

МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ТА АЛГОРИТМИ



Б.П. ДОВГАЛЮК, д.т.н., професор

Р.В. ВОЛОШИН, магістр

Дніпродзержинський державний технічний університет, м. Кам'янське

Моделювання ефективності використання пиловугільного палива в доменній плавці

Сучасне доменне виробництво орієнтовано на пиловугільне паливо (ПВП), яке використовують більше як у 30 країнах світу. Використання ПВП вимагає контролю його ефективності, окиснення елементів чавуну на фурмах та втрат тепла з охолоджуючою водою. Промодельована ефективність використання ПВП.

Постановка задачі

Промодельовати ефективність використання пиловугільного палива в доменній плавці з урахуванням коливання окиснення елементів чавуну на фурмах і втрат тепла з охолоджуючою водою.

Результати роботи

Сучасне доменне виробництво орієнтовано на використання комбінованого дуття без природного газу (ПГ). Основною альтернативою ПГ стає пиловугільне паливо (ПВП). Зараз його використовують більше як в 30 країнах. 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 (1).

Пиловугільне паливо 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 показниками ефективності використання ПВП є: коефіцієнт заміни коксу [1]

$$K_3 = \frac{g_{m(p)} + 23605C^p \eta_{co} + 121000H^p \eta_{n2} + 13400W^p \eta_{n2}}{1,8667c_k (5250 + 12648 \cdot \eta_{co})}, \quad (1)$$

кг/кг;
 кількість заміненого коксу пиловугільним паливом $E_{k, \text{пвп}} = K_3 V_{\text{пвп}}$, кг/хв.; прибуток від використання ПВП $ПО = E_{k, \text{пвп}} C_k - V_{\text{пвп}} C_{\text{пвп}} - V_o C_o + (P_{\phi} - P_3) E$, грн /хв, де $V_{\text{пвп}}$ — кількість ПВП, що вдувається у піч, кг/хв.; V_o — кількість кисню, що вдувається у піч, м³/хв; η_{co} , η_{n2} — ступінь використання оксиду вуглецю та водню, відповідно, частка одиниці; c_k — вміст вуглецю в коксі, частка одиниці маси; C^p , H^p , W^p — вміст в ПВП, відповідно, вуглецю, водню та води, кг/кг; C_k , $C_{\text{пвп}}$, C_o — ціна коксу, ПВП та технологічного кисню; E — умовно постійні витрати на чавун; P_{ϕ} , P_3 — фактична і задана продуктив-

ність печі; $g_{m(\text{ж})}$ — теплота згоряння ПВП в горні печі кДж/кг,

$$g_{m(p)} = Q_H^p - 121000H^p - 121400S^p - 13400W^p - 23605C^p, \quad (2)$$

де Q_H^p — повна теплота згоряння ПВП, кДж/кг; S^p — вміст сірки у ПВП, кг/кг.

З формули [1] видно, що коефіцієнт заміни коксу пиловугільним паливом — це відношення теплоти згоряння кг пиловугільного палива в доменні печі до теплоти згоряння кг коксу. Комп'ютерне моделювання показало, що під час збільшення η_{n2} з 0,40 до 0,50 при постійному $\eta_{co} = 0,4$ 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 $\eta_{n2} = 0,4$ значення K_3 майже не змінилося.

Перспективним напрямком розвитку доменного виробництва повинно бути будівництво доменних печей великого об'єму, оснащення їх сучасними установками для вдування ПВП, системами охолодження та системами контролю процесу плавки (4). Нами пропонується автоматизований контроль втрат тепла з охолоджуючою водою та окиснення елементів чавуну на фурмах.

Контроль коливання окиснення елементів чавуну на фурмах. З усередненої інформації за 10 хв визначають: температуру кожного фурменого вогнища $t_{\phi,i}$; та всієї фурменої зони t_{ϕ} (середнє значення $t_{\phi,i}$); теоретичну температуру горіння t_r ; різницю між теоретичною температурою горіння та температурою фурмених вогнищ [3]

$$\Delta t = t_m - t_{\phi}. \quad (3)$$

Через 20 хв за кожні 10 хв визначають приріст усереднених за 10 хв параметрів: $\Delta = \Delta t(t) - \Delta t(t-1)$.

