

Міністерство освіти України

ДЕРЖАВНА МЕТАЛУРГІЙНА АКАДЕМІЯ
УКРАЇНИ

На правах рукопису

СІГАРЬОВ Євген Миколайович

РОЗРОБКА ДИНАМІЧНОЇ МОДЕЛІ КИСНЕВО-
КОНВЕРТЕРНОГО ПРОЦЕСУ З ВИКОРИСТАННЯМ
ПРИНЦИПІВ ФІЗИКО-ХІМІЧНОЇ ПОДІБНОСТІ ДЛЯ
ДОСЛІДЖЕННЯ ТА УПРАВЛІННЯ

Спеціальність 05.16:02 - металургія чорних металів

Автореферат

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Дніпропетровськ
1997 р.



00753724 (S)

Дисертацією є рукопис

Роботу виконано на кафедрі теорії металургійних процесів
Державної металургійної академії України Міністерства України.Науковий керівник
доктор технічних наук,
професор**КАМКІНА**
Людмила ВолодимирівнаОфіційні опоненти:
Доктор технічних наук,
професор**ЧЕРНЯТЕВИЧ**
Анатолій ГригоровичКандидат технічних наук,
доцент**ЧЕРЕВКО**
Віктор ПавловичПровідна організація:
Інститут чорної металургії НАН УкраїниЗахист відбудеться "30" червня 1997р.О 12-30 на засіданні спеціалізованої вченої ради (шифр
К.03.11.03, спеціальність - "Металургія чорних металів") при
Державній металургійній академії України за адресою: 320635,
м.Дніпропетровськ, МСП, пр.Гагаріна, 4. З дисертацією можна
ознайомитись в бібліотеці ДМетАУ.Автореферат розіслано "23" червня 1997р.Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради, кандидат технічних наук,
доцент**ПАНОТОВ Ю.С.**

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність роботи. Найважливішими завданнями перебудови металургійної промисловості України є підвищення використання виробничого потенціалу, поліпшення якості продукції, зниження енерговитрат, підвищення технологічного рівня та техніко-економічних показників.

Вдосконалення існуючих технологій повинно супроводжуватись розробкою відповідного інформаційного забезпечення, систем автоматизованого контролю та управління процесом. Розв'язання цих задач пов'язане з широким застосуванням обчислюваної техніки та створенням математичних моделей, адекватних реальним процесам. Розробка таких моделей здійснюється на основі фундаментальних положень термодинаміки, кінетики, гідродинаміки, тепло- та масообміну з використанням даних фізико-хімічних досліджень.

Отже, створення адекватних реальному процесу фізико-хімічних та математичних моделей на основі законів термодинаміки, кінетики, гідродинаміки та масообміну для аналізу процесів і вдосконалення існуючої технології є однією з найважливіших актуальних завдань розвитку металургійного комплексу.

Мета роботи. Розробка детермінованої динамічної моделі киснево-конвертерного процесу на принципах фізико-хімічної подібності для дослідження, оптимізації та управління процесом, розробка алгоритмів ведення плавки на основі прогнозування ходу процесу, вдосконалення технології з метою підвищення якості та зниження втрат металу.

Для цього розв'язувались наступні основні задачі:

- на основі узагальнення існуючих експериментальних і виробничих даних розробити детерміновану динамічну модель киснево-конвертерного процесу з використанням принципів фізико-хімічної подібності;
- розробити алгоритм та програму розв'язання моделі з використанням ЕОМ;
- провести ідентифікацію моделі та перевірку адекватності реальним процесам;
- дослідити методами математичного моделювання основні параметри та режими проведення киснево-конвертерної плавки та можливість оперативного управління процесом;
- розробити алгоритми оптимального проведення процесу та конструкцію дутьових пристроїв для їх застосування.

Наукова новизна. Розроблено детерміновану динамічну модель процесу зневуглицювання в кисневому конверторі в рівняннях з розподіленими параметрами, які адекватні натурі.

За результатами експериментів на моделі показано, що в період інтенсивного зневуглицювання в конверторі градієнт концентрацій вуглецю та кисню в металі та кисню в шлаці незначний.

Процес зневуглицювання, в зв'язку з малими градієнтами концентрацій, описано системою рівнянь з зосередженими параметрами.

Показано, що хід процесу зневуглицювання більш за все визначається початковими умовами його проведення. Виконано аналіз впливу початкових умов на показники процесу зневуглицювання. Показано, що визначальну роль на хід зневуглицювання чинить температурний режим.

Для одержання більш точної інформації, з врахуванням відхилення реакцій від рівноваги, вперше побудовано модель на основі фундаментальних рівнянь з використанням принципів фізико-хімічної подібності. До моделі включено плавлення брухту та розчинення вапна. Показано, що розподілення потоку кисню між домішками, що одночасно окислюються, пропорційне величинам відповідних чисел Дамкелера. Встановлено адекватність моделі реальним процесам. Відносна похибка прогнозу результатів не перевищує для температури 2,3%, для вуглецю-4%.

Встановлено закономірності та можливість прогнозу порушень ходу процесу при нестабільному складі шихти та температурі чавуну, що заливається. Розроблено алгоритм та програму чисельної реалізації моделі в режимі машинного та реального часу. Час лічби в режимі машинного часу складає 0,3-0,5 хвилини.

Моделюванням показано можливість управління окисленістю шлаку та металу по ходу продувки за рахунок перерозподілення дуггового кисню між фазами. Розроблено конструкції двоярусної та двоконтурної фурми з незалежним підводом кисню.

Запропоновано алгоритм динамічного управління плавкою. Проведено серію дослідно-промислових плавок. Встановлено, що при застосуванні дослідної фурми підвищилась лужність, знизився вміст оксидів заліза в кінцевому шлаці та збільшився вихід годного на 0,1%.

