

УДК 669.184.244.66.012.1

В.С. Богушевський, С.В. Жук, Є.К. Бондаренко, О.О. Капусняк

КЕРУВАННЯ КИСНЕВО-КОНВЕРТЕРНОЮ ПЛАВКОЮ В ЗАМКНеноМУ РЕЖИМІ

The work was done in order to increase the efficiency of BOF smelting by constructing closed-loop control system. The creation of BOF melt models was based on the combined modeling method, which includes deterministic, probabilistic and heuristic approaches, methods of automatic classification and the positive experience of the previous administration. A closed-loop system including a static, dynamic and closed control model BOF steelmaking process was developed. Static model provides payment options to begin the process of melting, dynamic – decarbonization rate calculation, changes in temperature and burn-up rate during purging impurities. Developed a closed-loop control adaptation held under 160-tonnage converters PJSC “ArcelorMittal Kriviy Rih”. Economic effect of implementing a control system converter process is achieved through the issuance of heats on the specified steel grades, higher weight yield, improve product quality, saving time and materials. Closed-loop control provides settings for optimal process control.

Keywords: converter, purge, model, management, system.

Вступ

Домінуючою умовою науково-технічного прогресу і росту ефективності киснево-конвертерного виробництва, покращення якості і розширення сортаменту сталі, розробки ресурсозберігаючих і екологічно чистих технологій є автоматизація на основі систем контролю і прогнозування протікання технологічного процесу. Основною ланкою системи керування конвертерною плавкою, яка зв'язує початкові та кінцеві параметри і керуючі діяння по зміні ходу протікання процесу, є математична модель. Низка моделей, розроблених до цього часу як закордонними, так і вітчизняними фірмами, не дає змоги керувати кисневим конвертером у замкненому режимі. Аналіз моделей передових закордонних фірм *Jones&Laughlin*, *Danieli*, *Voest-Alpine* показує, що вони мало придатні для використання в умовах вітчизняного виробництва, оскільки обмежені у номенклатурі марок сталі шихтові матеріали мають слабку підготовку. Чим нижчий ступінь підготовки шихтових матеріалів, тим важче керувати процесом. Вітчизняні моделі [1–5] важко використовувати, оскільки вони побудовані на окремо взятих принципах і дають можливість отримати деяку “середню” плавку, з метою дослідження окремих особливостей процесу.

Отже, використання відомих математичних моделей конвертерного виробництва не забезпечує оптимального керування плавкою, призводить до значних відхилень керуючих параметрів і унеможливорює керування плавкою в замкненому режимі.

Побудова системи керування киснево-конвертерною плавкою в замкненому режимі по-

винна базуватися на комплексному поєднанні всіх технологічних операцій, фізико-хімічних, тепло- і масообмінних процесів. Для побудови надійної замкненої системи необхідно передбачити контроль усіх періодів конвертерної плавки [6], що забезпечить точне визначення початку і закінчення наступного періоду і виключить виникнення аварійних ситуацій.

Проблема замкненого керування киснево-конвертерною плавкою в роботах [7–9] вирішена частково, оскільки автори це питання розглядали з позиції контролю лише одного із комплексних параметрів (шлакоутворення, дуття, температурний режим). Для побудови замкненої системи керування слід визначити, як впливає той чи інший параметр на інші параметри та на протікання киснево-конвертерного процесу в цілому, поєднати взаємовпливи математичними методами, створивши комплексну модель замкненого керування.

Постановка задачі

Метою роботи є побудова системи замкненого керування для збільшення ефективності киснево-конвертерної плавки через використання різних способів моделювання – детермінованого, ймовірнісного та евристичного.

Результати досліджень

Розроблена замкнена система проходила адаптацію в умовах виробництва 160-тонного конвертера ПАТ “АрселорМіттал, Кривий Ріг”.

В основу побудови системи замкненого керування киснево-конвертерною плавкою покладена ідея функціонування моделі “система–

людина”, в якій людині відводиться роль спостерігача з можливістю за потреби втручатись у процес плавки. Реалізація цього принципу дає змогу мінімізувати людський фактор при прийнятті рішення під час плавки і контролювати систему на предмет збоїв.

