

УДК 669.184.244.66.012.1

В.С. Богушевський, К.О. Сергєєва

## МОДЕЛЬ ДОВОДКИ КИСНЕВО-КОНВЕРТЕРНОЇ ПЛАВКИ СТАЛІ ЗА ЗАДАНОЮ ТЕМПЕРАТУРОЮ І ВМІСТОМ ВУГЛЕЦЮ

In order to increase the accuracy of process control refinement converter smelting, a series of mathematical models of controlling were developed. Melting model was created to calculate the charge ("static control"), control fuse in the process of purging ("dynamic management") and finishing melting after the measurement of carbon content and temperature of the bath without interrupting the purge and calculation of reductants. The influence of control actions on the process of finishing converter smelting was studied. Static model for controlling final blow smelting which is based on management "positive experience" was developed. The influence of the initial parameters of the process of cooling and heating bath in the final blow. The best results for temperature control were achieved by creating a model including static, dynamic part of the management and operational development of heat. Each part provides filtering heats on the reliability of information and input for the specified parameters and conditions for the implementation of technology. Each heat with reliable information is recorded as a fusion of "good practice" in a particular class and is used in the further technological process.

**Keywords:** temperature, algorithm, a mathematical model-oxygen melting lance, tuyere.

### Вступ

Конвертерне виробництво сталі є безперервно-циклічним зі складними організаційними зв'язками, що включають низку технологічних процесів (виплавка, доводка і розливка сталі). Суть конвертерного виробництва сталі полягає в продуванні рідкого чавуну киснем, у результаті чого елементи чавуну – вуглець, силіцій, манган, фосфор та інші – окиснюються, а продукти реакцій переходять у шлакову і газову фази [1].

Киснево-конвертерна плавка вирізняється складністю фізико-хімічних процесів, проходить з великою швидкістю і за високої температури, характеризується багаторежимністю функціонування і великою розмірністю задач, що розв'язуються, наявністю нестационарних шумів і завад вимірюванням, має істотний дрейф об'єкта.

За таких умов оператор фізично не встигає переробити великий обсяг інформації, вибрати найкращий режим і оперативно втрутитися в хід плавки. Як наслідок, 40 % плавок на вітчизняних підприємствах потребують коригування після завершення процесу. Автоматизація конвертерної плавки дає змогу істотно підвищити ефективність і якість сталі, що виплавляється.

Існуючі моделі керування киснево-конвертерною плавкою або взагалі не розглядають моделі коригування [2, 3], або розглядають їх у відриві від загальної моделі керування [4, 5]. В першому випадку ігнорується сам факт можливості коригування, що в умовах поганої підготовки шихтових матеріалів і великого сортаменту виплавлюваних марок сталі не відповідає дійснос-

ті, у другому – внаслідок можливого значного відхилення кінцевих параметрів плавки від заданих маркою сталі провести якісне коригування дуже важко. Це призводить до зменшення продуктивності конвертера й погіршує якість сталі.

### Постановка задачі

Метою досліджень є підвищення точності керування доводкою конвертерної плавки за рахунок створення математичних моделей керування, що побудовані на основі керування за плавками позитивного досвіду.

### Методика проведення досліджень

Основою статичного керування конвертерною плавкою є розрахунок керуючих діянь до початку продувки. Неправильно розраховані діяння призводять до необхідності проведення коректувань за такими режимами:

а) додувки:

- 1) при нормальному положенні фурми;
- 2) те ж з переводом на іншу марку сталі;
- 3) при високому положенні фурми;
- 4) те ж з переводом на іншу марку сталі;

б) охолодження:

- 1) з додувкою;
- 2) те ж з переводом на іншу марку сталі.

