другим фактором за тіснотою зв'язку між дослідженими змінними виявилася інтенсивність плавки за витратою кисню (середнє по двом печам значення $R = 0,40$). Як видно із (рис. 1, б, д) діапазон зміни інтенсивності плавки за киснем залежить від об'єму печі, на печі об'ємом 1500 м³ він закономірно більший ніж на печі об'ємом 1386 м³.

Вважається [10], що пропорційно зростанню інтенсивності процесу повинен знижуватися вміст кремнію в чавуні внаслідок скорочення часу контакту металу з газовим середовищем. В наших умовах залежності [Si] від витрати кисню виявилися екстремальними — за регресійними кривими з мінімумами для печі 1500 м³ з витратою кисню 12,5 м³/с, а для печі 1386 м³ ~ 12,0 м³/с. Подальше форсування ходу печі дугтям буде сприяти збільшенню концентрації кремнію в металі, особливо це помітно на ДП 1500 м³ (див. рис. 1, б). Таке явище можна пояснити подвійним впливом інтенсивності плавки на відновлення оксидів кремнію — з однієї сторони відбувається скорочення часу контакту металу з пічними газами, з другої повинна зростати висота коксової зони фільтрації і відповідно об'єм зони відновлення кремнію.

За статистичною оцінкою залежність [Si] від зміни основності шлаку на ДП 1500 м³ (рис. 1, в) взагалі відсутня. Навпаки на ДП 1386 м³ ця залежність помітна і відповідає усталеним поглядам — підвищення основності шлаку погіршує умови відновлення оксидів кремнію.

Для подальшої оцінки впливу основності шлаку на вміст кремнію і сірки і чавуні суттєво розширили виборку змінних для ДП 1386 м³ двохсотдобовим періодом роботи печі у 2017 році без виключення періодів роботи на стриманому ході, задувки після зупинок, роботи з різним рівнем тиску газу на колошнику. Тривалість одиничного періоду один випуск, об'єм вибірки 1891 випуск. Діапазон зміни модуля CaO/SiO₂ від 0,9 до 1,3.

Результати аналізу приведені на (рис. 2, а) свідчать про відсутність залежності [Si] від основності шлаку, що вказує на багато чисельність факторів впливу на умови відновлення оксидів кремнію. В деяких відносно недавніх роботах [11,12] підкреслюють визначальний вплив температури на розподіл кремнію між чавуном і шлаком. Автор [12] вважає, що вплив температури на силікатну ємність, так і на розподіл кремнію набагато більший в порівнянні з впливом основності шлаку. Однак розрахунками було встановлено [11] різний вплив температури на

процес газифікації кремнію — за температур $< 1600\text{ }^{\circ}\text{C}$ внаслідок зростаючої активності вуглецю кількість кремнію в газовій фазі зростає, а при більш високих температурах внаслідок утворення карбиду кремнію — знижується.