Замкнене керування киснево-конвертерним процесом базується на використанні статичної, динамічної і замкненої моделей керування, які побудовані за допомогою детермінованих і статистичних методів, методів автоматичної класифікації і позитивного досвіду попереднього керування. Структура розробленої замкненої моделі керування конвертерним процесом зображена на рис. 1. Статична модель замкненої системи забезпечує розрахунок: шихтовки плавки (витрати чавуну і брухту на плавку відповідно до заданих параметрів – маси рідкої сталі, хімічного аналізу і температури сталі); кількості охолоджувачів на плавку і матеріалів, які вносять додаткове тепло; необхідної кількості кисню на

плавку; тривалості продувки; маси розкиснювачів на плавку.

Динамічна модель забезпечує: розрахунок прогнозованої маси рідкої сталі; динамічні розрахунки швидкості зневуглецювання і вмісту вуглецю при продувці і додувці; динамічний контроль температури конвертерної ванни і процесу шлакоутворення.

Провідною складовою загальної динамічної моделі є модель розрахунку швидкості зневуглецювання і вмісту вуглецю. В основу моделі покладені дослідження С.І. Філіппова та С.Г. Мельника, які показали, що процес зневуглецювання протікає в дифузійному режимі і при $[C] < 0,15-0,20 \%$ проходить заміна адсорбційного шару на поверхні металу, тобто реакція переходить в стадію лімітування переносу вуглецю із об'єму ванни до поверхні реагування [10–12]. Продовження цих досліджень для конвертерів садкою 160 і 350 т [13, 14] дало можливість розвинути теорію і довести, що

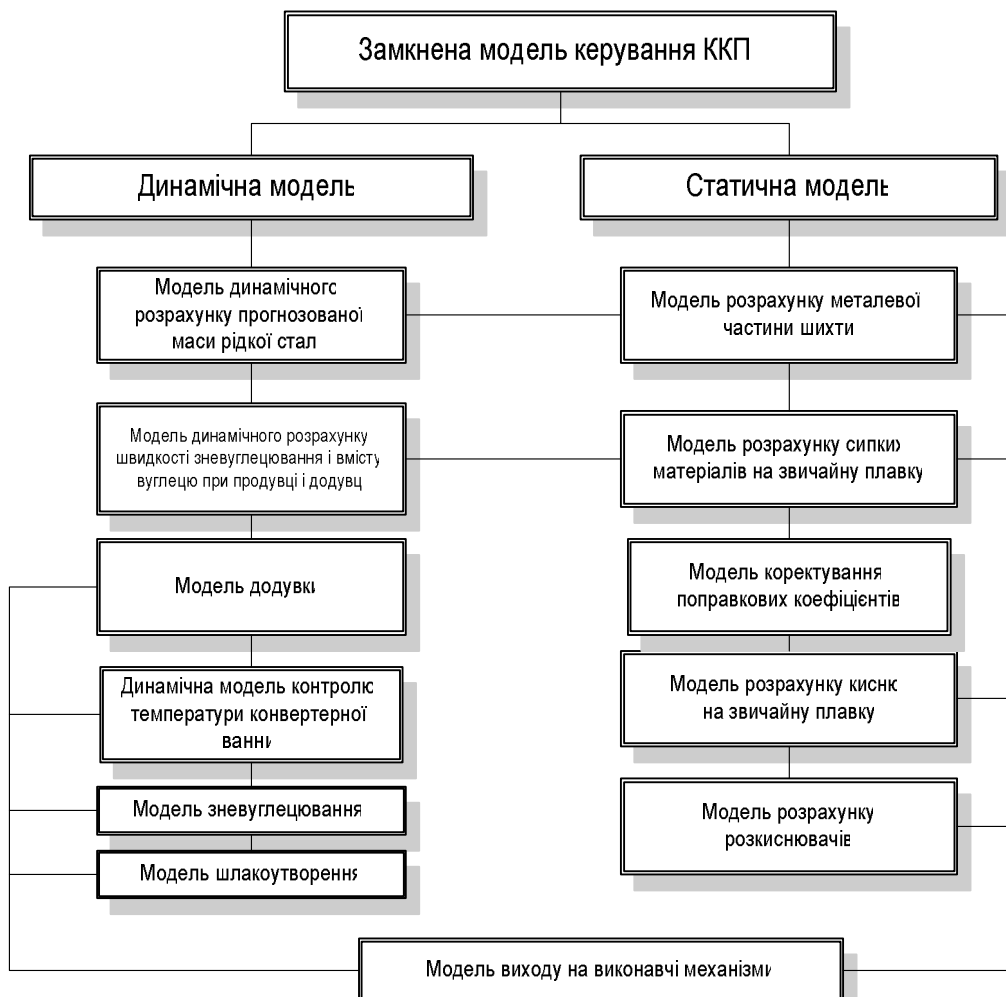


Рис. 1. Математичні моделі замкненої системи керування киснево-конвертерною плавкою

критичний вміст вуглецю, за якого відбувається перехід, залежить від технологічних параметрів процесу.

