

Дніпродзержинський державний технічний університет

ТЕМПЕРАТУРА ФУРМЕНИХ ВОГНИЩ – КОМПЛЕКСНИЙ ПАРАМЕТР ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ

Вступ. Температура фурмених вогнищ доменної печі тепер може стати комплексним параметром технологічного процесу. Але в ті часи, коли впроваджувалися прилади контролю температури фурмених вогнищ та досліджувалися результати їх роботи, не було виявлено основних факторів технологічного процесу, що впливають на температуру. Наприклад, не враховувалося коливання окиснення елементів чавуну на фурмах. Через окислювальну зону фурмених вогнищ опускається основна маса рідких продуктів плавки. При цьому значна частина елементів чавуну окиснюється, а потім відновлюється твердим вуглецем нижче фурм. Окиснення елементів чавуну на фурмах супроводжується виділенням значно більшої кількості тепла, ніж при окисненні вуглецю. Це тепло в основному виноситься газами у верхню зону печі, підвищуючи температуру на фурмах і в шахті. Тільки частина його засвоюється створеними оксидами елементів чавуну та рідкими продуктами плавки, які стікають в горн. Тому вторинне пряме відновлення цих оксидів супроводжується похолоданням горну через 40-120 хвилин [1].

Теоретична температура горіння на фурмах t_r – це температура, яка визначається складом і тепловмістом комбінованого дуття та горінням вуглецю до його оксиду при відсутності теплообміну з оточуючим середовищем. В реальних умовах в значній мірі відбувається теплообмін між газовою фазою і рідкими продуктами плавки, коливається окиснення елементів чавуну. Тому дійсна температура завжди відрізняється від теоретичної. Головною причиною зміни різниці між ними є коливання окиснення елементів чавуну на фурмах. Так, окиснення 25% заліза чавуну на фурмах спричиняє підвищенню температури горнових газів на 281°C [1].

Постановка задачі. Проаналізувати результати досліджень залежності температури фурмених вогнищ від параметрів доменної плавки з урахуванням коливання окиснення елементів чавуну на фурмах та обґрунтувати можливість використання цієї інформації для контролю технологічного процесу.

Результати роботи. Температура фурмених вогнищ коливається в межах від 1500 до 2000°C і поряд розташовані фурми мають відмінний характер її зміни [2, 3]. Під час збільшення витрати природного газу температура фурмених вогнищ знижується, а під час підвищення температури дуття та вмісту в ньому кисню – підвищується. Очевидно, що ці параметри впливають на окиснювальний потенціал фурменого вогнища і, отже, на процес окиснення елементів чавуну:

- природний газ знижує окиснювальний потенціал, і тому при збільшенні його витрати окиснення елементів чавуну знижується, а температура на фурмах зменшується;

- температура дуття та збагачення його киснем, навпаки, підвищують окислювальний потенціал, і тому під час їх збільшення температура фурм зростає.

Після збільшення вологості дуття температура фурм змінюється не завжди в одному напрямку – спостерігаються випадки, коли вона зростає, зменшується або залишається незмінною. Така неоднозначна залежність пояснюється тим, що вологість, з одного боку, може підвищувати окислювальний потенціал за рахунок кисню, що утворюється під час розкладання пари води в горні на O_2 і H_2 . З другого боку, на розкладання пари води витрачається тепло фурменого вогнища, внаслідок чого значно знижується його температура і, тим самим, може зменшуватися окислювальний потенціал. Мо-

жна припустити, що, якщо збільшують вологість дуття під час високого нагріву фурменних вогнищ, то температура від розкладання пари води знизиться несуттєво, і окиснювальний потенціал підвищиться за рахунок кисню, що утворюється від розкладання пари води, внаслідок чого збільшиться температура фурм. Якщо ж збільшують вологість дуття під час низького нагріву фурменних вогнищ, то температура від розкладання пари води знизиться суттєво, що викличе зменшення окиснювального потенціалу і відповідне падіння температури фурменних вогнищ. Можливі випадки, коли ці фактори будуть взаємно компенсовані. Тоді після збільшення вологості дуття температура на фурмах не буде змінюватися. Це підтверджується тим, що модуль коефіцієнта кореляції між вологістю дуття і температурою на фурмах в різні періоди коливається від 0 до 0,485.