При статичному керуванні плавкою критерій  $I$  як функцію керуючих діянь можна подати у вигляді суми ймовірностей  $P$  додувки, охолодження після першої повалки та проведення коректуючих операцій з переводом плавки на іншу марку сталі:

$$\begin{aligned}
I(m_{\text{бп}}, m_{\text{в}}, m_{\text{вп}}, v_{\text{ср}}, \bar{H}) = & \alpha_1 P[(t_1 \leq t_{\text{м}} < t_3), \\
& (C_{\text{м}} > C_3), (S_{\text{м}} \leq S_1)] + \alpha_2 P[(t_2 \leq t_{\text{м}} < t_1), \\
& (C_1 \leq C_{\text{м}} \leq C_3), (S_1 \leq S_{\text{м}} < S_2)] + \alpha_3 P[(C_{\text{м}} < C_2), \\
& (t_1 \leq t_{\text{м}} \leq t_3)(S_{\text{м}} \leq S_1)] + \alpha_4 P[(t_{\text{м}} \leq t_2), (C_{\text{м}} \leq C_3), \\
& (S \leq S_2)] + \alpha_5 P[(t_{\text{м}} > t_3), (C_{\text{м}} > C_3), \\
& (S_1 \leq S_{\text{м}} < S_2)] + \alpha_6 P[(t_{\text{м}} > t_3), \\
& (C_{\text{м}} \leq C_2), (S_{\text{м}} > S_2)], \quad (1)
\end{aligned}$$

де  $m_{\text{бп}}$ ,  $m_{\text{в}}$ ,  $m_{\text{вп}}$  – маса брухту, вапна та вапняку відповідно, т;  $v_{\text{ср}}$ ,  $\bar{H}$  – середньоінтегральне значення відповідно інтенсивності дуття, м<sup>3</sup>/хв, і положення фурми над рівнем спокійного металу, калібр;  $\alpha_1, \dots, \alpha_6$  – вагові коефіцієнти;  $t_1, t_3$  – відповідно нижня та верхня межі температури металу при зливі з конвертера, °С;  $C_1, C_3$  – відповідно нижня та верхня межі по вмісту вуглецю в металі при зливі з конвертера, %;  $S_1$  – верхня межа по вмісту сірки у металі, %;  $t_2, C_2, S_2$  – межі відповідно температури, вмісту вуглецю та сірки після першої повалки, що потребують проведення коректуючих операцій з переводом плавки на іншу марку сталі.

Тут вираз з коефіцієнтом  $\alpha_1$  характеризує вірогідність додувки на вуглець відповідно до режиму додувки при нормальному положенні фурми. Вираз з коефіцієнтом  $\alpha_2$  характеризує вірогідність додувки на вуглець відповідно до режиму додувки при переводі на іншу марку

сталі, з коефіцієнтом  $\alpha_3$  – вірогідність додувки при високому положенні фурми,  $\alpha_4$  – додувка по сірці при переведенні на іншу марку сталі,  $\alpha_5$  – охолодження з додувкою,  $\alpha_6$  – охолодження з переводом на іншу марку сталі.

Згідно з проведеними нами дослідженнями [6] критерій (1) апроксимуємо виразом

$$\begin{aligned}
I(m_{\text{вп}}, m_{\text{в}}, m_{\text{бп}}, \tau_{\text{в}}, v, \bar{H}) = & \alpha_7 M(C_{\text{м}} - C^*)^2 + \\
& + \alpha_8 M(t_{\text{м}} - t^*)^2 + \alpha_9 M(S_{\text{м}} - S^*)^2,
\end{aligned}$$

де  $\alpha_7, \alpha_8, \alpha_9$  – коефіцієнти, що визначаються масштабами змінних, що входять у критерій, а також залежать від співвідношення частот коригувань через непопадання по вуглецю, температурі та сірці відповідно;  $M$  – математичне сподівання;  $C^*, t^*, S^*$  – “точки прицілу” по вуглецю, температурі та сірці в металі, що визначаються методом експертних оцінок залежно від виплавлюваної марки сталі й технологічної ситуації на початку плавки (наявність замовлення, готовність і стан сталерозливного ковша, майданчика та установки позапічної обробки тощо).

Задача програмування – знайти такі значення керуючих діянь, за яких величина  $I$  набувала б мінімального значення за обмежень, що викладені в [6].

Нами визначено вплив параметрів початкових умов на попадання плавки у задані по температурі межі (табл. 1, 2). Прийняте позначення ймовірностей появ подій, %:  $NQ$  – нагріву та  $NT$  – охолодження.