Запропоновано алгоритм контролю масової частки вуглецю у ванні:

а) за балансом для вмісту вуглецю не нижче 0,6 % [15]:

$$C = \frac{C_{\text{ч}} m_{\text{ч}} + C_{\text{б}} m_{\text{б}} + C_{\text{вп}} m_{\text{вп}} - 15,4 \cdot 10^{-3} K_0 \int M_{\text{CO}_2} v_{\text{г}} d\tau}{m_{\text{ч}} + m_{\text{б}} + 0,22 m_{\text{вп}} - 0,72 \tau}; \quad (1)$$

б) за різницею об'ємної щільності випромінювання факела у двох спектральних областях для вмісту вуглецю нижче 0,6 %, що дає можливість зменшити вплив у кінці продувки на процес введення в конвертер домішок сипких матеріалів, оскільки збільшення об'ємної густини CO_2 , унаслідок підвищення його об'ємної частки у газах, які відходять після введення домішки, супроводжується одночасним зростанням об'ємної щільності випромінювання парів H_2O , які виділяються із сипких матеріалів:

$$C = 10^{-1} v_{\text{г}} (0,607 + 1,62 M_{\text{CO}_2} - 1,06 M_{\text{H}_2\text{O}}) \quad (2)$$

$$(R = 0,75, \sigma = 0,03 \%, P > 0,99),$$

де $m_{\text{ч}}$, $m_{\text{б}}$, $m_{\text{вп}}$ – маса чавуну, брукхту і вапняку, т; C , $C_{\text{ч}}$, $C_{\text{б}}$, $C_{\text{вп}}$ – вміст вуглецю відповідно у ванні, чавуні, ломі та вапняку, %; K_0 – стехіометричний коефіцієнт пропорційності між масою і об'ємом газоподібної речовини за нормальних умов, який для вуглецю дорівнює $0,536 \text{ кг/м}^3$; M_{CO_2} , $M_{\text{H}_2\text{O}}$ – показники пірометра, які пропорційні об'ємній щільності монохроматичного випромінювання факела в інфрачервоному спектрі, який відповідає максимуму поглинання CO_2 і H_2O , мВ; R – коефіцієнт множинної кореляції; σ – середньоквадратичне відхилення для вмісту вуглецю 0,06–0,4 %; P – достовірність коефіцієнта кореляції.

Перехід від алгоритму (1) до алгоритму (2), при вмісті вуглецю 0,6 % (для 160-тонних конвертерів), пов'язаний із переходом реакції окиснення вуглецю від першого кінетичного періоду, в якому швидкість зневуглецювання є функцією об'ємних витрат дуття, до другого, в якому швидкість окиснення вуглецю визначається його вмістом.

Вміст вуглецю визначається за балансом із похибкою, яка пов'язана з неточним визначенням вмісту вуглецю в шихті (зокрема, у брукхті) і похибками у визначенні миттєвої швидкості зневуглецювання, які при інтегруванні накопичуються. Тому як тільки плавка переходить у другий кінетичний період, визначення вуглецю за залежністю (2) є більш доцільним, оскільки не потребує знання початкового вмісту вуглецю.

Розрахунковим методом за балансом водяних парів визначаються витрати газів, які відходять:

$$v_{\text{г}} = \frac{(\rho_{\text{д0}} v + \rho_0 v_{\text{п0}})(1 + 1580 \alpha M_{\text{CO}_2})}{7,31 M_{\text{H}_2\text{O}}}, \quad (3)$$

де $\rho_{\text{д0}}$, ρ_0 – абсолютна вологість відповідно дуття і повітря за нормальних умов, г/м^3 ; v , $v_{\text{п0}}$ – об'ємні витрати дуття і повітря, яке підсмоктувалося, нм^3 ; α – температурний коефіцієнт об'ємного розширення газу, який дорівнює $1/273 \text{ К}^{-1}$.