Значення коефіцієнта парної кореляції між температурами двох сусідніх фурм за період 346 годин складає лише 0,229. Це є наслідком того, що кожне фурмене вогнище працює незалежно і міра окиснення елементів чавуну на ньому не збігається з мірою на інших фурмах.

Оскільки на температуру фурм впливає коливання процесу окиснення елементів чавуну, то щільність взаємозв'язку між виміряною і теоретичною температурами невисока: за два періоди по 215 і 310 годин значення коефіцієнта парної кореляції між ними складає відповідно 0,45 і 0,38.

Зникає пряма залежність вмісту кремнію в чавуні від температури фурм при високому її значенні. Це можна пояснити тим, що внаслідок збільшення окиснення елементів чавуну піднімається температура на фурмах, а вміст кремнію в чавуні при цьому зменшується за рахунок підвищення затрат тепла на пряме відновлення оксидів елементів чавуну нижче фурм.

Значення коефіцієнта парної кореляції, наведені в табл.1, можна пояснити наступним: в періодах 2 і 4 вологість дуття зменшувала окиснювальний потенціал, тому спостерігається від'ємне значення коефіцієнта кореляції між температурою фурм і вологістю дуття, позитивне значення коефіцієнта кореляції між вологістю дуття і вмістом кремнію та майже відсутня залежність вмісту кремнію в чавуні від температури фурм. В періоді 3, навпаки, вологість підвищує окиснювальний потенціал, що підтверджується позитивним значенням коефіцієнта кореляції між вологістю дуття і вмістом кремнію та між температурою фурм і вмістом кремнію.

Таблиця 1 – Значення коефіцієнта парної кореляції між температурою фурм і вологістю дуття ($r_{t\phi-\lambda}$), вологістю дуття і вмістом кремнію в чавуні ($r_{\lambda - si}$) та температурою фурм і вмістом кремнію в чавуні ($r_{t\phi - si}$) [4]

Періоди	Тривалість періоду, години	Значення коеф. парної кореляції		
		$r_{t\phi - \lambda}$	$r_{\lambda - si}$	$r_{t\phi - si}$
1	194	- 0,270	- 0,0752	+ 0,380
2	216	- 0,435	+ 0,358	- 0,190
3	309	- 0,0215	+ 0,279	+ 0,440
4	360	- 0,252	+ 0,560	+ 0,020

Щільність залежності вмісту кремнію в чавуні від температури фурм послаблюється під час зміни параметрів комбінованого дуття, особливо його вологості. Це проявляється в ті періоди роботи печі, коли спостерігається висока пряма залежність вмісту кремнію в чавуні від вологості дуття (табл.1, періоди 2, 4). Вплив вологості на залежність вмісту кремнію в чавуні від температури фурм пояснюється коливанням окиснення елементів чавуну. Під час збільшення вологості дуття зменшується температура на фурмах, і це викликає зниження окисного потенціалу фурменного вогнища: на фур-

мах зменшується окиснення чавуну, за рахунок цього додатково зменшується температура і збільшується вміст кремнію в чавуні. Очікували зменшення вмісту кремнію в чавуні за рахунок зменшення температури фурм, а отримали його збільшення, оскільки зменшилася затрата тепла на пряме відновлення. Якби в цей час контролювали окиснення елементів чавуну, то можна було б точно передбачити це збільшення. Під час зменшення вологості дуття, навпаки, збільшується температура на фурмах. Внаслідок цього підвищується окисний потенціал фурменого вогнища, збільшується окиснення елементів чавуну, за рахунок цього додатково збільшується температура і зменшується вміст кремнію в чавуні.