Таблиця 1. Вплив параметрів початкових умов на нагрів ванни у процесі додувки  $NQ$

Параметр	$NQ(p)$ , %	$R$	$\sigma$ , %	$P$
$C_{\text{ч}}$	$-248 + 64,1 C_{\text{ч}}$	0,680	14,1	< 0,900
$Si_{\text{ч}}$	$50,2 - 18,8 Si_{\text{ч}}$	0,258	23,5	< 0,900
$Mn_{\text{ч}}$	$102,9 - 91,8 Mn_{\text{ч}}$	0,955	7,2	> 0,950
$P_{\text{ч}}$	$-69,7 + 1950 P_{\text{ч}}$	0,834	9,5	< 0,900
$S_{\text{ч}}$	$22,3 + 134 S_{\text{ч}}$	0,134	24,2	< 0,900
$C_3$	$12,5 + 107 C_3$	0,714	14,1	> 0,950
$(S_{\text{ч}} - S_3)/S_3$	$47,1 - 35,7 (S_{\text{ч}} - S_3)/S_3$	0,542	15,8	> 0,950
$V_{\text{п}}$	$160 - 2,62 V_{\text{п}}$	0,514	16,1	> 0,950
$Q_{\text{п}}$	$182 - 0,138 Q_{\text{п}}$	0,939	7,6	> 0,950

Примітка. “з” – задане значення параметра.

Таблиця 2. Вплив параметрів початкових умов на післяпродувочне охолодження металу  $NT$ 

Параметр	$NT, \%$	$R$	$\sigma, \%$	$P$
$C_q$	$157 - 27,5 C_q$	0,314	24,3	$< 0,900$
$Si_q$	$66,4 - 58,5 Si_q$	0,601	13,1	$> 0,950$
$Mn_q$	$-50,4 + 108 Mn_q$	0,956	7,6	$> 0,990$
$P_q$	$164 - 2330 P_q$	0,230	25,5	$< 0,900$
$S_q$	$-17,2 + 1210 S_q$	0,738	13,8	$> 0,950$
$C_3$	$66,4 - 149 C_3$	0,864	9,6	$> 0,950$
$(S_q - S_3)/S_3$	$29 + 35,1(S_q - S_3)/S_3$	0,526	13,1	$> 0,950$
$V_n$	$-53,5 + 2,02 V_n$	0,514	7,7	$> 0,990$
$Q_n$	$-56,3 + 0,0688 Q_n$	0,624	13,3	$> 0,950$

Питомі значення кисневого  $V_n$ , м<sup>3</sup>/т, і теплового  $Q_n$ , кДж/т, потенціалів металошихти визначаємо за рівняннями розрахунку шихти [7], відповідно перетворюючи їх відносно шуканих величин:

$$V_n = m_q [12,2C_q - C^*] + 5,82Si_q + 1,48Mn_q + 10,2P_q / (m_{бр} + m_q)$$

і

$$Q_n = 10m_q [14100(C_q - C^*) + 22900Si_q + 4150Mn_q + 36200P_q + 57,5t_q - 88000m_{бр}/m_q - 10^{-3}Q_r(\tau_n)] / (m_{бр} + m_q),$$

де  $Q_r(\tau_n)$  – питома теплота, що втрачається порожниною конвертера випромінюванням через горловину як функція тривалості простою, Дж;  $C_q$ ,  $Si_q$ ,  $Mn_q$ ,  $P_q$  – вміст вуглецю, силіцію, мангану та фосфору, %;  $\tau_n$  – час продувки, хв.

У табл. 1 наведений вплив параметрів початкових умов на нагрів ванни у процесі додувки. Значущими виявились залежності з такими параметрами:  $Mn_q$ ,  $C_3$ ,  $(S_q - S_3)/S_3$ ,  $V_n$  і  $Q_n$ . Зменшення кількості додувок на нагрів зі збільшенням теплового потенціалу ванни пояснюється тим, що такі плавки збалансовані по теплу й не потребують штучних заходів для підвищення температури ванни.

У табл. 2 наведений вплив параметрів початкових умов на післяпродувочне охолодження металу. Значущими виявились залежності з параметрами  $Si_q$ ,  $Mn_q$ ,  $S_q$ ,  $C_3$ ,  $(S_q - S_3)/S_3$ ,