Відомо, що витрати повітря, яке ежектуються, прямо пропорційні розрідженню в кесоні:

$$v_{\text{п0}} = 55,8 \delta p,$$

де 55,8 – коефіцієнт пропорційності для 160-тонного конвертера з охолоджувачем конвертерних газів ОКГ-100-2, $\text{м}^3/(\text{хв}\cdot\text{Па})$; δp – розрідження в нижній порожнині кесона, Па.

Використання цієї інформації дало змогу отримати залежність (3) для визначення масової частки вуглецю у ванні в кінці продувки, оскільки при стабільній подачі димососної установки зі зменшенням витрат відхідних газів, яке супроводжується зниженням об'ємної щільності монохроматичного випромінювання CO_2 , збільшуються витрати повітря, яке ежектуються, відповідно і випромінювання парів H_2O .

Задовільні результати по контролю зневуглецювання отримані також при використанні інформації про тиск відхідних газів у перехідному газозоді. Вимірювання та ідентифікація тиску відхідних газів дає можливість слідкувати за динамікою вигорання вуглецю у ванні, що дає змогу використовувати параметр для керування продувкою і визначення моменту закінчення плавки на заданій масовій частці вуглецю.

Результати хімічного аналізу відхідних газів CO , CO_2 , N_2 і O_2 дають змогу прогнозувати процес зневуглецювання у ванні. Доцільно для визначення витрат відхідних газів додатково

вимірювати вміст аргону. В такому випадку витрати газів визначаються за формулою

$$v_r = \frac{Ar_p N_{2d} - Ar_d N_{2p}}{Ar_p N_{2r} - Ar_r N_{2p}} v_d,$$

де об'ємні витрати відхідних газів і повітря, яке ежектується, визначаються із балансових співвідношень:

$$v_r N_{2r} = N_{2d} v_d + N_{2p} v_p,$$

$$v_r Ar_r = Ar_d v_d + Ar_p v_p,$$

де Ar_p, Ar_d, Ar_r – відповідно вміст аргону в повітрі, дугті й у відхідних газах, %; N_{2p}, N_{2d}, N_{2r} – відповідно вміст азоту в повітрі, дугті й у відхідних газах, %.

Розглянемо можливість використання інформації про аналіз газів на водень для контролю і керування плавкою.

Водень вноситься у конвертер вологими компонентами шихти, а покидає робочий простір у вигляді газоподібного продукту, об'ємна частка якого в окремі моменти продувки може досягати в системі без допалювання 20 %.

Постійним джерелом водню є волога, яка поступає у ванну з кисневим дуттям, а також у випадку протікання кисневої фурми чи кесону. Потрапляння водню в метал зазвичай описується реакцією $H_2O + CO \rightarrow CO_2 + H_2$ з константою рівноваги зворотної реакції $K = P_{CO} P_{H_2O} / P_{CO_2} P_{H_2}$. За наявності парів оксидів заліза в робочому просторі конвертера проходить помітна дисоціація вологи, що супроводжується ендотермічним ефектом. Реакція розкладання вологи в конвертері майже незворотна.

Маса водяних парів у газоподібному кисні залежить від його температури, тиску і відносної вологості. Термодинамічний процес стиснення вологого кисню близький до екзотермічного внаслідок випаровування води, яка подається для змащування циліндрів, а також завдяки розвинутій поверхні водяної сорочки, яка охолоджується. При ізотермічному стисненні вологого газу зменшення його об'єму викликає збільшення густини пари, яка не може перевищити граничну густину насичення за даної температури.

Можливість отримання інформації про вектор стану конвертерної плавки в будь-який момент часу по ходу продувки дає змогу керувати самим об'єктом. Якщо припустити, що програмна траєкторія системи задана, то при

відхиленні від програми можна визначити те чи інше керуюче діяння і повернутися на розрахункову траєкторію чи побудувати нове програмне керування, яке в підсумку приведе систему після закінчення продувки в межі заданої марки сталі. Коректування можна проводити двома способами. При використанні першого способу коректування відбувається за заданою програмою, при використанні другого – за кінцевим станом.