Основні положення, що виносяться автором на захист:

- детерміновані моделі процесу зневуглицювання в кисневому конвертері з розподіленими та зосередженими параметрами;
- детермінована динамічна модель киснево-конвертерного процесу, розроблена на принципах фізико-хімічної подібності, з врахуванням плавлення брухту та розчинення вапна;
- розподілення концентрацій кисню в шлаці, вуглецю та кисню в металі по глибині ванни в процесі зневуглицювання;
- конструкція двоярусної дослідно-промислової фурми з незалежними підводами кисню та центральним охолодженням наконечника для роздільного регулювання окисленості металу та шлаку;
- конструкція двоконтурної дослідно-промислової фурми з незалежними підводами кисню для роздільного регулювання окисленості металу та шлаку;
- технологія ведення продувки з застосуванням розробленого продувочного пристрою та одночасним прогнозуванням ходу процесу в режимі "радник майстра".

Практична значимість. Розроблені динамічні моделі киснево-конвертерного процесу розширюють можливості дослідження процесу методами комп'ютерного моделювання та дозволяють використовувати одержані результати для управління процесом.

Розроблений програмний засіб в режимі "Радник майстра" передано ККЦ ДМК, що дозволяє у виробничих умовах при нестабільному складі шихтових матеріалів і коливаннях температури чавуну, оперативно прогнозувати відхилення від оптимального, з точки зору технології, ходу процесу. Розроблені програмні засоби дозволяють виключити необхідність проведення трудомістких виробничих експериментів.

Розроблену конструкцію двоконтурної фурми з незалежними підводами кисню та алгоритм ведення плавки передано в ККЦ ДМК для широкого промислового опробування.

Теоретичні розробки та практичні результати дисертаційної роботи реалізовано у відповідності з завданнями, поставленими державними науково-технічними програмами за пріоритетними напрямками розвитку науки та техніки, напрям 04.06, наказ № 15 від 10.03.1993 р.; наказів Міністерства освіти України №76 від 21.03.1991 р.; № 68 від 31.03.1992 р.; рішеннями Ради ДМетАУ від 31.01.1992 р.

Апробація роботи. Основні наукові положення та практичні результати роботи повідомлені та обговорені на конгресах, Всесоюзних конференціях, нарадах і наукових семінарах, Республіканських науково-технічних конференціях, включаючи: II Всесоюзна нарада "Бази фізико-хімічних та технологічних даних для оптимізації металургійних технологій" (Курган, жовтень, 1990); V Всесоюзна конференція "Теплота масообмінні процеси в ваннах сталеплавильних агрегатів" (Маріуполь, вересень, 1991); Всесоюзна нарада "Моделювання фізико-хімічних систем і технологічних процесів в металургії" (Новокузнецьк, жовтень, 1991); Перший конгрес сталеплавильників (Москва, жовтень, 1992); Другий конгрес сталеплавильників (Липецьк, жовтень, 1993); II Всесоюзна нарада "Використання ЕОМ в наукових дослідженнях та розробках" (Дніпропетровськ, жовтень, 1989); X Всесоюзна конференція "Фізико-хімічні основи металургійних процесів" (Москва, червень, 1991).

Публікації. Основний зміст дисертації опубліковано в 9 наукових роботах та тезах доповідей на конференціях.

Структура та обсяг роботи. Робота складається зі вступу, чотирьох глав, висновків, списку використаної літератури з 142 найменувань та додатку.

Конкретний особистий внесок дисертанта в наукову розробку.

Експериментальні та теоретичні дослідження, що увійшли до дисертаційної роботи, виконано автором за участю співробітників ДМетАУ, Дніпровського металургійного комбінату ім.Дзержинського. Результати опубліковано у співавторстві з ними. Обробку даних досліджень та узагальнення результатів робіт проведено автором самостійно.

Автор щиро дякує науковому консультанту професору, доктору технічних наук Яковлеву Юрію Миколайовичу, своїм колегам по роботі, співробітникам Дніпровського металургійного комбінату за допомогу в проведенні досліджень, що узагальнені в дисертації.

КОРОТКИЙ ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЇ

У вступі обґрунтовано актуальність роботи, викладено мету та завдання досліджень, наведено результати, що винесені на захист, та перелік опублікованих робіт по темі дисертації.

1. МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ СТАЛЕПЛАВИЛЬНИХ ПРОЦЕСІВ ТА МЕТОДИ ЇХ ПОБУДОВИ

В роботі проведено аналіз раніше розроблених математичних моделей сталеплавильних процесів. Показано, що в зв'язку з деякими особливостями побудови розроблені моделі не можуть бути використані в повному обсязі для управління процесом і, тим більше для його дослідження.

Найбільш складною задачею в описі сталеплавильних процесів є розподіл потоку кисню ($I_{\text{заг}}$), що надходить в метал, між домішками, що окислюються. Ця задача розв'язана із застосуванням методів фізико-хімічної подібності сталеплавильних процесів, що розроблені Ю.М.Яковлевим та Л.В.Камкіною. Мірою відношення швидкості витрачання або утворення речовини при хімічній реакції до швидкості її перенесення є числа Дамкелера (Da). Добуток числа Дамкелера на безрозмірну концентрацію елемента пропорційний долі кисню (I_i), що витрачається на окислення цієї домішки

$$\frac{I_i}{I_{\text{овщ}}} = \frac{Da_{[O]} \rho_i}{\sum (Da_{[O]} \rho_i)}, \quad I \in (C, Si, Mn, P) \quad (1)$$

При вмісту вуглецю вище 0,2-0,3% концентрація кисню в метали змінюється несуттєво, тоді $d[O]/d\tau = 0$ і потік кисню $I_{\text{заг}}$ витрачається лише на окислення домішок. Після перетворень одержано вираз для розподілу кисню між домішками

$I_{ЗАГ} = [O]([C] - [C]_P) + k'_{Si}([Si] - [Si]_P) + k'_{Mn}([Mn] - [Mn]_P) + k'_P([P] - [P]_P)$, (2)
де $[C]$, $[Si]$, $[Mn]$, $[P]$ - поточні концентрації елементів; $[C]_P$, $[Si]_P$, $[Mn]_P$, $[P]_P$ - рівноважні концентрації; $k'_{Si} = k_{Si} / k_C$; $k'_{Mn} = k_{Mn} / k_C$; $k'_P = k_P / k_C$ - відносні ефективні константи швидкостей (відносні кінетичні коефіцієнти) відповідних реакцій.