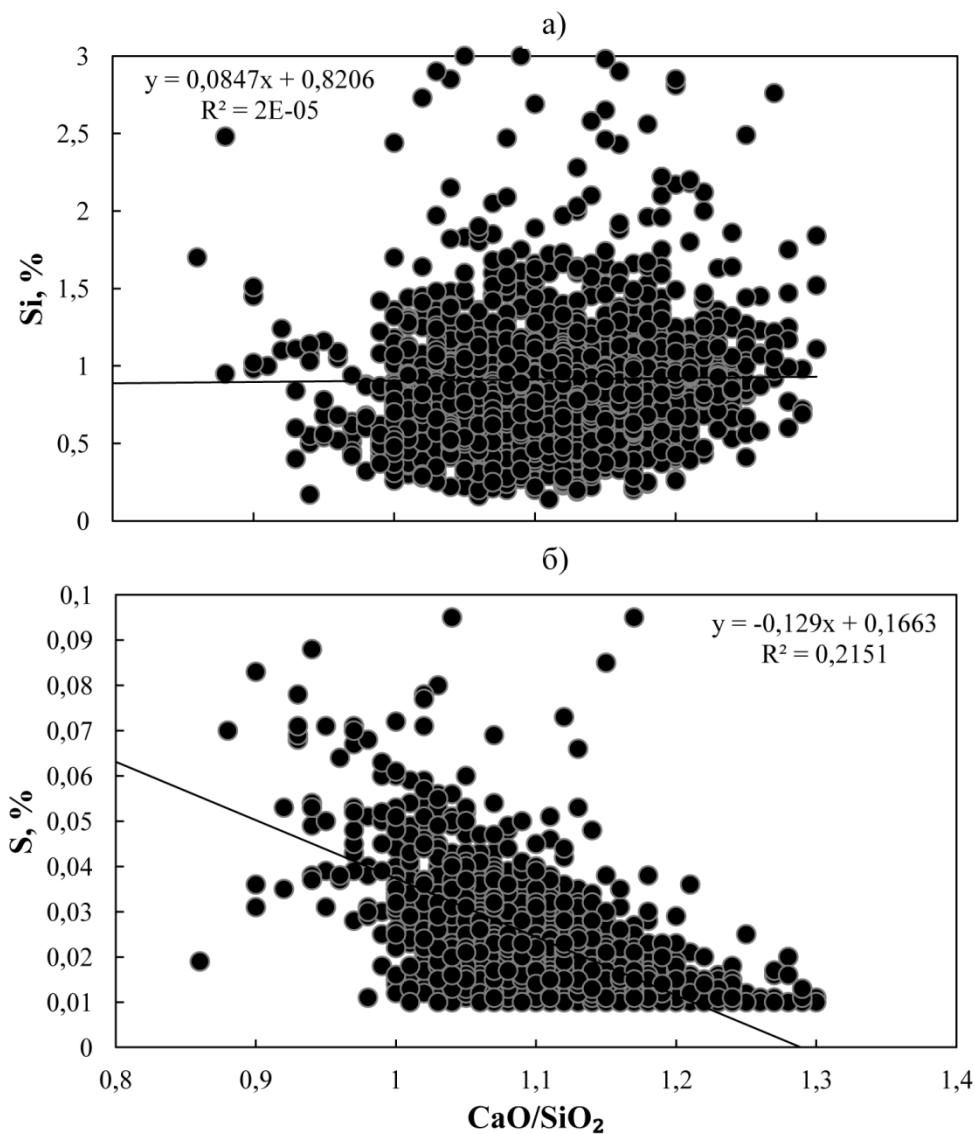


Рис. 2. Вплив основності шлаку на вміст кремнію і сірки в чавуні, випущеного з доменної печі об'ємом 1386 м³ за період: 03.01.2017 – 31.12.2017

Щодо поведінки сірки в доменному процесі при використанні ПВП встановлено, що за всіх негативних умов доменної плавки, викликаних роботою печей в режимі ринкової економіки спостерігається помітний вплив основності шлаку на вміст сірки в чавуні (рис. 2, б; $R = 0,464$). Тобто при роботі на кальційних шлаках їх основність залишається як один із вирішальних факторів, що визначають перехід сірки в метал.

Висновки

Вдування в горн доменної печі об'ємом 1500 м³ пиловугільного палива з витратою від 108 до 120 г/м³·с супроводжувалося зниженням вмісту кремнію в чавуні за регресійною кривою на 0,16 % на додаткові 10 г/м³·с пилу. На печі об'ємом 1386 м³ в діапазоні зміни витрати пилу 90—110 г/м³·с також спостерігалось зниження вмісту кремнію в чавуні зі зменшенням градієнта [Si] з 0,17 % до 0,09 % при зростанні витрати пилу на 10 г/м³·с. Погіршення переходу кремнію в чавун зі збільшенням витрати ПВП пояснюється комплексною дією факторів, що гальмують

відновлення його оксидів, серед яких скорочення фурмового вогнища підвищення тиску газу в робочому просторі печі, зниження фільтраційної здатності коксової насадки, вдування ПВП холодним носієм в холодному стані.

Встановлено екстремальні зв'язки інтенсивності плавки за витратою кисню з вмістом кремнію в чавуні досліджених печей. Підвищення витрати кисню до 12,0—12,5 м³/с сприяло зниженню [Si] а подальше збільшення витрати супроводжувалося зростанням [Si]. Екстремальні зв'язки досліджуваних змінних обумовлені подвійним впливом інтенсивності плавки на відновлення оксидів кремнію і скорочення контакту металу з пічними газами знижує можливості переходу кремнію в метал, а зростання об'єму зони відновлення кремнію покращує ці можливості.