Керуючі діяння в першому випадку вибираються мінімізацією критерію такого вигляду:

$$I(v, H, m_{вп}, m_{в}, m_{ш}) = \sum_{i=1}^n \alpha_i M(\dot{L}_i - L_{i*})^2, \quad (4)$$

в другому:

$$I(V, \bar{H}, \sum m_{вп}, \sum m_{в}, \sum m_{ш}) = \sum_{i=1}^k \alpha_i M(\dot{L}_j - L_{j*})^2, \quad (5)$$

де α_i, α_j – коефіцієнти, що визначають важливість точності досягнення характеристик сталі i -ї у теперішній момент часу і j -ї у момент повалки конвертера; \dot{L}_i, \dot{L}_j – компоненти вектора стану i -го в теперішній момент часу і j -го під час повалки; L_{i*}, L_{j*} – задані значення параметрів i -го в теперішній момент часу і j -го під час повалки; $v, H, m_{вп}, m_{в}, m_{ш}$ – керуючі діяння: інтенсивність подачі дугтя, $m^3/хв$; висота фурми над рівнем спокійної ванни, м; маси вапняку, вапна і плавикового шпату, т.

Для реалізації замкненого керування періодами киснево-конвертерної плавки необхідне підвищення точності контролю вихідних параметрів і математичного опису процесу в умовах неповної інформації завдяки використанню точних методів контролю режимних параметрів та надійної комп'ютерної техніки, яка характеризується розвиненою структурою пристроїв зв'язку з об'єктом, великою швидкодією, необмеженим обсягом пам'яті. При цьому в динаміці продувки відбувається оцінка стану об'єкта в будь-який момент часу і керування самим ходом процесу по відхиленню від заданих значень. Такий підхід до побудови замкненого керування заснований на ідеї розділення програмного і збуреного руху. Траєкторія основних параметрів конвертерної ванни (зневуглецювання, окисненість тощо), які “занурені в середовище”, дає змогу керувати одним параметром, змінюючи інший.

При зміні будь-яких обставин траєкторії знеуглецювання змінюються траєкторії нагріву та окисненості. Нав'язування об'єкту в цих умовах раніше заданих програмних траєкторій і спроб підтримання їх методом регулювання за відхиленням призводять до неоптимальних результатів. І, навпаки, використання особливостей внутрішнього саморуху системи (власних функцій об'єкта), вибір резонансних керувань дають можливість досягти кінцевих результатів з малими витратами на керування. З цієї точки зору більш прийнятним є критерій (5).

Проте слід враховувати, що фізико-хімічні процеси, які протікають у конвертерній ванні, певною мірою визначаються процесом шлакоутворення. Швидкоплинність конвертерної плавки зумовлює необхідність раннього наведення активного, реакційноздатного шлаку з доведенням основності кінцевого шлаку не менше ніж до 2,5. Складом і фізичними властивостями шлаку визначаються металургійні реакції рафінування (ступінь видалення сірки і фосфору з металу), вигар розкиснюючих і легуючих, втрата металу з виносом і викидами. Вимоги до режиму шлакоутворення можна звести до такого: більш швидке наведення рідкоплинного шлаку на початку продувки, підтримання оптимального характеру зміни окисненості і основності шлаку з максимально можливим його рівнем протягом усієї операції. Тому керування процесом шлакоутворення доцільно здійснювати відповідно до критерію (4).

Випадкові величини \dot{L}_i визначаються відповідно до математичної моделі плавки на основі системи стохастичних диференціальних рівнянь вигляду

$$\dot{L}_i = \eta_i [\dot{L}_1, \dot{L}_2, \dots, \dot{L}_n, v, H, m_d, \tau(b_i + L_{Mi})] + \sigma_i W_i,$$

де m_d – поточне значення маси додаткових матеріалів; b – i -те значення оцінки невідомих параметрів моделі; L_{Mi} – i -й компонент вектора, що характеризує похибку у визначенні параметрів моделі, які відповідають деякій функції розподілу; W_i – i -й вінерівський випадковий процес.

Стан конвертерної плавки у момент часу τ визначається рівнянням

$$L_j = \int_{\tau_p}^{\tau} \eta_j [L_1, L_2, \dots, L_n, v, H, m_d, \tau_d, (b_i + L_{Mi})] d\tau + L_j(\tau_p) + \sigma_j [W_j(\tau) - W_j(\tau_p)],$$

де $L_j(\tau)$ – випадковий j -й компонент вектора, що характеризує стан конвертерної плавки в момент часу τ ; τ_p – момент часу включення програмного модуля, що реалізує розрахунок керуючих діянь.

У режимі замкненого керування процесом основне навантаження оператора – візуальний контроль і спостереження за ходом технологічного процесу, а також аналіз ознак, що спостерігаються, і якщо відхилення фактичних керуючих діянь від розрахункових перевищує 10 %, система сигналізує оператору про необхідність переходу на ручне керування.

