

Моделювання ефективності використання пиловугільного палива в доменній плавці

Б. П. ДОВГАЛЮК, Р. В. ВОЛОШИН

Дніпродзержинський державний технічний університет

Сучасне доменне виробництво орієнтовано на пиловугільне паливо (ПВП), яке використовують більше як у 30 країнах світу. В Україні частка чавуну, який виплавляється з використанням ПВП, збільшилася до 44 %. Використання ПВП вимагає контролю: технологічного процесу, окиснення елементів чавуну на фурмах та втрат тепла з охолоджуючою водою. Промодельована ефективність ПВП та розроблена її математичну модель.

Современное доменное производство ориентировано на пылеугольное топливо (ПУТ), которое используют более чем в 30 странах мира. В Украине доля чугуна, который выплавляется с использованием ПУТ, увеличилась до 44%. Использование ПУТ требует контроля технологического процесса, окисления элементов чугуна на фурмах и потерь тепла с охлаждающей водой. Промоделирована эффективность ПУТ и разработана ее математическая модель.

A modern domain production is oriented to the braize fuel that is used more than in 30 countries of the world. In Ukraine the stake of cast-iron that is smelted with the use of increased to 44%. The use of requires control of technological process, oxidization of elements of cast-iron on furms and defervescences with cooling water. To design efficiency of and her mathematical model is worked out.

Постановка задачі Промодельовати ефективність використання пиловугільного палива в доменній плавці з урахуванням окиснення елементів чавуну на фурмах і втрат тепла з охолоджуючою водою та розробити її математичну модель.

Результати роботи Сучасне доменне виробництво орієнтовано на використання комбінованого дуття без природного газу (ПГ). Основною альтернативою ПГ стає пиловугільне паливо (ПВП). Зараз ПВП використовують більше як в 30 країнах. З ПВП у світі щорічно виплавляється більше 600 млн. тон чавуну. Частка заміни коксу ПВП зросла до 40 - 50%, проводяться науководослідні роботи по підвищенню даного показника до 60 - 80% [1]. В закордонній практиці витрата ПВП складає 160 - 270 кг/т чавуну, при цьому витрата коксу знижена до 240 - 300 кг/т чавуну при високому рівні продуктивності доменних печей. В Україні частка чавуну, який виплавляється з використанням ПВП, збільшилася до 44 %, що забезпечило зниження витрати коксу на 10-20 % та виведення зі складу дуття природного газу в кількості 2,5 - 3,0 млрд. м³/рік [1]. Пиловугільне паливо (табл. 1) вважається як вуглець, який горить на фурмах зі своєю тепловіддачею. При цьому враховується теплота розкладання його летучих в горні та витрата тепла на нагрівання пилу до температури горіння. Концентрація ПВП в дутті $v_{\text{ПВП}}$ визначається в г/м³ і може приймати значення від 0 до 200 г/м³ [2]. Найважливішими показником ефективності використання ПВП є коефіцієнт заміни коксу [4]

$$K_3 = \frac{g_{\text{т(р)}} + 23605 C^{\text{P}} \cdot \eta_{\text{CO}} + 121000 H^{\text{P}} \cdot \eta_{\text{H}_2} + 13400 W^{\text{P}} \cdot \eta_{\text{H}_2}}{1,8667 c_k (5250 + 12648 \cdot \eta_{\text{CO}})} \quad (1)$$

кг/кг чавуну та кількість заміненого коксу пиловугільним паливом:

$$E_{\text{к.ПВП}} = K_3 V_{\text{ПВП}}, \text{ кг/хв}, \quad (2)$$

де $V_{\text{ПВП}}$ – кількість ПВП, що вдвугається у піч, кг/хв;

η_{CO} , η_{H_2} – ступінь використання оксиду вуглецю та

Таблиця 1. Хімічний склад ПВП, частка одиниці маси [3].

Хімічний склад	Антрацит	Газове вугілля
C ^P	0,800	0,650

H ^P	0,020	0,060
O ^P	0,015	0,090
N ^P	0,010	0,015
S ^P	0,015	0,015
A ^P	0,130	0,150
W ^P	0,010	0,010
Характеристики складу, м ³ / кг		
\bar{C}	1,4933	1,2133
\bar{O}	0,0167	0,0754
\bar{H}	0,2364	0,6844
\bar{N}	0,0080	0,0120
Теплота неповного згоряння в горні $g_{\text{т(р)}}$, кДж/ кг	7536	4354

водню, відповідно, частка одиниці; c_k – вміст вуглецю в коксі, частка одиниці. З формули (1) видно, що коефіцієнт заміни коксу пиловугільним паливом – це відношення теплоти згоряння кілограму пиловугільного палива в доменні печі до теплоти згоряння кілограму коксу.