При роботі печі об'ємом 1386 м³ на кальційних шлаках в діапазоні зміни основності CaO/SiO₂ з 0,9 до 1,3 без видалення періодів роботи печі, пов'язаних з коливанням режимів експлуатації, встановлена відсутність залежності вмісту кремнію в чавуні від модуля CaO/SiO₂, що вказує на багаточисельність факторів впливу на відновлення оксидів кремнію. В тому ж діапазоні зміни основності і різних режимах експлуатації печі спостерігався помітний вплив основності на вміст сірки в чавуні (R=0,464), що свідчить про визначальну роль основності в процесі доменної десульфурзації.

Список використаної літератури

1. Сущенко А.В. Влияние содержания кремния в чугунах на энергопотребление доменного и конвертерного процессов / А.В. Сущенко, М.А. Томаш, А.А. Томаш // *Вісник Приазовського державного технічного університету*. 2009. №19. С. 13–16.
2. Сафронов Н.Н. Анализ условий восстановления кремния в доменной печи / *Сталь*. 1981. №4. С. 24–25.
3. Волков Ю.П. Технолог – доменщик. Справочное и методическое руководство / Ю.П. Волков, Л. Я. Шпарбер, А. К. Гусаров. М.: «Металлургия». 1988. 263 с.
4. Овчинникова Е.В. Оценка шлакового режима доменной плавки в условиях ОАО «Уральская сталь» / Е.В. Овчинникова, В.Б. Горбунов, А.Н. Шаповалов // *Наука и производство Урала*. 2015. №11. С. 35–39.
5. Шот Р. Стратегии оптимизации процесса вдувания пылеугольного топлива в доменную печь. *Черные металлы*. 2016. №8. С. 15–24.
6. Крячко Г.Ю. Визначення витрати пилувугільного палива при збереженні рівного ходу доменної печі / Г.Ю. Крячко, М.С. Кузнецов, О.А. Чубіна, С. М. Степанченко // *Зб. наукових праць Дніпровського технічного університету (технічні науки)*, 2020. Вип.1(36). С. 9–13.
7. Можаренко Н.М. Особенности технологии доменной плавки с применением пылеугольного топлива / Н.М. Можаренко, Ю.С. Семенов, В.В. Горупаха, Е.И. Шумельчик // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2017. №5. С. 2–9.
8. Крячко Г.Ю. О поведении кремния в рабочем пространстве доменной печи. Сб. тр. междунауч. техн. конференции «Теория и практика производства чугуна» Кривой Рог. КГТМК «Криворожсталь» 2004. С. 337–341.
9. Шедрин В.М. Теория доменной плавки под давлением / М.: Metallurgizdat. 1962. 454 с.
10. Шекхар Ч.Р. Исследование и разработка технологии доменной плавки, обеспечивающий снижение содержания кремния в чугунах, с целью улучшения технико-экономических показателей работы доменного и сталеплавильных цехов на Бхилайском металлургическом заводе: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.16.02 Москва. 1990. 37 с.
11. Gustavsson J. A Thermodynamic Study of Silicon Containing Gas around a Blast Furnace Raceway / J.GUSTAVSSON, A.M.T. ANDERSSON and P.G. JONSSON // *ISIJ International*, 2005. Vol.45. №5. P. 662–668.
12. Elmomen Abd.SS. Influence of Slag Composition and Temperature on Silicon Distribution between Slag and Hot Metal in the Egyptian Blast Furnace No.III / *Journal of Petroleum and Mining Engineering*. 2017. №19(1). P. 26–32.

INFLUENCE OF BLOWING PARAMETERS AND SLAG REGIME ON SILICON AND SULFUR CONTENT IN BLAST-FURNACE CAST IRON

Kuznetsov M.S., Kryachko G.Yu.