Система замкненого керування реалізована на базі засобів обчислювальної техніки, а також інтерфейсних ліній зв'язку для передачі даних, що забезпечують розподілену обробку інформації та оперативне керування роботою конвертера.

В основі концепції створення замкненої системи покладено функціональну, структурну та інформаційну інтеграцію. Функціональна інтеграція означає, що одні й ті ж продукти і концепції використовуються в одноподібній формі для реалізації всіх видів керування, включаючи логічне і регулююче. Структурна інтеграція передбачає входження всіх моделей в інтегровану автоматизовану систему керування технологічними процесами (АСК ТП) конвертерної плавки. Інформаційна інтеграція розглядає систему автоматизації як частину загального обчислювального середовища на підприємстві, що робить інформацію одночасно доступною і розподіленою між різними користувачами.

З урахуванням перелічених факторів було прийнято рішення, що розроблювана система має бути дворівневою. Нижній рівень повинен забезпечити функцію збору, обробки, відображення інформації про поточні значення технологічних параметрів на екранах автоматизованих робочих місць (АРМ) і керування технологічним параметрами, а також передачу інформації на верхній рівень. Технічна побудова нижнього рівня включає відповідні засоби вимірювання технологічних параметрів і сучасні засоби обчислювальної техніки розподіленого типу, які забезпечують необхідні показники точності, швидкодії, надійності. Верхній рівень забезпечує централізований прийом інформації від нижнього рівня, її обробку, розв'язання задач розрахунку і керування технологічним процесом, відображення інформації по керуванню і поточ-