Щоб врахувати вплив вологості дуття на залежність вмісту кремнію в чавуні від температури фурм було запропоновано корегування температури [4]:

$$T_{\text{кор}} = t_{\text{ф}} + n\lambda, \quad (1)$$

де n – коефіцієнт, значення якого приймаємо в межах 5...10.

В табл.2 наведено значення коефіцієнта парної кореляції залежності вмісту кремнію в чавуні від $T_{\text{кор}}$ при значеннях $n = 0; 5; 10$ за шість періодів роботи доменної печі Дніпровського металургійного комбінату. Видно, що при значеннях коефіцієнта $n=5$ та $n=10$ щільність взаємозв'язку вмісту кремнію в чавуні з $T_{\text{кор}}$ підвищується.

Таблиця 2 – Значення коефіцієнта кореляції залежності Si від $T_{\text{кор}}$ [4]

Періоди	Тривалість періоду, години	Значення коефіцієнта n		
		0	5	10
1	225	0,48	0,55	0,53
2	120	0,256	0,60	0,758
3	310	0,44	0,53	0,445
4	375	0,02	0,373	0,556
5	162	0,31	0,356	0,345
6	450	0,19	0,454	0,454

В періодах 2, 4 і 6 тепловий стан печі коливається у значних границях і для його стабілізації змінювали вологість дуття від 10 до 36 г/м³. Тому в цих умовах помітний вплив вологості дуття на залежність вмісту кремнію в чавуні від температури фурм. Найбільш показовий вплив зміни вологості на $T_{\text{кор}}$ в періоді 4, коли при $n = 0$ значення коефіцієнта парної кореляції дорівнює 0,02, а при $n = 5$ і $n=10$ його значення зростає відповідно до 0,373 і 0,556. В періоді 2 при $n = 5$ і $n=10$ значення коефіцієнта парної кореляції зростає від 0,256 (при $n = 0$) до 0,60 і 0,758 відповідно.

Отже, під час коливання вологості дуття спостерігається суттєвий вплив коефіцієнта n на залежність вмісту кремнію в чавуні від $T_{\text{кор}}$.

Тепер, коли виявлено суттєве коливання окиснення елементів чавуну на фурмах і його вплив на якість чавуну, можна розкрити сутність коефіцієнта n : збільшення вологості дуття зменшує температуру на фурмах і очікується зменшення вмісту кремнію в чавуні. Якби при цьому не змінилося окиснення елементів чавуну, то вміст кремнію зменшився б, і ми отримали б пряму залежність вмісту кремнію від температури фурм.

Але під час збільшення вологості за рахунок зменшення температури на фурмах знижується окислювальний потенціал фурмених вогнищ, зменшується окиснення елементів чавуну і зменшується витрата тепла на пряме відновлення, внаслідок чого вміст кремнію в чавуні зростає пропорційно вологості. За рахунок коефіцієнта n кореговане значення $T_{\text{кор}}$ зростає із збільшенням вмісту кремнію, що і сприяє підвищенню значення коефіцієнта кореляції залежності Si від $T_{\text{кор}}$. Отже, наведені в табл.2 результати дос-

ліджень підтверджують наявність коливання окиснення елементів чавуну на фурмах та його вплив на якість чавуну.

Але значення коефіцієнта парної кореляції невисоке, оскільки формула (1) враховує вплив вологості дуття тільки при її збільшенні. Якщо ж вологість зменшена, то це викличе збільшення t_{ϕ} і окиснення елементів чавуну, внаслідок чого збільшиться витрата тепла на пряме відновлення елементів чавуну, а вміст кремнію в чавуні зменшиться. В цьому випадку $T_{\text{кор}}$, розраховане за формулою (1), не буде відображати тепловий стан печі. Тут краще було б визначати $T_{\text{кор}} = t_{\phi} - n\lambda$. Тоді $T_{\text{кор}}$ було б зменшено від t_{ϕ} у відповідності із зменшенням Si в чавуні.