$V_n$  і  $Q_n$ . При збільшенні кисневого та теплового потенціалу плавки підвищується кількість теплоти, що виділяється в процесі продувки, та в кінцевому підсумку підвищується кількість плавок, що потребують післяпродувочного охолодження. Такі самі наслідки має збільшення вмісту мангану в чавуні та заданого вмісту вуглецю в металі. Протилежна залежність від вмісту силіцію в чавуні пояснюється кореляцією між вмістом силіцію та масою металобрухту на плавку. Залежність кількості плавок, що потребують післяпродувочного охолодження, від вмісту сірки в чавуні пояснюється кореляцією між вмістом силіцію та сірки. Збільшення кількості додувок на нагрів зі збільшенням заданого вмісту вуглецю пояснюється тим, що в таких плавках зменшується тепловий потенціал. Зменшення кількості додувок на нагрів ванни зі збільшенням кількості сірки, що видаляється  $((S_q - S_3)/S_3)$ , пояснюється тим, що сприятливі умови для видалення сірки, тобто підвищення основності, пов'язані насамперед із підвищенням окисненості шлаку для засвоєння вапна, що відбувається при збільшенні температури ванни. При збільшенні кисневого потенціалу шихти зменшується кількість додувок на нагрів ванни, оскільки реакції окиснення екзотермічні, внаслідок чого ванна нагрівається.

Рівняння множинної регресії:

$$NQ = 134 + 41,5C_q - 7,45Si_q - 16,2Mn_q + 46,6P_q - 84,6C_3 - 38,3(S_q - S_3)/S_3 + 1,61V_n + 0,000152Q_n;$$

$$R = 0,667; \sigma = 14,4 \%; P > 0,950,$$

$$NT = -1,52 - 10,9C_q - 22,8Si_q + 26,4Mn_q - \\ - 568P_q + 0,51C_3 + 27,9(S_q - S_3)/S_3 + \\ + 1,61V_n + 0,000152Q_n;$$

$$R = 0,787; \sigma = 12,9\%; P > 0,950,$$

де  $R$  – коефіцієнт множинної кореляції,  $\sigma$  – середньоквадратичне відхилення, %;  $P$  – достовірність коефіцієнта кореляції.

Хоча лінійні моделі є простими, високі залишкові середньоквадратичні відхилення в багатьох випадках не дають змоги оптимально провести плавку. Підвищити точність лінійних моделей можна, звузивши межі зміни параметрів та змінних. Вираз у вигляді логічних умов обмеження є невід’ємною частиною таких моделей. Ці умови часто називають фільтрами, що виражають вимоги технологічної логіки. Для формування цих обмежень можна використовувати автоматичну класифікацію, що виділяє кластери в умовах нормального протікання технологічного процесу.

Таким чином, проводиться кластеризація плавок у просторі всіх технологічних параметрів (початкових умов), та в кожному кластері будується своя лінійна регресійна модель. Задача класифікації, що формується при цьому, має особливості: у просторі кількісних ознак потрібно (за наявності тільки змішаної вибірки точок) на основі прийнятої міри близькості виділити класи при незаданому апріорі їх числі. Клас є результатом рівномірного розсіювання точок в обмеженій області простору ознак, центри класів у яких розподілені рівномірно.

Основою математичного описання технології киснево-конвертерної плавки є розрахунок шихти (“статичне” керування плавкою). За вибіркою траєкторій керування успішно проведених плавок ( $U_1[\tau], \dots, U_n[\tau]$ ) можна говорити про виділення в реальній траєкторії керування  $U_j[\tau]$  двох складників: програмної частини  $U_{iпр}[\tau]$  і додаткового керування  $U_i[\tau]$ , що пов’язане як з неточним визначенням початкового стану плавки, так і з дією збурень. Таким чином, стратегія керування не може бути зведена тільки до детермінованої, а має детерміновану частину по вибору програми і стохастичну для додаткових керуючих діянь [8, 9].

Відстань між двома траєкторіями керування  $\Delta U_i[\tau]$  і  $\Delta U_j[\tau]$  відповідно для  $i$  і  $j$ -ї плавки вибірки становить  $d(\Delta U_i[\tau], \Delta U_j[\tau])$ . Вона по-

кладена в основу класифікації траєкторій керування з розбиттям на класи  $S_1, S_2, \dots, S_k$  та щоб кожному класу  $S_i$  відповідали траєкторії керування  $S_i \approx \{U_{i1}[\tau], U_{ik}[\tau]\}$ , які реалізують одну програму керування  $U_{iопт}[\tau]$  з різними додатковими керуючими діями  $\Delta U_i[\tau]$ . Цю умову можна виконати відповідним вибором функції  $d(\Delta U_i[\tau], \Delta U_j[\tau])$ , щоб відстань між реальними траєкторіями керування в одному класі була меншою, ніж відповідна відстань  $d(\Delta U_i[\tau], \Delta U_v[\tau])$  для траєкторій, що реалізують різні програми керування.