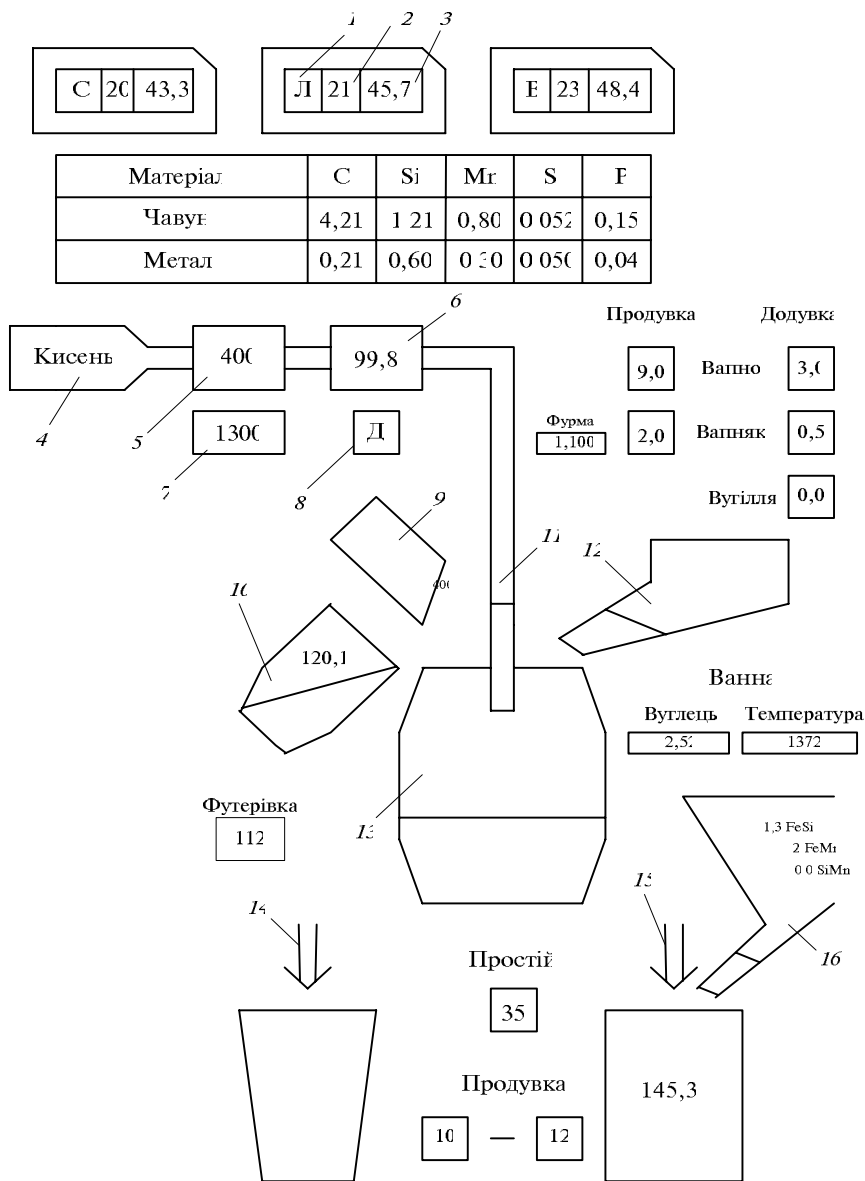


Рис. 2. Мнемосхема інформаційного супроводження плавки з індикацією сигналів

них значеннях технологічних параметрів на екранах АРМ і передачу завдань по керуванню в локальні системи нижнього рівня. На верхньому рівні відповідно до обсягу і рівня задач передбачений промисловий комп'ютер.

Система передбачає функціонування в режимі безперервної дії з регламентованою (назначеною) періодичністю операцій технічного обслуговування і ремонту.

Критерієм працездатності замкненої моделі є забезпечення розв'язання основних функціональних задач незалежно від працездатності окремих елементів. За відмову функції при розрахунках береться відмова будь-якого елемента

комплексу технічних засобів, які утворюють інформаційну чи керуючу ланку.

На рис. 2. наведена мнемосхема інформаційного супроводження плавки з індикацією сигналів.

Мнемосхема адекватно відображає зорову інформацію про технологічний процес, яка супроводжує роботу (стан і події) обладнання і всі розрахунки по ходу продувки. На рис. 2 позначення відповідають таким індикаціям сигналів: 1 – вид брухту (Л – легкий, С – середній, В – важкий); 2 – номер совка; 3 – маса брухту в совках; 4 – при продувці плавки; 5, 6, 7 – витрата, чистота і об'єм кисню; 8 – при додувці (Д); 9 – завантаження брухту в конвертер; 10 – злив чавуна в конвертер; 11 – “фурма в конвертері”; 12 – завантаження сипких матеріалів у конвертер; 13 – “конвертер з металом”; 14 – злив шлаку в чашу; 15 – злив металу в ківш; 16 – завантаження розкиснювачів у ківш.

У динамічному режимі інформація на мнемосхемі з'являється таким чином: інформація про брухт (1–3) при завантаженні відповідного совка; про хімічний склад чавуна – після його заливання в ківш із міксера; про хімічний склад металу – після хімічного аналізу; інформація про параметри продувки (5–7) відображається з початком продувки і змінюється протягом усього процесу, аналогічно відбувається відображення при додувці. Відповідно, значення положення фурми та тривалості продувки змінюються з проходженням процесу. Інформація про завантаження брухту (9) і заливання чавуна (10) з'являється відразу після нахилу короба чи ковша. Інформація про кількість домішок (вапно, вапняк, вугілля) на продувку чи додувку з'являється після того, як відкривається

бункер з відповідною домішкою. За аналогічним принципом з'являється інформація про феродомішки. Значення температури і вуглецю з'являється, щойно надходить інформація про них.

Інформація про простій конвертера "засвічується", як тільки починається завантаження конвертера бруктом на нову плавку. Значення номера плавки по футерівці змінюється після зливання сталі в ківш.

Економічний ефект системи керування конвертерною плавкою досягається за рахунок випуску плавки по заданих марках сталі, підвищення виходу придатного, покращення якості продукції, економії матеріалів, часу продувки, а також ефективності керування в результаті покращення інформаційного забезпечення АСК ТП.

Економічну ефективність запропонованих розробок оцінювали за результатами роботи конвертера № 3 за рік на основі аналізу масиву даних з розробками і без. Слід відзначити, що за період роботи конвертера з запровадженими розробками весь метал відвантажувався за призначенням.

Розглянемо вплив деяких технологічних факторів на собівартість сталі. Важливим показником є стійкість футерівки конвертера, яка збільшилася на 3 % за рік роботи конвертера. Це можна пояснити вдосконаленням складових конвертерної плавки, які впливають на стійкість футерівки, а саме: температурного режиму ванни і режиму шлакоутворення.

Реалізація динамічної моделі продувки та методу автоматизованого контролю періодів плавки дала змогу зменшити в середньому цикл плавки на 1 хв та збільшити кількість плавки у

рік з 5740 до 5852; зменшити вигар заліза на 0,1 %, знизити брак до 0,1 %.