Відносні потоки кисню, що витрачається на окислення домішок, приведені у вигляді

$$I_C / I_{ЗАГ} = (x_{[C]} - x_{[C]_P}) / \sum (k' \Delta x_i) \quad (3)$$

$$I_{Si} / I_{ЗАГ} = (x_{[Si]} - x_{[Si]_P}) / \sum (k' \Delta x_i) \quad (4)$$

$$I_{Mn} / I_{ЗАГ} = (x_{[Mn]} - x_{[Mn]_P}) / \sum (k' \Delta x_i) \quad (5)$$

$$I_P / I_{ЗАГ} = (x_{[P]} - x_{[P]_P}) / \sum (k' \Delta x_i) \quad (6)$$

де $\sum (k' \Delta x_i) = (x_{[C]} - x_{[C]_P}) + k'_{Si} ([Si] - [Si]_P) + k'_{Mn} ([Mn] - [Mn]_P) + k'_P ([P] - [P]_P)$ (7)

Для основного процесу головна витрата кисню припадає на окислення C, Si, Mn, P. Експериментальне визначення відносних кінетичних коефіцієнтів виконано за літературними даними. Ці коефіцієнти залежать головним чином від температури процесу й можуть бути представлені в формі рівнянь Арреніуса

$$k'_{Si} = 1,26 \cdot 10^{-6} \exp(215275 / RT), \quad r = 0,79 \quad (8)$$

$$k'_{Mn} = 9,28 \cdot 10^{-5} \exp(144202 / RT), \quad r = 0,91 \quad (9)$$

$$k'_P = 1,29 \cdot 10^{-3} \exp(108393 / RT), \quad r = 0,88 \quad (10)$$

2. РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ПРОЦЕСУ ЗНЕВУГЛЕЦЬОВУВАННЯ В РІВНЯННЯХ З РОЗПОДІЛЕНИМИ ПАРАМЕТРАМИ

Узагальнено та проаналізовано питання про лімітуючу ланку, стадійність та місце перебігу реакції зневуглецювання. Більшість дослідників вважають лімітуючою ланкою підвод кисню в зону реакції. Найбільш визнаною є двостадійна схема, за якою послідовно окислюється залізо, вуглець, а потім інші елементи чавуну. Основна частина вуглецю окислюється в зоні циркуляції й лише на початку плавки окислення відбувається в зоні продувки.

Розроблено фізико-хімічну модель процесу зневуглецювання в кисневому конвертері. Киснево-конвертерний процес у період зневуглецювання представлено як чотири відкритих системи, що взаємодіють між собою: шлак, метал, струмінь кисню та пузири окису вуглецю.

При розробці математичної моделі процесу зневуглецювання використано підхід, що дозволяє описати макрокінетику, зокрема розподіл кисню та вуглецю в об'ємі ванни без врахування процесів в об'ємі реакційної зони. При переносі в розплав декількох речовин та хімічній взаємодії між ними модель являє собою систему рівнянь дифузії кожної речовини з джерельними членами, що описують надходження та витрату речовин на хімічні реакції.

Крупномасштабне перенесення речовини в металлі та шлаці описано аналогом рівняння Фіка, в якому молекулярний коефіцієнт дифузії замінюється його гурбулентним аналогом - ефективним коефіцієнтом дифузії ($D_{\text{эф}}$). При цьому система рівнянь моделі має вигляд

$$\frac{\partial (O)(x, \tau)}{\partial \tau} = \frac{D_{\text{ш}}}{H_{\text{ш}}^2} \frac{\partial^2 (O)(x, \tau)}{\partial x^2} + q_{\text{ш}}, \quad (11)$$

$$\frac{\partial [O](x, \tau)}{\partial \tau} = \frac{D_{\text{м}}}{H_{\text{м}}^2} \frac{\partial^2 [O](x, \tau)}{\partial x^2} - 1,333 K x^n \left[[C](x, \tau) [O](x, \tau) - \frac{A [1 + \rho g H_{\text{м}} (1-x) 10^{-5}]}{[C](x, \tau)} + q_{\text{м}} \right], \quad (12)$$

$$\frac{\partial [C](x, \tau)}{\partial \tau} = \frac{D_{\text{м}}}{H_{\text{м}}^2} \frac{\partial^2 [C](x, \tau)}{\partial x^2} - K x^n [C](x, \tau) \left[[O](\tau) - \frac{A [1 + \rho g H_{\text{м}} (1-x) 10^{-5}]}{[C](x, \tau)} + q_{\text{с}} \right], \quad (13)$$

де $D_{\text{ш}}$, $D_{\text{м}}$ - ефективні коефіцієнти дифузії в шлаці та металі, $\text{м}^2/\text{с}$; $H_{\text{ш}}$, $H_{\text{м}}$ - товщина шару шлаку та металу, м ; x - безрозмірна координата ($0 < x < 1$); τ - час, с ; $q_{\text{ш}}$, $q_{\text{м}}$, $q_{\text{с}}$ - джерельні члени, що враховують надходження кисню в шлак, метал та реакційну зону.