Комп'ютерне моделювання (табл. 2) показало, що під час збільшення η_{H_2} з 0,40 до 0,50 при постійному $\eta_{\text{CO}} = 0,4$ значення K_3 виросло для ПВП з антрациту від 0,9849 до 1,0006, а для ПВП з газового вугілля – від 0,8220 до 0,8674 кг/кг. Під час збільшення η_{CO} з 0,40 до 0,50 при постійному $\eta_{\text{H}_2} = 0,4$ значення K_3 незначно зменшилося.

Інститут чорної металургії Національної академії наук України вважає, що перспективним напрямком розвитку доменного виробництва повинно бути будівництво доменних печей великого об'єму, оснащення їх без конусними завантажувальними пристроями (БЗП), сучасними установками для вдування ПВП, системами охолодження та системами контролю процесу плавки [5].

Таблиця 2. Результати моделювання залежності K_3 від зміни η_{H_2} і η_{CO}

η_{H_2}	η_{CO}	K_3 для ПВП з антрацитом	K_3 для ПВП з газового вугілля
0,40	0,40	0,9849	0,8220
0,40	0,45	0,9824	0,8180
0,40	0,50	0,9801	0,8159
0,40	0,40	0,9849	0,8220
0,45	0,40	0,9927	0,8448
0,50	0,40	1,0006	0,8674

Відповідно до цих вимог пропонується автоматизований контроль втрат тепла з охолоджуючою водою та окиснення елементів чавуну на фурмах.

З усередненої інформації за 10 хв визначають: температуру кожного фурменого вогнища $t_{\phi,i}$ та всієї фурменної зони t_{ϕ} (середнє значення $t_{\phi,i}$); теоретичну температуру горіння t_r ; кількість горнового газу (сума $\Sigma = (CO+CO_2)$ в колошниковому газі); температуру в шахті T_3 ; різницю між теоретичною температурою горіння і температурою фурмених вогнищ [4]

$$\Delta t = t_r - t_{\phi}; \quad (3)$$

При відсутності інформації про температуру фурмених вогнищ визначають різницю між теоретичною температурою горіння і температурою в шахті T_3

$$\Delta t_1 = t_r - T_3 \quad (4)$$

Через 20 хв за кожні 10 хв визначають приріст усереднених за 10 хв параметрів:

$$\Delta = \Delta t(t) - \Delta t(t-1); \Delta_1 = \Delta t_1(t) - \Delta t_1(t-1).$$

Якщо $\Delta < -30^\circ C$, то вважають, що збільшилось окиснення елементів чавуну на фурмах.

Якщо $\Delta > 30^\circ C$, то вважають, що зменшилось окиснення елементів чавуну на фурмах.

Аналізують приріст (або зменшення) усереднених за 10 хв параметрів при відсутності інформації про температуру фурмених вогнищ:

Якщо $\Delta_1 < -30^\circ C$, $\Delta\Sigma < 0,5\%$, то вважають, що збільшилось окиснення елементів чавуну на фурмах. Якщо $\Delta_1 > 30^\circ C$, $\Delta\Sigma > 0,5\%$, то вважають, що зменшилось окиснення елементів чавуну на фурмах.

В таблиці 3 наведено результати моделювання залежності температури горіння заліза (t_{FeO}) та кількості CO в горновому газі (CO_r) від міри окиснення заліза на фурмах z , з якої видно, що при окисненні 0,3 частки заліза (30 %) температура фурменого вогнища збільшується на 414 °C.

На основі цієї залежності можемо в темпі реального часу визначати міру зміни окиснення заліза Δz (%) за формулою

$$\Delta z = -0,75\Delta \quad (5)$$

Теоретичну температуру горіння визначали за формулою [4]

$$t_r = \frac{5250 \cdot CO_r + W_{кд} + h'_c}{C_{CO} \cdot CO_r + C_H \cdot H_2 + C_N \cdot N_2}, \quad ^\circ C \quad (6)$$

де: C_{CO} , C_H , C_N - теплоємність відповідних складових горнового газу, кДж/(м³·град.); CO_r , H_2 , N_2 - кількість CO, H₂ та азоту, що утворюються в горновому газі, м³/м³ кд; $W_{кд}$ - тепломісткість комбінованого дуття, кДж/м³ кд; h'_c - тепломісткість вуглецю коксу, який горить на фурмах, визначається

$$h'_c = 0,536(CO_r - \gamma \cdot \delta - 0,0018667v_{пвп}C^p) \times (1,482t_r - 466,83), \quad \text{кДж/м}^3 \text{кд},$$