Найвірніше корегування температури фурмених вогнищ можна було б здійснювати за наступною формулою (2):

$$T_{\text{кор}} = t_{\phi} + n\Delta\lambda, \quad (2)$$

де $\Delta\lambda$ – зміна вологості дуття в порівнянні з попереднім значенням: якщо її збільшують, то $\Delta\lambda$ буде мати знак «+», а якщо її зменшують, то $\Delta\lambda$ буде мати знак «-». Але ця формула не враховує коливання окиснення елементів чавуну під час зміни інших параметрів. Тому доцільно безперервно контролювати коливання окиснення елементів чавуну і за її значеннями корегувати температуру фурмених вогнищ.

Поставлена задача розв'язується так: вимірюють витрату дуття, паливних добавок, технологічного кисню, температуру та вологість дуття і розраховують теоретичну температуру горіння t_r . Визначають різницю між нею і температурою фурмених вогнищ $\Delta t = t_r - t_{\phi}$ і через кожні 10 хвилин порівнюють цю різницю з попереднім її значенням та визначають її зміну $\Delta = \Delta t(t) - \Delta t(t-1)$, за якою розраховують кореговану температуру фурмених вогнищ $t_{\text{кр}} = t_{\phi} + \Delta$.

Під час збільшення окиснення підвищується температура фурм, а вміст кремнію в чавуні зменшується за рахунок збільшення витрати тепла на повторне відновлення оксидів елементів чавуну нижче фурм. Тому пряма залежність вмісту кремнію від температури стає оберненою. Контролюючи різницю $\Delta t = t_r - t_{\phi}$, її приріст $\Delta = \Delta t(t) - \Delta t(t-1)$ та визначивши $T_{\text{кр}} = t_{\phi} + \Delta$, відновимо пряму залежність вмісту кремнію від $T_{\text{кр}}$, оскільки при цьому значення Δ має від'ємне значення і корегована температура $T_{\text{кр}}$ буде зменшуватися пропорційно зниженню вмісту кремнію.

Під час зменшення окиснення елементів чавуну на фурмах температура фурм зменшиться, а вміст кремнію зросте за рахунок зменшення витрати тепла на повторне відновлення оксидів елементів чавуну нижче фурм. Тому в таких випадках також пряма залежність вмісту кремнію від температури стає оберненою. Контролюючи різницю $\Delta t = t_r - t_{\phi}$, її приріст $\Delta = \Delta t(t) - \Delta t(t-1)$ та визначивши $T_{\text{кр}} = t_{\phi} + \Delta$, отримаємо пряму залежність вмісту кремнію від $T_{\text{кр}}$, оскільки при цьому значення Δ має додатне значення і корегована температура $T_{\text{кр}}$ буде збільшуватися пропорційно зростанню вмісту кремнію.

Автори досліджень [5, 6] стверджують, що в показах пірометрів, окрім інформації про температуру фурмених вогнищ, є також інформація про характер сходження шихтових матеріалів, рух кусків коксу у фурмених вогнищах, режим їх роботи тощо. Під час різкого опускання (обвалення) шихтових матеріалів температура фурменого вогнища стрибкоподібно знижується з наступним підйомом до попереднього значення в міру розплавлення та вигорання обваленого матеріалу, причому швидкість зниження температури значно більша від швидкості її зростання. Під час підвисань шихтових матеріалів над фурменим вогнищем його температура збільшується, а потім відбувається обвалення шихтових матеріалів, і температура вогнища різко знижується.