На підставі даних Ю.М.Яковлева та О.В.Поталова визначено долю участі в реакції зневуглицювання реакційної зони. Запропоновано рівняння залежності долі вуглецю, що вигоряє в реакційній зоні ($F_{\text{с}}$) від його вмісту в ванні. Для $[C] > 1,5\%$

$$F_{\text{с}} = 0,41 [C]^{0,041}, \quad (14)$$

для $[C] < 1,5\%$

$$F_{\text{с}} = 0,022 [C]^{0,67} \quad (15)$$

Відповідно визначено вирази для джерельних членів, що описують розподіл дутьового кисню між металом та шлаком

$$q_{\text{с}} = F_{\text{с}} (1 - \delta) Q_{\text{заг}}, \quad (16)$$

$$q_{\text{ш}} = \delta Q_{\text{заг}}, \quad (17)$$

$$q_{\text{м}} = (1 - \delta) (1 - F_{\text{с}}) Q_{\text{заг}}, \quad (18)$$

де δ - коефіцієнт, що враховує розподіл кисню дуття між шлаком і металом, $Q_{\text{заг}}$ - сумарна витрата дуття, що враховує ступінь засвоєння кисню ванною ($\eta_{\text{с}}$), $\text{кг}/\text{хв}$.

Ідентифіковано основні кінетичні параметри, що входять до моделі (коефіцієнти ефективної дифузії, масопередачі кисню з шлаку в ме-

тал ($\beta_{\text{ш}}$) та константи об'ємної швидкості реакції (K_V). За результатами модельних експериментів одержано залежність питомої потужності перемішування ($N_{\text{шт}}$) від глибини ванни

$$N_{\text{шт}} = 0,095 H_M^{0,89} V_C T / 273 \quad (19)$$

де V_C - швидкість знеуглецьовування, кг/с.

Встановлено, що для кисневого конвертора садкою 250т; $H_M = 1,256$ м и $H_{\text{ш}} = 0,4$ м (за середніх значень швидкості знеуглецьовування 0,2-0,3%/хв) D_M в гомогенній зоні розплаву має значення 0,3-0,32 м²/с; $D_{\text{ш}} = 0,095-0,11$ м²/с.

Температура ванни визначається за виразом

$$t(\tau) = (2,94 T_{\text{поч}} + 11019 \Delta [C] + 23590 k \Delta [C] + 3771 \Delta (\text{FeO}) + 5112 \Delta (\text{Fe}_2\text{O}_3) + 7335 \Delta [O]) / (2,94 + 4,95 \Delta [C] + 0,13 k \Delta [C] - 4,49 q_{\text{O}_2} \{ \text{CO}_2 \}), \quad (20)$$

де $t_{\text{поч}}$, $t_{\text{ст}}$ - температура чавуну, що заливається та температура сталі, відповідно, °С; $\Delta [C]$, $\Delta (\text{FeO})$, $\Delta (\text{Fe}_2\text{O}_3)$, $\Delta [O]$ - змінення вмісту відповідних елементів в металі та шлаці за розрахунковий період часу ($\Delta \tau$), %.

Чисельну реалізацію моделі проведено за неявною кінцево-різницевою схемою з використанням ЕОМ. Адаптацію моделі до конкретного агрегату здійснено вибором джерельних членів та постановкою граничних умов.

Моделюванням показана можливість незалежного управління окисленістю металу та шлаку шляхом перерозподілу дутьового кисню між ними. Встановлено, що швидкість змінювання окисленості шлаку ($V_{(\text{FeO})}$) може сягати значень 2-2,5 %/мін. Збільшення долі дуття в шлак на 10% від загальної витрати кисню приводить до зростання окисленості шлаку на 1%/хв, зниження - до такої ж швидкості падіння. Зниження витрати дуття в метал викликає зменшення швидкості знеуглецьовування. Одержано залежність швидкості змінення вмісту (FeO) від змінення долі кисню, що надходить в шлак.

Показано, що в умовах конвертерної ванни в період інтенсивного знеуглецьовування існує високоефективне перемішування, що забезпечує відносно невеликі перепади концентрацій по висоті розплаву. Це дозволило розглядати процес знеуглецьовування як систему з зосередженими параметрами та описати його моделлю у вигляді звичайних диференціальних рівнянь. Показано адекватність розробленої моделі реальним процесам.

3. ПОБУДОВА ДИНАМІЧНОЇ МОДЕЛІ КИСНЕВО-КОНВЕРТЕРНОГО ПРОЦЕСУ

Розроблено математичну модель знеуглецьовування з зосередженими параметрами. Визначено залежності градієнтів концентрацій кисню в шлаці $[O]^*$ і металі $[O]$ по глибині розплаву від ефективних коефіцієнтів дифузії для кисню в шлаці на межі шлак-метал

$$(O)^* = (O)_{\text{CP}} - \frac{2 H_{\text{III}}}{D_{\text{III}}} (0,0047 V_C + 0,0133) , \quad (21)$$

для кисню в металі на межі метал - шлак

$$[O]^* = [O]_{\text{CP}} + \frac{2 H_{\text{M}}}{D_{\text{M}}} (0,0079 - 0,00025 V_C) , \quad (22)$$

де $(O)_{\text{CP}}, [O]_{\text{CP}}$ - вміст кисню в шлаці та металі, відповідно, кг/м^3 .

Система рівнянь моделі має вигляд

$$\frac{d(O)}{d\tau} H_{\text{III}} = q_{\text{III}} - \beta_{\text{III}} (a^*_{(\text{FeO})} L_O - [O]^*) \quad (23)$$

$$\frac{d[O]}{d\tau} H_{\text{M}} = q_{\text{M}} + \beta_{\text{III}} (a^*_{(\text{FeO})} L_O - [O]^*) - 1,333 V_C \quad (24)$$

$$\frac{d[C]}{d\tau} H_{\text{M}} = - (q_C + V_C) \quad (25)$$

$$V_C = K [C] ([O] - [O]_{\text{P}}) \quad (26)$$

де позначкою * відмічено значення параметрів на межах розподілу фаз. Початкові умови замінено інтегральними рівняннями балансів, наприклад для вуглецю

$$[C]_{\tau} = [C]_0 - \int_0^{\tau} (V_C + q_C) d\tau , \quad (27)$$

де $[C]_0$ - вміст вуглецю на початку процесу інтенсивного зневугльцювання, %.