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

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

В таблиці 1 наведено результати моделювання залежності температури горіння заліза (t_{FeO}) та кількості CO в горновому газі (CO_2) від міри окиснення заліза на фурмах z , з якої видно, що при окисненні 0,3 частки заліза температура фурменого вогнища збільшується на 414 °С. На основі цієї залежності можемо в темпі реального часу визначати міру зміни окиснення заліза Δz (в %) за формулою

$$\Delta z = -0,75 \Delta \quad (4)$$

Таблиця 1. Результати моделювання залежності температури горіння заліза (t_{FeO}), різниці $\Delta t = t_{FeO} - t_m$ та кількості CO в горновому газі (CO_2) 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
0,05	2039	74	36,767	-1,201
0,10	2111	146	35,519	-2,449
0,15	2180	215	34,221	-3,747
0,20	2248	283	32,87	-5,098
0,25	2314	349	31,462	-6,506
0,30	2379	414	29,994	-7,974
0,35	2441	476	28,461	-9,507
0,40	2503	538	26,86	-11,108
0,45	2562	597	25,185	-12,783
0,50	2621	656	23,432	-14,536

Теоретичну температуру горіння визначали за формулою [5]

$$t_m = \frac{5250 CO_2 + W_{кд} + h'_c}{C_{CO} \cdot CO_2 + C_H \cdot H_2 + C_N \cdot N_2}, ^\circ C \quad (5)$$

де C_{CO} , C_H , C_N — теплоємність відповідних складових горнового газу, кДж/(м³·град.); CO_2 , H_2 , N_2 — кількість CO , H_2 та азоту, що утворюються в горновому газі, м³/м³ кд; $W_{кд}$ — теплоємність комбінованого дуття, кДж/м³ кд., визначається

$$W_{кд} = C_d(t_d - \Delta t_\lambda \cdot \lambda) + v_{nen}(C_{nen} t_{nen} - 13,4 W^p - 121,4 S^p),$$

де t_d — температура нагрітого дуття, °С; t_{nen} — температура пиловугільного палива, °С; C_d — теплоємність нагрітого дуття, кДж/(м³·град.); C_{nen} — теплоємність пиловугільного палива, кДж/(г·град.); λ — вологість дуття, г/м³; v_{nen} — витрата пиловугільного палива, г/м³; Δt_λ — зниження температури дуття, еквівалентне витраті тепла на розкладання в горні печі г пари води. Його значення для температури дуття 1000, 1100, 1200 та 1300 °С відповідно дорівнює: 9,55; 9,45; 9,35; 9,31 °С [3]; h'_c — теплоємність вуглецю коксу, який горить на фурмах, визначається

$h'_c = 0,536(CO_2 - 0,0018667 v_{nen} C^P) \cdot (1,482 t_m - 466,83)$ кДж/м³кд. При окисненні заліза на фурмах теоретичну температуру горіння визначали за формулою [6]

$$t_{FeO} = \frac{5250 CO_2 (1-z) + 12047,83 z CO_2 + W_{кд} + h'_c}{C_{CO} \cdot CO_2 (1-z) + C_H \cdot H_2 + z CO_2 \cdot C_{FeO} + C_N \cdot N_2}, ^\circ C, \quad (6)$$

де z — частка CO горнового газу, яка умовно витрачається на окиснення заліза за реакцією $CO + Fe = FeO + C$.

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

$$h'_c = 0,536 [CO_2 (1-z) - 0,0018667 \cdot v_{nen} C^P] \times (1,482 t_m - 466,83), \text{ кДж/м}^3 \text{кд.} \quad (7)$$

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

Контроль втрат тепла з охолоджуючою водою. Кількість тепла, що витрачається з охолоджувальною водою визначають [8]:

для верхньої частини печі

$$Q_1 = \sum_{i=1}^6 G_i \Delta t_i c_{ei}, \text{ кДж/хв;} \quad (8)$$

для нижньої частини печі

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

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, °С; Δt_j — різниця температури вихідної і вхідної води j -го холодильника нижньої частини печі, °С; c_{ei} — теплоємність води, кДж/(кг·°С); e — 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 промодельовали можливі їх значення та вплив на тепловий стан плавки. Витрату води по основних зонах для типових доменних печей об'ємом 2000 м³ визначили за табл. 2. Витрату тепла розраховували для перепаду температури на 1°С. 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 [12]