### Проведення досліджень і результати

Дослідження проводились на 160-тонному конвертері № 3 ПАТ “АрселорМіттал Кривий Ріг”. Модель плавки створювалась для розрахунку шихти (“статичне керування”), керування плавкою в процесі продувки (“динамічне керування”) та доводки плавки після виміру вмісту вуглецю і температури ванни без переривання продувки і розрахунку розкиснювачів.

Модель запускається за ознакою “додувка” при отриманні інформації про температуру металу на першій ( $t_{п1}$ ) або другій ( $t_{п2}$ ) повалці й відповідного хімічного складу сталі. За відсутності інформації про вміст вуглецю розрахунок може проводитися за значенням вмісту вуглецю, встановленим за аналізом газів, які відходять з конвертера [10].

Розрахунок охолоджуючого матеріалу (вапна, вапняку)  $m_{вп}^{рД}$  і сумарної витрати кисню на додувку плавки  $\Delta V^{рД}$  при визначенні вмісту вуглецю в металі хімічним аналізом проби на повалці першої ( $C_{п1}$ ) чи другої ( $C_{п2}$ ) або за газовим аналізом  $C_r$  за наявності “зразкової” додувки описується рівняннями

$$m_{вп}^{рД} = m_{вп}^{0д} - k_1(\Delta t^{0д} - \Delta t^{рД}) + k_2(\Delta C^{0д} - \Delta C^{рД});$$

$$\Delta V^{рД} = \Delta V^{0д} - [\varphi(C_M^0) - \varphi(C_M)],$$

де  $m_{вп}^{0д} \in m_{вп}$ ,  $m_v$  – маса вапняку, вапна на охолодження при “зразковій” додувці, т;  $\Delta V^{0д}$  – сумарний об’єм кисню на “зразкову” додувку, м<sup>3</sup>;  $k_1, k_2$  – умовно-сталі коефіцієнти;  $\Delta t^{0д}, \Delta t^{рД}$  – необхідна зміна температури відповідно при “зразковій” додувці й додувці

на поточній плавці, °С, ( $\Delta t^{0д} = t_n^0 - t_c^0$ ,  $\Delta t^{рд} = t_n - t_3$ );  $\Delta C^{0д}, \Delta C^{рд}$  – необхідна зміна вмісту вуглецю в металі відповідно при “зразковій” додувці й додувці на поточній плавці, % ( $\Delta C^{0д} = C_M^0 - C_C^0$ ,  $\Delta C^{рд} = C_M - C_3$ );  $t_M^0$ ,  $t_C^0$ ,  $t_M$ ,  $t_3$  – відповідно температура металу на повалці, кінцева на “зразковій” додувці й фактична: виміряна на повалці ( $t_M \in t_{п1}; t_{п2}$ ), і задана;  $C_M^0$ ,  $C_C^0$ ,  $C_M$ ,  $C_3$  – відповідно вміст вуглецю в металі на повалці, кінцеве значення “зразкової” додувки й фактичне: виміряне на повалці ( $C_M \in C_{п1}; C_{п2}$ ) або визначене з допомогою газового аналізу  $C_M = C_r$ , і задане. Тут

$$\varphi(C) = \begin{cases} k_3 \cdot C_M, & \text{якщо } C \leq 0,1\%; \\ k_4 - k_5 \cdot C_M, & \text{якщо } C > 0,1\%, \end{cases}$$

де  $k_3, k_4, k_5$  – умовно-сталі коефіцієнти.

Положення фурми й витрати кисню на додувку встановлюють такими, що дорівнюють їх значенням на “зразковій” додувці:  $H^{рд} = H^{од}$ ,  $v^{рд} = v^{од}$ .