Розрахунок побудовано на розв'язанні системи рівнянь динамічних матеріального та теплового балансів. Модель реалізовано на ПЕОМ типу *IBM PC/XT*. Час розрахунку, в залежності від початкових умов, складає 0,5-1,5 хв., що в 10-15 разів швидше реального часу процесу. Показано, що опис процесу в рівняннях з зосередженими параметрами не знижує точність прогнозування показників.

Повну інформацію про хід плавки можуть дати моделі, опис яких виконано на основі фундаментальних рівнянь з використанням принципів фізико-хімічної подібності.

В початковий період плавки при значних відхиленнях від рівноваги ($A/RT > 1$) окислення домішок відбувається одночасно зі швидкостями, що визначаються кінетичними показниками, швидкість процесу лімітується величиною потоку кисню, що витрачається на окислення домішок. Поблизу рівноваги ($A/RT < 1$) швидкість окислення домішок залежить від рівноважних концентрацій елементів в реакціях окислення, які визначаються механізмом здійснення реакції. В даній роботі реакцію окислення вуглецю вибрано як основну, відносно якої визначалася витрата кисню на окислення інших елементів.

Вираз для визначення співвідношення витрат кисню має вигляд

$$\frac{W_I}{W_C} = k'_1 \exp[\Delta E'_{3\Phi} / RT] \frac{(x_{[O]} - x_{P[O]})}{(x_{[C]} - x_{P[C]})} \quad (28)$$

Потік кисню на окислення I -го елемента визначається з співвідношення

$$I_1 = I_3 \frac{k_3 (x_{[O]} - x_{P[O]})}{\sum [k_3 (x_{[O]} - x_{P[O]})]} \quad (29)$$

$$\sum [k_3 (x_{[O]} - x_{P[O]})] = (x_C - x_{PC}) + k'_{Si}(x_{Si} - x_{PSi}) + k'_{Mn}(x_{Mn} - x_{PMn}) + k'_P(x_P - x_{PP}), \quad (30)$$

де I_3 -сумарний потік кисню, що витрачається на окислення домішок.

Повна модель конвертерного процесу являє собою систему диференціальних рівнянь окислення вуглецю (23 - 27) та інших домішок (Si, Mn і P), розчинювання присадок, шлакоутворення, плавлення брухту та рівнянь миттєвих балансів (теплового та матеріального).

$$\frac{d[Si]}{d\tau} H_M = 1,14 k'_{Si} (x_{Si} - x_{PSi}), \quad (31)$$

$$\frac{d[Mn]}{d\tau} H_M = 0,29 k'_{Mn} (x_{Mn} - x_{PMn}), \quad (32)$$

$$\frac{d[P]}{d\tau} H_M = 1,29 k'_P (x_P - x_{PP}). \quad (33)$$

Поточні концентрації елементів визначаються за рівняннями балансу

$$[O]_{\tau} = [O]_0 + \int_0^{\tau} (I_{III} - I_{III-M}) d\tau, \quad (34)$$

$$[O]_{\tau} = [O]_0 + \int_0^{\tau} (I_M + I_{III-M} - I_D) d\tau, \quad (35)$$

$$[Si]_{\tau} = [Si]_0 - \int_0^{\tau} d[Si] d\tau, \quad (36)$$

$$[Mn]_{\tau} = [Mn]_0 - \int_0^{\tau} d[Mn] d\tau, \quad (37)$$

$$[P]_{\tau} = [P]_0 - \int_0^{\tau} d[P] d\tau, \quad (38)$$

де $[O]_0, [O]_{\tau}, [Si]_0, [Mn]_0, [P]_0$ - початкові концентрації елементів в шлаці та металі, кг/м³; $I_M, I_{III-M}, I_{III}, I_D, I_{P3}$ - потоки дутьового кисню в метал, з шлаку в метал, в шлак, на окислення домішок та в реакційну зону, відповідно, кг/(м² с).

Розроблено модель плавлення брухту. В основу розробленої моделі розчинення металобрухту покладено припущення Д.А. Франк-Каменецького, що в крайній області турбулентності масоперенесення визначається тільки характеристиками потоку.

Загальна кількість скрапу, що розплавився на даний момент продукції, розраховується слідуючим чином. Поточна маса твердого брухту в розплаві M_{TB} знаходиться з виразу

$$M_{TB} = M_{НД} - \sum m_i, \quad (39)$$

де $M_{НБ}$ - кількість твердого брухту в шихті,

$$m_i = M_{НБ} \theta_{В}, \quad (40)$$

де $\theta_{В}$ - відносний час повного розплавлення брухту, m_i - маса i -го виду брухту в шихті.

На основі результатів математичних експериментів і з врахуванням відомих літературних даних апроксимовані вирази для опису плавлення брухту різної компактності. Рівняння мають вигляд:

для великовагового брухту

$$M_{ПД}(\tau) = -15,56 + 4,406 \tau - 0,2034 \tau^2 + 0,00418 \tau^3 - 0,0000264 \tau^4, \quad (41)$$

для легковагового брухту

$$M_{ПД}(\tau) = 9,524 + 4,518 \tau - 0,0567 \tau^2 - 0,00178 \tau^3 + 0,0000522 \tau^4, \quad (42)$$

для пакетів

$$M_{ПД}(\tau) = 4,157 - 0,02389 \tau + 0,0374 \tau^2 + 0,000163 \tau^3 - 0,00000475 \tau^4, \quad (43)$$

де τ - відносний час процесу.