де γ - кількість вуглецю, що утворюється в горній печі від розкладання м³ природного газу, м³/м³; δ - вміст у комбінованому дутті природного газу, частка одиниці об'єму; $v_{пвп}$ - витрата пиловугільного палива в дутті, г/м³ дуття; C^p - вміст у пиловугільному паливі вуглецю, частка одиниці маси;

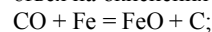
Таблиця 3. Результати моделювання залежності температури горіння заліза (t_{FeO}), різниці $\Delta t = t_{FeO} - t_r$ та кількості CO в горновому газі (CO_r) від міри окиснення заліза на фурмах z .

z	$t_{FeO}, ^\circ C$	$\Delta t, ^\circ C$	$CO_2, \%$	$\Delta CO_2, \%$
0,0	1965	0,00	37,968	0,00
0,10	2111	146	35,519	-2,449
0,20	2248	283	32,87	-5,098
0,30	2379	414	29,994	-7,974
0,40	2503	538	26,86	-11,108
0,50	2621	656	23,432	-14,536

При окисненні заліза на фурмах температуру горіння визначали за формулою [4]

$$t_{FeO} = \frac{5250CO_r(1-z) + 12047,83zCO_r + W_{кд} + h'_c}{C_{CO} \cdot CO_r(1-z) + C_H \cdot H_2 + zCO_r \cdot C_{FeO} + C_N \cdot N_2}, \quad C \quad (7)$$

де z - частка CO горнового газу, яка умовно витрачається на окиснення заліза за реакцією



Тепломісткість вуглецю коксу, який горить на фурмах (h'_c), визначали

$$h'_c = 0,536[CO_r(1-z) - \gamma\delta - 0,0018667v_{пвп}C^p] \cdot (1,482t_m - 466,83), \quad \text{кДж/м}^3 \text{кд},$$

Теплота утворення FeO складає 12047,83 кДж/м³ FeO.

Такий характер зміни температури фурмених вогнищ як t_{FeO} спостерігався під час довготривалого її вимірювання спеціальним датчиком [6].

Але тепер по іншому пояснюємо характер зміни температури фурмених вогнищ: коливання температури з амплітудою від 100 до 300 °C якраз і спричиняються зміною процесу окиснення елементів чавуну на фурмах, а не характером надходження коксу в зону горіння, як стверджувалося раніше [6]. З цього погляду також аналізуються результати досліджень взаємозв'язку між температурою фурмених вогнищ і вмістом кремнію в чавуні, в яких отримані значення коефіцієнта парної кореляції не перевищували величини 0,5 [6]: якщо окиснення елементів чавуну на формах стабільне, то температура фурмених вогнищ може відображати тепловий стан горну і залежність вмісту кремнію в чавуні від температури фурм буде тісною і прямою; при суттєвому коливанні окиснення елементів чавуну залежність вмісту кремнію в чавуні від температури фурм буде зворотною.

Контролювати коливання процесу окиснення елементів чавуну на фурмах можна за інформацією про склад колошникового газу, теоретичну температуру горіння і температуру фурмених вогнищ, яку необхідно контролювати спеціальними датчиками. При цьому доцільно, щоб ці датчики відображали реальну температуру. В таких випадках зміна окиснення елементів чавуну на фурмах буде супроводжуватися зміною різниці

між температурою фурмених вогнищ і теоретичною температурою горіння.

Склад колошникового газу необхідно контролювати мало інерційними газоаналізаторами з незначним часом запізнення (до 1 хв), оскільки зразу ж після окиснення заліза на фурмах через 10 - 20 хв починається його пряме відновлення.

Контроль температури фурмених вогнищ не завжди забезпечено. В таких випадках необхідно контролювати температуру в шахті печі за допомогою спеціальних зондів, а коливання процесу вторинного окиснення елементів чавуну на фурмах визначати за приростом температури в шахті та порівнянням його з приростом теоретичної температури і зміною суми (CO+CO₂) в колошниковому газі.

Кількість тепла, що витрачається з охолоджувальною водою визначають [7]:

для верхньої частини печі

$$Q_1 = \sum_{i=1}^n G_i \Delta t_i c_v, \text{ кДж/хв}; \quad (8)$$

для нижньої частини печі

$$Q_2 = \sum_{j=1}^n G_j \Delta t_j c_v, \text{ кДж/хв.}, \quad (9)$$

де G_i - кількість води, що проходить через i -й холодильник верхньої частини печі, кг/хв; G_j - кількість води, що проходить через j -й холодильник нижньої частини печі, кг/хв; Δt_i - різниця температури вихідної і вхідної води i -го холодильника верхньої частини печі, °C; Δt_j - різниця температури вихідної і вхідної води j -го холодильника нижньої частини печі, °C; c_v - теплоємність води, кДж/(кг·°C); v - кількість холодильників верхньої частини печі; n - кількість холодильників нижньої частини печі.