Якщо  $m_{вп}^{рд} \leq 0$  (холодна плавка), то розраховуються  $\Delta H^{рд}$  (еквівалентне домішці вапняку (вапна)),  $\Delta \tau^{рд}$  і  $\Delta V^{рд}$  за формулами

$$\Delta H^{рд} = \Delta H^{од} - k_6(m_{вп}^{рд} - m_{вп}^{од});$$

$$\Delta \tau^{рд} = \Delta \tau^{од} - k_7(m_{вп}^{рд} - m_{вп}^{од});$$

$$\Delta V_H^{рд} = \Delta V_H^{од} + k_8(\Delta \tau^{рд} - \Delta \tau^{од}),$$

де  $\Delta H^{од}$ ,  $\Delta H^{рд}$  – приращення положення фурми при “зразковій” додувці й розрахункове, м;  $\Delta \tau^{од}$ ,  $\Delta \tau^{рд}$  – тривалість коректуючого нагріву при “зразковій” додувці й розрахункове, хв;  $\Delta V^{од}$ ,  $\Delta V^{рд}$  – сумарна витрата кисню на нагрів при “зразковій” додувці й розрахунковій, м<sup>3</sup>.

Якщо нагрів при “зразковій” додувці проводиться з використанням вугілля, то маса останнього визначається за формулою

$$m_n = k_9 m_{вп}^{рд}.$$

За відсутності “зразкової” додувки розрахунок проводиться по додувці попередньої плав-

ки. При цьому значення параметрів при “зразкової” додувці замінюють значеннями цих параметрів на попередній плавці.

Розрахунок охолоджуючого матеріалу (вапняку  $m_{вп}^{рд}$ ) і сумарної витрати кисню на додувку плавки  $\Delta V^{рд}$  при визначенні вмісту вуглецю в металі за хімічним аналізом проби на повалці ( $C_{п1}$  чи  $C_{п2}$ ) або за газовим аналізом  $C_r$  за відсутності “зразкової” додувки й додувки на попередній плавці описується рівняннями

$$m_{вп}^{рд} = -k_{10} \cdot \Delta t^{рд} + k_{11} \cdot \Delta C^{рд};$$

$$\Delta V^{рд} = \varphi(\Delta C^{рд}).$$

Положення фурми й витрати кисню на додувку встановлюють на значення положення фурми й витрати кисню на останніх хвилинах продувки (після 13-ї хвилини й до кінця продувки):  $H^{рд} = H^{13+}$ ,  $v^{рд} = v^{13+}$  [11].

Розрахунок охолоджуючого матеріалу (вапняку  $m_{вп}^{рд}$ ) і сумарної витрати кисню на додувку плавки  $\Delta V^{рд}$  за відсутності інформації про вміст вуглецю в металі в останній фазі продувки й за наявності “зразкової” продувки або додувки на попередній плавці описується рівняннями

$$m_{вп}^{рд} = m_{вп}^{од} - k_1(\Delta t^д - \Delta t^{рд}) + k_{10} \cdot \left( \frac{V^п - V}{v^{дсер}} - \frac{\Delta V^д}{v^{одсер}} \right),$$

$$\Delta V^{рд} = (V^п - V) - k_2 m_{вп}^{рд},$$

де  $\Delta t^д \in \Delta t^{од}$ ,  $\Delta t_{пр}^д$  – зміна температури відповідно на “зразковій” додувці й попередній плавці, °С,  $V^п$ ,  $V$  – відповідно розрахована сумарна витрата кисню на плавку і поточна сумарна витрата кисню в момент виміру температури металу на повалці, м<sup>3</sup>;  $\Delta V^д \in \Delta V^{од}$ ,  $\Delta V_{пр}^д$  – відповідно розрахована сумарна витрата кисню на додувку на “зразковій” і попередній плавці, м<sup>3</sup>;  $v^{дсер}$  – середня витрата кисню на додувку, що дорівнює витраті кисню в кінці продувки ( $v^{дсер} = v^{13+}$ ), м<sup>3</sup>/хв;  $k_5, \dots, k_{10}$  – умовно-сталі коефіцієнти.

Положення фурми й витрата кисню на додувку установлюють такими, що дорівнюють їх значенням на останніх хвилинах "зразкової" продукції:  $H^{рл} = H^{13+}$ ,  $H^{рл} = H^{013+}$ .

Рекомендації щодо витрати сипких і кисню на додувку, тривалості додувки й положення фурми виводяться на відеокадр "Додувка". Алгоритм додувки плавки зображений на рисунку.