Змінення активностей компонентів в процесі шлакоутворення описано на основі методу В.А.Кожеурова. Склад шлаку на початок продукції прийнято як суму оксидів міксерного шлаку, забруднень та окалини брухту. Змінення складу шлаку в ході продукції описане рівнянням

$$m_{(R_xO_y)}(\tau) = m_{(R_xO_y)}(\tau-1) \pm \Delta m_{(R_xO_y)}, \quad (44)$$

$$\text{де } \Delta m_{(R_xO_y)} = \frac{M_{(R_xO_y)}}{M_{(R_x)}} \Delta \varepsilon$$

- приріст маси компонентів шлаку за час τ , $m_{(R_xO_y)}(\tau)$ - поточна маса складових шлаку, $m_{(R_xO_y)}(\tau-1)$ - на попередньому кроці за часом.

Маса шлаку розраховується за виразом

$$M_{Ш}(\tau) = \frac{100 \sum m_{Ш}}{(100 - \%(\text{FeO}))}, \quad (45)$$

де $\sum m_{Ш} = \int_0^{\tau} m_{(R_xO_y)} d\tau$ - сумарна кількість оксидів в шлаці, крім оксидів заліза, кг,

а маса металу, кг

$$M_M(\tau) = M_{Ч}(\tau) + M_{ПД}(\tau) - \sum \Delta [Me] - \Delta [Fe] \quad (46)$$

Засвоєння вапна описане рівнянням, що враховує масову швидкість розчинення твердої частки

$$-\frac{dM}{d\tau} = \frac{\beta_E ([\%Y]_{НАС} - [\%Y]) \rho_{Ж} S}{[\%Y]_{ТВ} - [\%Y]} \quad (47)$$

де $[\%G]_{\text{НАЧ}}$ и $[\%G]_{\text{ТВ}}$ - концентрація речовини G в рідкій фазі на початку процесу та в твердих частках, мас. %

Температура металу визначається за виразом

$$t(\tau) = (28,91M_M T_{\tau} + 6285H_{\text{III}} T_{\tau} + 4148100 \Delta H_{\text{III}} + 13848 \Delta [C] H_M + 113130 (\Delta H_{\text{III}} \Delta (\text{FeO}))) + 153354 (\Delta H_{\text{III}} \Delta (\text{FeO}) / F) + 7332H_M \Delta [O] / (28,91(M_{\tau} + M_{\text{II}}) + 6285H_{\text{III}} + 1,185 \Delta [C] H_M), \quad (48)$$

де H_{III} , H_M - поточна товщина шару шлаку та металу, відповідно, м.

Система рівнянь реалізована на мові QBasic і придатна для експлуатації на ПЕОМ типу IBM PC / AT; час чисельної реалізації складає 20-45 сек в залежності від початкових умов розрахунку. Система має ряд модулів: базу даних про хімічний склад шихтових матеріалів; меню користувача; обчислювальний і графічний блоки; збереження та друку результатів моделювання. Ввід вихідних даних (склад і витрата чавуну та брухту, витрата шихтових матеріалів до початку продувки, положення фурми на початок продувки); корекція положення фурми, витрати дутьового кисню, момент і кількість присадок сипких матеріалів відбувається з використанням екранних шаблонів (вікон).

Зіставлення результатів розрахунку з відомими виробничими даними показало достатньо високу адекватність моделі натурним процесам (рис 1) і можливість прогнозу порушень ходу технологічного процесу на основі моделювання, що дозволяє вжити заходів щодо їх запобігання. Встановлено закономірності ходу процесу при коливаннях деяких початкових умов.

Основними величинами, що визначають стійкість ходу конвертерного процесу, є вміст оксидів заліза в шлаці і температура металу. Моментом, що передує нестійкому ходу процесу, є зміна темпу росту температури, що призводить до зростання швидкості окислення вуглецю при одночасному зниженні переокисленості шлаку.

Робота моделі в режимі "машинного" часу дозволяє прогнозувати хід і результати плавки в міжплавочний період чи перед початком плавки, в режимі "реального" часу - з заданим випередженням прогнозувати та, при необхідності, коректувати хід плавки.

4. ІДЕНТИФІКАЦІЯ МОДЕЛІ КИСНЕВО - КОНВЕРТЕРНОГО ПРОЦЕСУ ТА ВИКОРИСТАННЯ ЇЇ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ І УПРАВЛІННЯ

Проведено аналіз впливу положення фурми і витрат дутьового кисню на засвоєння (η_{O}) та розподіл кисню між шлаком і металом (q_{III}/q_M). Запропоновано рівняння зв'язку засвоєння кисню ванною (η_{O}) з керуючими діями (висотою фурми) та витратою дуття (I_{O} , м³/хв $\times 10^2$),