Втрати тепла визначали на кг виплавляемого чавуну (P_m , кг/хв):

$$q_1 = Q_1/P_m, \text{ кДж/кг}, \quad (10)$$

$$q_2 = Q_2/P_m, \text{ кДж/кг}, \quad (11)$$

З метою визначення доцільності контролю втрат тепла промоделивали можливі їх значення та вплив на тепловий стан плавки.

Витрату води по основних зонах для типових доменних печей об'ємом 2000 м³ [8] (табл.4). Витрату тепла розраховували для перепаду температури на 1°C. Продуктивність печей за годину P_m визначали через об'єм печей V_n та коефіцієнт використання корисного об'єму печі (КВКО, приймаючи його значення 0,8) за формулою [7]

$$P_m = 1000V_n/24 \text{ КВКО}, \text{ кг/г}. \quad (12)$$

Таблиця 4. Результати моделювання.

Доменна піч 2000 м³ КВКО=0,8; $P_m=104166$ кг/г

Зони печі	Витрата води, т/г	Q при Δt=1°C, кДж/г	q, кДж/кг
1	2	3	4
Нижня лещаць	72	301680	2,896
Верхня лещаць	74	310060	2,976
Горн	156	653640	6,27
Фурмена зона	168	770960	7,40

1	2	3	4
Фурмені прилади	594	2488860	23,89
Шлакові прилади	69	289110	2,775
Запличики	433	1814270	17,47
Шлаковий стопор	9	37710	0,362
Шахта	970	4064300	38,83
Всього на піч	2545	10663550	102,869

В нижній частині печі витрата тепла дорівнює 64,039 кДж/кг чавуну, а у верхній частині - 38,83 кДж/кг чавуну.

Висновки

Допустима похибка визначення показника теплового стану печі T_n , є такий його приріст, при якому рекомендації на зміну регулюючих дій не перевищують зону нечутливості. По температурі дуття (Δt_d) її можна допустити ± 20 °C, а по масі коксу в подачі ± 25 кг. Виходячи з цього отримали допустиму похибку показника T_n : $\Delta T_n=37$ кДж/кг чавуну [4]. Це значить, що зміна приходу тепла на 37 кДж/кг чавуну і більше, як верхній так і в нижній частині печі буде спричиняти коливання теплового стану плавки і якості чавуну.

З таблиці 4 слідує, що навіть зміна температури охолоджуючої води на 1°C значно перевищує 37 кДж/кг чавуну. Якщо ж перепад температури води Δt в середньому прийняти 6-8 °C, а для фурм 12-14 °C. [8], то вплив таких втрат тепла на тепловий стан плавки буде надто суттєвим і викличе значну зміну параметрів якості чавуну та продуктивності печі. Отже, автоматизований контроль втрат тепла з охолоджуючою водою необхідний, особливо підчас використання ПВП.

ЛІТЕРАТУРА

1. В.В.Климчук Технология и эффективность замены природного газа и части кокса пылеугольным топливом на ПАО «ММК им. Ильича» / В.В.Климчук, Н. В. Косолап, И. А. Лукьяненко и др. // Металл и литье Украины. — 2013. — №10. — С. 28—35.
2. Товаровский И. Г., Лялюк В. П. Эволюция доменной плавки. / Товаровский И. Г., Лялюк В. П. // Дніпропетровськ. Пороги. — 2001. — 425 с.
3. Рамм А. Н. / Современный доменный процесс. // М. : Металлургия. 1980. — 304 с.
4. Довгалюк Б. П. Автоматизована система керування технологічними процесами доменної плавки. // Дніпропетровськ : ДДТУ. — 2009. — 245 с.
5. В. И. Большаков Опыт и перспективы применения пылеугольного топлива на доменных печах Украины / В. И. Большаков, А. Л. Чайка, В. В. Лебедь, А. А. Сохацкий // Металл и литье Украины. — 2013. — №10. — С.5—10.
6. Довгалюк Б. П. 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.

-
7. Довгалюк Б. П. Вплив втрат тепла з охолоджувальною водою і колошниковим газом на тепловий режим плавки. / Б. П. Довгалюк, Р. В. Волошин // Ма-
тематичне моделювання. — 2013. — №1 (28). — С.64—67.
8. Справочник. Доменное производство. М. : Металлургиздат. — 1963. — 266 с.

пост.04.12.14