Abstract

At two blast furnaces (BF) with a volume of 1386 and 1500 m³, the influence of the parameters of blast and slag modes on the content of silicon and sulfur in cast iron was investigated. The blast mode was evaluated by the consumption of pulverized coal fuel (PCF) and oxygen, the slag mode was evaluated by its basicity CaO / SiO₂. It was found that the injection of pulverized coal into the hearth of 1500 m³ BF in the range of flow rates from 108 to 120 g/m³·s, and in the hearth of 1386 m³ BF in the range from 90 to 110 g/m³·s was accompanied by a decrease in the silicon content in cast iron. The deterioration of the transition of silicon into cast iron with an increase in the consumption of pulverized coal is explained by the complex effect of factors that retard the reduction of its oxides. Extreme relationships were also established between the intensity of melting in terms of oxygen consumption and the silicon content in the cast iron of the furnaces under study. The extreme dependences of the studied variables are due to the dual effect of the melting intensity on the reduction of silicon oxides: a reduction in the time of contact of the metal with furnace gases reduces the possibility of transition of silicon into metal, and an increase in the volume of the silicon reduction zone improves these possibilities.

When operating a 1386 m³ furnace on calcium slag in the range of CaO / SiO₂ basicity change from 0.9 to 1.3 without removing the blast furnace operation periods associated with a change in operating conditions, the absence of dependence of the silicon content in cast iron on the CaO/SiO₂ modulus was found/ In its turn this indicated the complexity of factors influencing the reduction of silicon oxides. In the same range of changes in basicity and different operating modes of the furnace, a noticeable effect of basicity on the sulfur content in cast iron was observed, which indicates the decisive role of basicity in the process of blast-furnace desulfurization.

References

- [1] Sushchenko A.V., Tomash M.A., Tomas A.A. Influence of silicon content in cast iron on energy consumption of blast furnace and converter processes. *Bulletin of the Azov State Technical University*. 2009. No. 19. P. 13–16. [in Ukraine]
- [2] Safronov N.N. Analysis of the conditions for the reduction of silicon in a blast furnace. *Stal*, 1981. №4. P. 24–25. [in Russia]
- [3] Volkov Yu.P., Sparber L. Ya, Gusarov A.K. Technologist and blast-furnace metallurgist. Reference and methodological guidance. Moscow : publishing house “Metallurgy”, 1988. 263p.[in Russia]
- [4] Ovchinnikova E.V., Ovchinnikova V.B., Gorbunov V.B., Shapovalov A.N. Evaluation of the slag mode of blast-furnace smelting in the conditions of OJSC ‘Ural Steel’ // *Science and production of the Urals*. 2015. №11. P. 35–39. [in Russia]
- [5] Shot R. Strategies for optimizing the process of pulverized coal fuel blowing into a blast furnace. *Ferrous Metals*. 2016. No. 8. P. 15–24. [in Russia]
- [6] Kryachko G.Yu., Kuznetsov M.S., Chubina O.A., Stepanchenko S.M. Determination of pulverized coal fuel consumption while maintaining the smooth running of the blast furnace. *Collection of research papers of Dniprovsk technical university (technical sciences)*, 2020, Issue 1 (36). P. 9–13. [in Ukraine]
- [7] Mozharensko N.M., Semenov Yu.S., Gorupakha V.V., Shumelchik E.I. Features of blast furnace technology using pulverized coal. *Metallurgical and Mining Industry*, 2017. No. 5. P. 2–9.[in Ukraine]
- [8] Kryachko G.Yu. Silicon properties in the working space of a blast furnace. *Collection of research papers of International scientific and technical conference "Theory and practice of pig iron production" Kryvyi Rih. "Krivorozhstal" 2004*. P.337–341. [in Ukraine]

- [9] Shedrin V.M. Theory of blast-furnace smelting under pressure. Mosow : Metallurgizdat, 1962. 454 p. [in Russia]
- [10] Shekhar Ch.R. Research and development of blast-furnace smelting technology, providing a decrease in the silicon content in pig iron, in order to improve the technical and economic indicators of the blast-furnace and steel-making shops at the Bhilai Steel Plant: *abstract of thesis for Candidate of Technical Sciences*: 05.16.02 Moscow, 1990. 37p. [in Russia]
- [11] Gustavsson J. A Thermodynamic Study of Silicon Containing Gas around a Blast Furnace Raceway / J.GUSTAVSSON, A.M.T. ANDERSSON and P.G. JONSSON // ISIJ International, 2005. Vol.45. №5. P.662–668. [in United Kingdom]
- [12] Elmomen Abd.SS. Influence of Slag Composition and Temperature on Silicon Distribution between Slag and Hot Metal in the Egiptian Blast Furnase No.III / Journal of Petroleum and Mining Engineering.2017.№19(1). P.26–32. [in Egiptian]