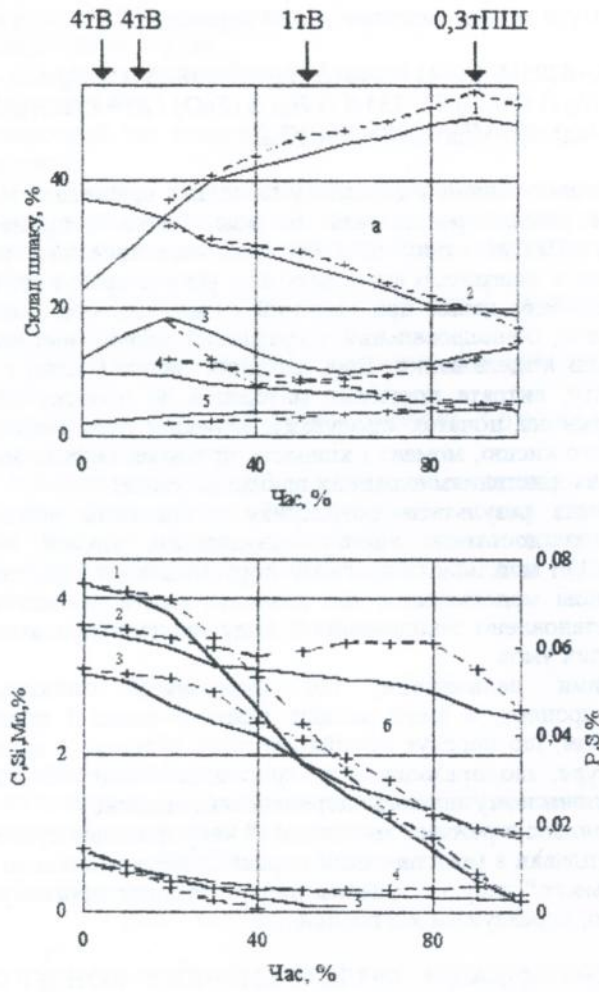


Рис 1. Зіставлення розрахункових (—) і промислових (---) даних по динаміці шлакоутворення (а) та окислення (б) домішок у 130-т кисневому конверторі з верхньою продувкою
 (а): 1-(CaO), 2-(SiO₂), 3-(FeO), 4-(MnO), 5-(Fe₂O₃)
 (б): 1-C; 2-S; 3-P; 4-Mn; 5-Si; → моменти присадки сипких

яке для кисневого конвертора садкою 250 т має вигляд

$$\eta_{\text{O}} = 76,72 + 7,12H - 2,6H^2 + 0,0154 I_{\text{O}}^2 - 0,185 I_{\text{O}}, \quad r=0,69 \quad (49)$$

Для умов роботи 250-т конвертора (положення фурми над рівнем ванни (H) змінюється від 0 до 3 м; витрати дуття - від 500 до 1300 м³/хв) одержано рівняння залежності співвідношення $q_{\text{ш}}/q_{\text{M}}$ від положення фурми. Залежність одержано статистичним аналізом узагальнених даних про витрату, склад газів, що відходять і вміст оксидів заліза в шлаці

$$q_{\text{ш}}/q_{\text{M}} = 0,1 - 0,237H + 0,232H^2, \quad r=0,678 \quad (50)$$

Ідентифікацію моделі здійснено по даним промислових плавок, що були проведені на 250-тонних конвертерах в умовах конвертерного цеху Дніпровського металургійного комбінату та на 130-тонних конвертерах №№ 4-6 конвертерного цеху № 2 Криворізького металургійного заводу (табл.1). Виконана перевірка адекватності моделі за критерієм Фішера. Відхилення по сумі плавок розрахункової температури металу на першій повалці становить $\pm 0,5\%$, хімічного складу металу: по Mn- $\pm 0,027\%$; S- $\pm 0,001\%$; шлаку: по ΣFeO - $\pm 1,1\%$; по MgO- $\pm 0,13\%$; CaO/SiO₂- $\pm 0,64\%$.

Розроблено конструкцію двоярусної фурми з незалежними потоками кисню та центральним охолодженням наконечника. (рис 2). Три основних укорочених сопла Лавалля критичного діаметра 0,061 м, що розташовані рівномірно по колу нижнього ярусу під кутом 8⁰ до вертикалі, забезпечують витрату кисню 600-900м³/хв. П'ять сопл другого ярусу діаметром 0,02 м, що розташовані під кутом 30⁰ до вертикалі, забезпечують витрату кисню 200-400 м³/хв. Відстань між ярусами - 0,9 м

Розроблено конструкцію двоконтурної фурми з нарізною подачею кисню на центральний і зовнішній контур (рис 3). Сопла розташовані на одному рівні, але з різними кутами нахилу до вертикальної осі фурми. Центральне сопло діаметром 0,071 м забезпечує підвід кисню в реакційну зону. П'ять периферійних сопл Лавалля критичного діаметра 0,049 м, що розташовані рівномірно по колу під кутом 20⁰ до вертикалі, призначені для регулювання окисленості шлаку.

Розроблено алгоритм ведення плавки з використанням двоконтурної фурми. Дослідні плавки з використанням фурми з незалежним підводом кисню на зовнішній та внутрішній ряд сопл проведені на 250-т конвертерах в умовах ККЦ Дніпровського металургійного комбінату. Випробування проведені при виплавці сталі марок Зкп, Зпс, 09Г2С. Було проведено 182 дослідних плавок, в тому числі з використанням розробленого алгоритму - 8 плавок.

Прогнозуючу модель конвертерної плавки застосовано в режим "порадника". Для аналізу результатів відібрано рівну кількість плавок, що проведені з використанням дослідної та штатної фурми. Аналізу підлягали 96 дослідних і 93 порівняльних плавки. За результатами випробувань проведено корегування модельних коефіцієнтів з метою наближення реальних значень параметрів плавки до тих, що прогножуються.

Таблиця 1 Основні фактичні та розрахункові технологічні показники плавок (250-т конвертер)