При вимірі температури  $t_z$  і вмісту вуглецю в металі  $C_z$  зондом [12, 13] або на повалці конвертера розрахунок температури металу  $t^p$  на додувку проводять за формулою

$$t^p = t_z + \eta_1 \int_0^{\tau_d} V_c d\tau + \eta_2 \sum_0^{\tau_d} m_{вп\ np}^d + \eta_3 m_{вуг}^d + \eta_4,$$

за відсутності інформації про газовий аналіз або при вмісті вуглецю на повалці нижче 0,2 % – за формулою

$$\eta_5 = \begin{cases} \beta_1, \text{ якщо } C_\tau^p > 0,25; \\ \beta_2, \text{ якщо } 0,10 < C_\tau^p \leq 0,25; \\ \beta_3, \text{ якщо } 0,07 < C_\tau^p \leq 0,10; \\ \beta_6, \text{ якщо } C_\tau^p \leq 0,07; \end{cases}$$

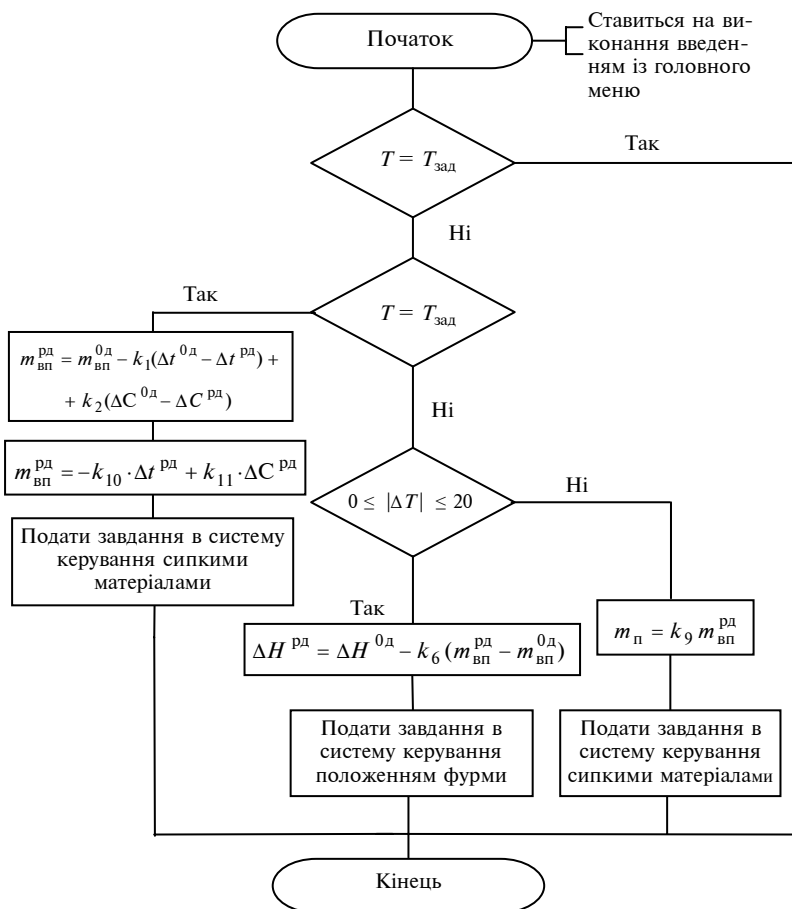
$$t_\tau^p = t_z + \beta_4 \Delta V_\tau^d + \beta_5 \sum m_{вп}^{d\ np} + \beta_6 m_{вуг}^d + \beta_7,$$

де  $m_{вуг}^d$ ,  $\sum_0^{\tau_d} m_{вп}^{d\ np}$  – маса вуглецьвмісних матеріалів і сумарна зведена маса вапняку на додувці плавки, т;  $\tau_d$  – тривалість додувки, с;  $\eta_1 - \eta_6$ ,  $\beta_1 - \beta_6$  – умовно-сталі коефіцієнти;  $\Delta V_\tau^d$  – поточні сумарні витрати кисню на додувку плавки (з моменту виміру  $C_z$  і  $t_z$ ), м<sup>3</sup>;  $n$  – часовий крок ітерації, що дорівнює 10 с;  $\sum m_{вп}^{d\ np}$  – сумарна зведена маса вапняку на доводці плавки, що дорівнює  $m_{вп}^{np} = \sum_{i=1}^k m_{вп\ i} + 0,4 \sum_{j=1}^p m_{в\ j}$ , т, де  $m_{вп\ i}$ ,  $m_{в\ j}$  – відповідно маса  $i$ -ї домішки вапняку й  $j$ -ї домішки вапна, т.