Розробка і реалізація статичної моделі розрахунку та методу визначення скоочування шлаку дає змогу економити до 25 кг феросплавів на плавку.

Аналіз масиву плавки до і після впровадження запропонованих розробок показав, що кількість плавки, які попадали в задані межі марки по вуглецю і температурі з першої повалки, збільшилася відповідно з 65 до 80 % та з 40 до 80 %. А кількість плавки, які одночасно попадали у задані межі і по вуглецю, і по температурі, зросла з 35 до 60 %.

Висновки

Розроблена замкнена система синтезує керування по відхиленню вхідних параметрів із забезпеченням відтворення протікання реакції зневуглецювання, процесу нагріву ванни і прискорення процесу шлакоутворення. Швидке розчинення попередньо нагрітого брукту викликає сповільнення процесу шлакоутворення і десульфуратції, а також через низьку температуру металу переокиснення ванни. Погіршення процесу шлакоутворення, особливо на початку продувки, приводить до збільшення виносів і викидів металу із конвертера, заростання фурми і горловини конвертера. Тому замкнена система керування забезпечує параметри для оптимального керування процесом.

Подальші дослідження будуть спрямовані на удосконалення моделі з метою збільшення кількості плавки, що попадають у задані межі з першої повалки.

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. *Бигеев А.М. Металлургия стали. Теория и технология плавки стали. – Челябинск: Металлургия, 1988. – 480 с.*
3. *Математическая модель АСУ конвертерной плавкой / В.С. Богушевский, Ю.В. Оробцев, Н.А. Рюмшин, Н.А. Сорокин. – К.: НПК "Киевский институт автоматики", 1996. – 212 с.*
4. *Бойченко Б.М., Охотський В.Б., Харлашин П.С. Конвертерне виробництво сталі (теорія, технологія, якість сталі, конструкція агрегатів, рециркуляція матеріалів і екологія): Підручник. – Дніпропетровськ: РВА "Дніпро-ВАЛ", 2004. – 454 с.*
5. *Богушевский В.С., Рюмшин Н.А., Сорокин Н.А. Основы математического описания технологических процессов конвертерного производства стали. – К.: НПО "Киевский институт автоматики", 1992. – 168 с.*
6. *Спосіб автоматичного контролю періодів конвертерного процесу: Пат. 72524 України, МПК (2012) С21С 5/29 / В.С. Богушевський, С.В. Жук, заявник і патентовласник Нац. техн. ун-т України "КПІ". – № уа 201115643; Заявлено 30.12.2011; Опубл. 27.08.2012, Бюл. № 16, 2012.*
7. *Шарбатіан Д.М. Розробка математичної моделі і системи керування процесом шлакоутворення у ванні конвертора: Дис. ... канд. тех. наук. – К., 2006. – 160 с.*

8. *Сухенко В.Ю.* Математична модель і система керування процесом дуття конверторної плавки: Дис. ... канд. тех. наук. – К., 2011. – 182 с.
9. *Сергеева К.О.* Математична модель та система керування температурного режиму конверторної плавки: Дис. ... канд. наук. – К., 2013. – 196 с.
10. *Филиппов С.И.* Теория металлургических процессов. – М.: Металлургия, 1967. – 280 с.
11. *Филиппов С.И., Мельник С.Г.* Кинетические возможности интенсификации обезуглероживания Fe-C расплавов при воздействии нейтрального газа аргона // Изв. высших учеб. заведений. Черная металлургия. – 1977. – № 7. – С. 8–14.
12. *Мельник С.Г., Филиппов С.И.* Кинетические особенности окисления углерода при введении в металлический расплав раскислителя и азота // Там же. – 1977. – № 8. – С. 21–28.
13. *Богусhevский В.С., Сухенко В.Ю., Сергеева Е.А.* Математическая модель управления дутьевым режимом конверторной плавки // Там же. – 2011. – № 8. – С. 24–25.
14. *Богусhevский 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.
15. *Сорокин Н. А., Глуховская В. М.* Исследование информации о температуре отходящих газов в АСУ конвертерным процессом // Разработка и эксплуатация эффективных систем и средств автоматизации сталеплавильного производства. – К.: Ин-т автоматизации, 1982. – С. 13–18.

Рекомендована Радою
інженерно-фізичного факультету
НТУУ “КПІ”

Надійшла до редакції
18 листопада 2013 року