Взаємно-кореляційні функції (ВКФ) залежності вмісту кремнію в чавуні від температури фурмених вогнищ мають екстремуми в часі, що відповідає наступному випуску чавуну (2,5 годин) [5]. Але значення коефіцієнта кореляції в екстремумі колива-

ються від 0,18 до 0,42 для різних періодів. Очевидно, що щільність залежності Si від $T_{кр}$ буде значно вищою.

В дослідженнях [4] отримали майже такі ж результати, як в [2, 3]. Теоретична температура за період 230 г виявилася вищою від t_{ϕ} на 120-170°C, що підтверджує результати досліджень [7]. Нетривалі коливання t_{ϕ} на різних фурмах, а також на поряд розташованих відрізняються, що свідчить про різну міру окиснення елементів чавуну на кожній фурмі та про необхідність контролю температури на кожній фурмі. В окремих періодах спостерігається зворотна залежність Si від t_{ϕ} через 2-3 г, що є наслідком коливання окиснення елементів чавуну. При рівному ході печі амплітуда коливання t_{ϕ} складає 50-100°C, а при нестійкому ході, особливо при обваленні матеріалів, амплітуда збільшується до 200-300°C.

В дослідженнях [8] виявлено, що температура факелу реєструється у вигляді імпульсів з амплітудою 5-20°C і частотою 0,15-0,5 Гц. Причини пульсації температури вогнища автори припускають в тому, що змінюється гідравлічний опір стовпа шихти, який викликає коливання тиску та витрати дуття і циркуляції коксу. Ми ж можемо стверджувати, що тут можливий вплив коливання окиснення елементів чавуну. Подача 4% природного газу зменшує температуру на 150-180°C; після закінчення подачі природного газу температура відновлюється до попереднього рівня. В цих випадках також очевидний вплив зміни окиснення елементів чавуну.

Автори [9] вважають, що інтенсивність випромінювання з фурм є відображенням зміни температурного рівня, що відповідає температурі газу, який вступає в теплообмін з твердою та рідкою фазами. Тому для правильної поточної оцінки теплового стану низу печі, а також в алгоритмах прогнозування та керування, інтенсивність випромінювання з фурм необхідно використовувати тільки разом з параметрами, які характеризують розвиток теплоспоживаючих процесів. Тому, також в загальному, не слід очікувати високої щільності зв'язку між показниками теплового стану печі, наприклад, вмістом кремнію в чавуні і інтенсивністю випромінювання з фурм. На наш погляд, до теплоспоживаючих процесів можна віднести і процеси окиснення елементів чавуну на фурмах та їх повторного відновлення.

Робочі температури повітряних фурм в діапазоні 150-300°C, що виміряні термодатчиком, відповідають дійсній температурі фурмених вогнищ 1900-2400°C [10]. Коливання температури носків повітряних фурм від 175°C (2191°C) до 249°C (2240°C), особливо різке збільшення показу термодатчика до 570°C, можна пояснити зміною окиснення елементів чавуну.

Висновки. Коливання окиснення елементів чавуну на фурмах викривляє взаємозв'язок температури фурм з параметрами якості чавуну. Для достовірного контролю і прогнозування якості чавуну необхідно визначати коливання окиснення елементів чавуну на фурмах і корегувати значення температури фурм.

Це досягається тим, що шляхом постійного вимірювання температури фурмених вогнищ t_{ϕ} , розрахунку теоретичної температури горіння $t_{г}$ визначають різницю між ними $\Delta t = t_{г} - t_{\phi}$, зміну цієї різниці в порівнянні з попереднім значенням за час $(t - 1)$ $\Delta = \Delta t (t) - \Delta t(t - 1)$ та розраховують кореговану температуру фурмених вогнищ $T_{кр} = t_{\phi} + \Delta$, за якою прогнозують параметри якості чавуну.

ЛІТЕРАТУРА

1. Довгалюк Б.П. Коливання окиснення елементів чавуну на фурмах/ Б.П.Довгалюк // Новини науки Придніпров'я: збірка наукових доповідей наук.-практ. конф., присвяченій 100-річчю відомого вченого Г.А.Воловіка, травень 2010. – Дніпропетровськ, 2010. – С.105-108.