### Висновки

Побудовано модель доведення плавки, що передбачає додувку як з охолодженням, так і з нагрівом плавки, зміною режиму дуття або введенням матеріалу для нагріву. Модель доведення плавки може використовуватися як при додувці, так і при коректуванні плавки за результатами виміру вмісту вуглецю й температури занурювальним зондом.

Для розрахунку додувки формується окремий масив "зразкових" плавок і плавок "позитивного досвіду". Розрахунок першої та другої додувки проводиться за різними "зразковими" і плавками "позитивного досвіду". Розрахунок додувки може виконуватися як за результатами прямого виміру вмісту вуглецю, так і за прогнозованим його зна-



Алгоритм додувки плавки

ченням за результатами хіманалізу газів, що входять із конвертера.

Подальші дослідження будуть проведені в напрямі поширення моделі на конвертери іншої ємності.

### Список літератури

1. *Основи металургійного виробництва металів і сплавів: Підручник / Д.Ф. Чернега, В.С. Богушевський, Ю.Я. Готвянський та ін.; за ред. Д.Ф. Чернеги, Ю.Я. Готвянського.* – К.: Вища школа, 2006. – 503 с.
2. *Технология производства стали в современных конвертерных цехах / С.В. Колпаков, Р.В. Старов, В.В. Смоктей и др.; под общей ред. С.В. Колпакова.* – М.: Машиностроение, 1991. – 464 с.
3. *Создание базовой интегральной динамической модели современных конвертерных процессов на основе законов неравновесной термодинамики. Сообщение 1 / Б.Н. Огороков, П.Ю. Шендриков, О.А. Комолова и др. // Изв. вузов. Черн. металлургия.* – 2010. – № 5. – С. 31–36.
4. *Охотский В.Б. Термо- и гидродинамические критические концентрации углерода при продувке сталеплавильной ванны // Там же.* – 2010. – № 10. – С. 15–19.
5. *Бигеев А.М., Байтман В.В. Определение основных параметров кислородно-конвертерного процесса в конце продувки в условиях кислородно-конвертерного цеха ОАО “Магнитогорский металлургический комбинат” // Там же.* – 2007. – № 4. – С. 31–34.
6. *Богушевский В.С., Сухенко В.Ю., Шматко О.В. Математична модель і система керування режимом дуття конвертерної плавки // Вісник НТУУ “КПІ”. Сер. Машинобудування.* – 2011. – 2, № 61. – С. 38–43.
7. *Богушевский В.С., Ромшин Н.А., Сорокин Н.А. АСУ ТП производства стали в конвертерах.* – К.: Техніка, 1991. – 180 с.
8. *Компьютерная модель расчета шихтовки и продувки конвертерной плавки / В.С. Богушевский, Г.Г. Грабовский, В.М. Михайлов и др. // Сталь.* – 2006. – № 1. – С. 18–21.
9. *Богушевский В.С., Сухенко В.Ю., Сергеева Е.А. Математическая модель управления технологическим процессом конвертерной плавки // Адаптивні системи автоматичного управління: Міжвідомчий НТ-збірник.* – 2009. – № 15 (35). – С. 91–96.
10. *Богушевский В.С., Жук С.В., Зубова Е.Н. Параметры отходящего газа как индикаторы массо- и теплообменных процессов в ванне конвертера // Металл и литье Украины.* – 2012. – № 7. – С. 16–20.
11. *Богушевский В.С., Сухенко В.Ю., Сергеева Е.А. Управление доводкой конвертерной плавки // Там же.* – 2010. – № 3. – С. 14–17.
12. *Жук С.В., Чернушевич Я.Д. Контроль періодів конвертерної плавки // Матеріали 8 Міжнар. науково-практ. конф. “Лиття. Металургія–2012”.* – Запоріжжя, 2012. – С. 320–321.
13. *Желда Т.И. Использование систем самообучения для идентификации марки стали в кислородно-конвертерном производстве.* – 2011. – № 1. – С. 94–98.

Рекомендована Радою  
інженерно-фізичного факультету  
НТУУ “КПІ”

Надійшла до редакції  
25 жовтня 2013 року