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

Таблиця 2. Результати моделювання

Доменна піч 2000 м ³ КВКО = 0,8; $P_m = 104166$ кг/г Зони печі	Витрата води, т/г	Q при $\Delta t = 1^\circ C$ кДж/г	q , кДж/кг
Нижня лещадь	72	301680	2,896
Верхня лещадь	74	310060	2,976
Горн	156	653640	6,27
Фурмена зона	168	770960	7,40
Фурмені прилади	594	2488860	23,89
Шлакові прилади	69	289110	2,775
Заплечики	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. 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_0) її можна допустити ± 20 °С, а по масі коксу в подачі ± 25 кг. Виходячи з цього отримали допустиму похибку показника T_n : $\Delta T_n = 37$ кДж/кг чавуну (3). Це значить, що зміна приходу тепла на 37 кДж/кг чавуну і більше, як верхній так і в нижній зоні печі буде спричиняти коливання теплового стану плавки і якості чавуну.

Висновки

З таблиці 2 слідує, що навіть зміна температури охолоджуючої води на 1 °С значно перевищує 37 кДж/кг чавуну. Якщо ж перепад температури води Δt в середньому прийняти 6—8 °С, а для фурм 12—14 °С (5), 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 під час використання ПВП.

ЛІТЕРАТУРА

1. 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. Днепропетровськ, Пороги. 2001. – 425 с.
3. Довгалюк Б.П. Автоматизована система керування технологічними процесами доменної плавки. Дніпродзержинськ: – ДДТУ, 2009. – 245 с.
4. 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.
5. Довгалюк Б.П. Вплив втрат тепла з охолоджувальною водою і колошниковим газом на тепловий режим плавки. / Б.П. Довгалюк, Р.В. Волошин // *Математичне моделювання*. – 2013. – № 1 (28). – С. 6–67.

пост. 30.03.2016

А.М. СОКОЛ, к.т.н., доцент

Дніпродзержинський державний технічний університет, м. Кам'янське

Двовимірна математична модель теплофізичних процесів, які протікають при отриманні листової заготовки за допомогою валків-кристалізаторів

Метою роботи є дослідження процесів, що протікають під час обертання валків-кристалізаторів на установці неперервного лиття. Запропоновано відповідну двовимірну математичну модель теплофізичних процесів без врахування процесів деформації. Створено програмне забезпечення, яке дозволяє проводити обчислювальні експерименти з різними значеннями визначальних параметрів процесу, що моделюється (температура розливу, інтенсивність охолодження, швидкість витягування).

Постановка проблеми

В умовах зростання цін на енергоносії і поступового наближення їх до рівня середньоєвропейських, пріоритетним напрямом розвитку металургії України є впровадження сучасних енергозбережних технологій, які дозволяють понизити відповідну долю витрат в собівартості прокату і підвищать конкурентоспроможність вітчизняної металопродукції на зовнішніх ринках. Однією з найбільш перспективних технологій виробництва металевих листів з точки зору економії енергії і екологічності є процес валкового розливання.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

З публікацій [1-3] витікає, що детальне вивчення потребують, зокрема, такі питання:

- шляхи забезпечення рівномірного теплового розподілу в потоці розплаву вздовж валків-кристалізаторів;
- забезпечення необхідної якості металевих листів (вигоди до структури металу та його температури на виході з установок);
- підвищення бездефектної продуктивності литійно-прокатних агрегатів з двохвалковими кристалізаторами;
- пошук раціональних та оптимальних режимів роботи обладнання, створення на їх основі допоміжних ме-

тодичних матеріалів для операторів та автоматизація процесу виробництва.

Розв'язання цих питань залежить від ступеня вивченості гідродинамічних особливостей руху металу в загальному потоці та в міжвалковому зазорі та пов'язаних процесів тепломасообміну. Результатів експериментальних досліджень процесу валкового отримання листового прокату відомо небагато, тому дослідники широко використовують методи комп'ютерного моделювання [4-9]. З робіт, присвячених теоретичному опису процесів, що протікають між валками-кристалізаторами, що обертаються, можна виділити праці В. Клосса [10], К. А. Сантоса [11], Д. М. Жанга [12], а також колективу російських учених [13] та їхніх українських колег [14]. Однією з основних робіт присвячених моделюванню процесу перебігу металу у валковому кристалізаторі є робота Р. Гутрі і Р. Тавареса [15]. Також відомі роботи бразильських учених із створення моделі течії металу [11], в якій методом кінцевих різниць вирішується лише температурне завдання. Співробітниками Шанхайського університету і дослідницького інституту фірми "Baoshan Iron & Steel", Шанхай, Китай [4] було розроблено модель температурно-гідродинамічного режиму, яка дозволила проаналізува-