2. Устройство для контроля температуры фурменной зоны / [Б.П.Довгалюк, А.В.Клименко, Б.И.Марейчев и др.] // Автоматизация горнорудного и металлургического производства. – К.: Техніка. – 1968. – С.30-34.
3. Клименко А.В. Контроль нагрева нижней части доменной печи по температуре фурменной зоны / А.В.Клименко, Б.П.Довгалюк, С.Т.Илюнин // Контроль и регулирование параметров доменного процесса. – К.: Наукова думка. – 1972. – С.234-242.
4. Клименко А.В. Взаимосвязь температуры фурменных очагов и нагрева горна доменной печи / А.В.Клименко, Б.П.Довгалюк, Н.Е.Пильгуй // Металлургия и коксохимия. Металлургия чугуна. – К.: Техніка. – 1971. – №24 – С.53-59.
5. Микрюков Б.Г. Некоторые вопросы автоматического контроля теплового состояния низа доменной печи по информации о температуре фурменных зон / Б.Г.Микрюков, А.И.Капелистый, К.А.Шумилов // Проблемы автоматизированного управления доменным производством. – К.: Наукова думка. – 1974. – С.107-117.
6. О выбросах яркостной температуры фурменных очагов и их связи со сходом шихтовых материалов в доменной печи / А.И.Капелистый, Б.Г.Микрюков, К.А.Шумилов, Н.М.Мищенко // Проблемы автоматизированного управления доменным производством. – Вып. 3. Выставка передового опыта в народном хозяйстве УССР. – К.: Институт автоматики. – 1973. – С.111-114.
7. Ярошевский С.Л. Анализ взаимосвязи между теоретической температурой горения и действительными температурами в горне доменной печи / С.Л.Ярошевский, А.А.Бачинин, Н.Н.Попов // Металлургия чугуна: сб. тр. ДонНИИЧЕРМЕТ. – 1969. – Вып. 8. – М.: Металлургия. – С.145-155.
8. Гайворонський Я.С. Измерение температуры фурменной зоны доменной печи / Гайворонський Я.С., Рудная А.И. //Металлургическая и горнорудная промышленность. –1965. – № 6. – С.5-7.
9. Довгаль А.М. Идентификация интенсивности излучения фурменной зоны / Довгаль А.М., Шумилов К.А. // Проблемы автоматизированного управления доменным производством. – Вып. 3. Выставка передового опыта в народном хозяйстве УССР. – К.: Институт автоматики. – 1973. – С.105-108.
10. Контроль и регулирование теплового режима фурменных зон доменной печи / [В.Г.Макиенко, Р.С.Думбур, Ю.В.Серов и др.] // Металлург. – 1998. – №4. – С.30-31.

Надійшла до редколегії 26.03.2013.

УДК 669.14.018.29.001.8

ПИПТЮК В.П., к.т.н., ст. науч. сотр.
 ПЕТРОВ А.Ф., мл. науч. сотр.
 ПРИХОДЬКО Э.В., д.т.н., профессор
 МОРОЗ В.Ф., к.т.н., ст. науч. сотр.
 КОНДРАШКИН В.А., к.т.н., ст. науч. сотр.
 ГРЕКОВ С.В., мл. науч. сотр.
 АНОСОВА А.А., инженер

Институт черной металлургии НАН Украины, г. Днепропетровск

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО НАТЯЖЕНИЯ РАСПЛАВОВ СТАЛИ

Введение. Поверхностное натяжение жидкой стали оказывает существенное влияние на кинетику процессов, протекающих на границе фаз металл-шлак: рафинирование металла от вредных примесей, модифицирование неметаллических включений, ассимиляция их шлаком и др. Наряду с экспериментальными исследованиями поверх-