N плавки	Характеристики шихти								Характеристики металу на повалці (фактичні / розрахункові)						
	Марка сталі	Маса чавуну, т	Маса брухт, т	Вміст в чавуні, %				t _{чав.} , °C	Витрат вугілля т	Вміст в сталі, %			ΣFeO	t _{ст.} , °C	Σ витр. O ₂ , M ³
				Mn	Si	S	P			C	Mn	S			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
913317 Зпс	184	85	0,81	0,09	0,043	0,049	1330	0,70	0,04 0,04	0,040 0,042	0,038 0,040	18,90 19,10	1578 1580	15744 15752	
913314 40x	193	72	0,88	0,12	0,045	0,052	1264	1,30	0,04 0,04	0,050 0,050	0,037 0,038	27,30 26,10	1643 1640	16360 16357	
922811 Зпс	188	75	0,98	0,08	0,026	0,050	1332	1,60	0,04 0,04	0,040 0,043	0,038 0,040	15,91 15,20	1657 1658	13940 13944	
922801 Зпс	195	75	0,83	0,11	0,021	0,044	1330	0,70	0,06 0,06	0,030 0,034	0,035 0,036	15,46 16,09	1637 1631	13264 13256	
922917 Зкп	179	80	0,92	0,15	0,027	0,055	1323	1,77	0,05 0,05	0,050 0,048	0,050 0,046	20,38 20,11	1659 1650	15382 15370	
922915 Зпс	186	80	0,76	0,10	0,050	0,052	1315	1,94	0,05 0,05	0,040 0,044	0,042 0,042	25,17 24,30	1568 1578	15215 15200	
922815 Зпс	194	77	0,69	0,08	0,022	0,049	1306	0,90	0,06 0,06	0,040 0,038	0,035 0,040	15,46 17,10	1630 1619	12562 12670	
922827 Зпс	192	75	0,9	0,10	0,021	0,047	1320	0,90	0,06 0,06	0,040 0,043	0,046 0,045	19,03 19,60	1596 1600	14832 14851	
922914 20тр	179	80	0,78	0,10	0,056	0,055	1300	0,58	0,04 0,04	0,030 0,040	0,037 0,039	35,61 32,10	1528 1540	16875 16780	
922912 15сп	182	81	1,41	0,15	0,026	0,057	1336	0,72	0,05 0,05	0,040 0,040	0,042 0,046	15,23 16,10	1635 1627	13750 13827	

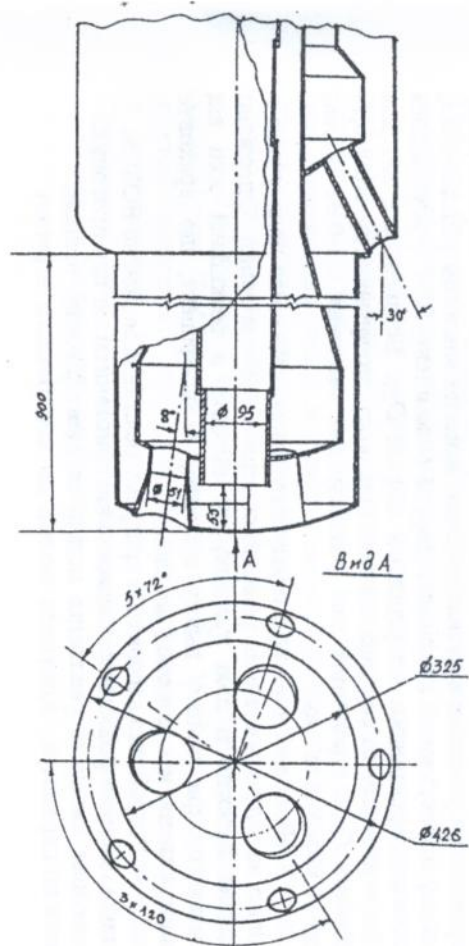


Рис 2. Двогуста фурма

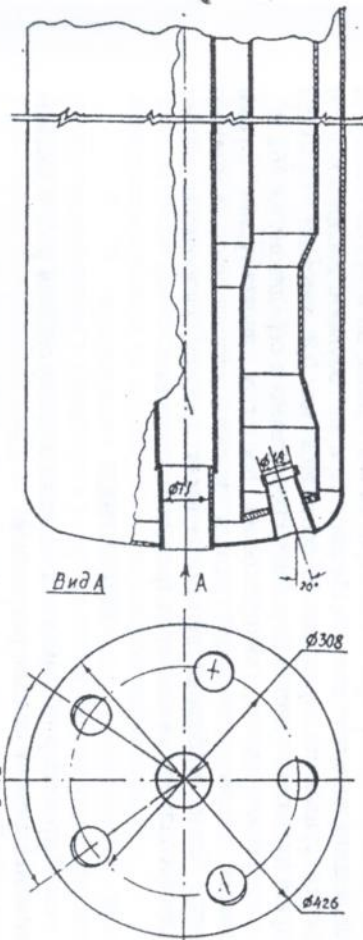


Рис 3. Двокопурна фурма

На дослідних плавках середньо-інтегральне значення лужності шлаку збільшилося на 7%, коефіцієнту розподілу марганцю - зменшилось на 11%. Досягнуто зниження вмісту (FeO) в кінцевому шлаці на 1,5% абс., що відповідає скороченню втрат заліза в шлак на 0,44т на плавку та збільшенню виходу годного 0,1% абс. При застосуванні дослідних фурм середня тривалість продувки скоротилася на 0,8 хвилини. Сумарна витрата дуттєвого кисню на плавку скоротилася в середньому на 762 м³.

Таким чином, використання дослідної двокомурної фурми дозволяє одержати менший розкид значень окисленості кінцевого шлаку, більш стабільний варіант ведення процесу, скорочення витрат дуттєвого кисню на плавку та тривалості продувки.

ВИСНОВКИ

В процесі розв'язання поставлених в дисертаційній роботі завдань одержані наступні основні результати:

1. Вперше створено детерміновану динамічну модель киснево-конвертерної плавки на основі рівнянь масообміну з використанням принципів фізико-хімічної подібності, що враховують відхилення реакцій від рівноваги, для одержання більш точної інформації про зміну основних параметрів по ходу процесу. Встановлено, що безрозмірні потоки кисню на окислення C, Si, Mn, P дорівнюють добутку чисел Дамкелера по кисню для кожної домішки на її безрозмірну концентрацію. Обробкою експериментальних даних одержані вирази для відносних кінетичних коефіцієнтів K_{Si} , K_{Mn} , K_P які входять до рівнянь потоків кисню, що витрачається на окислення домішок.

2. Розроблена детермінована модель процесу зневугльцювання у ванні кисневого конвертора. Модель описано системою диференціальних рівнянь в часткових похідних з розподіленими параметрами. Перенесення речовини в металі та шлаці описане аналогом рівнянь Фіка, в якому молекулярний коефіцієнт дифузії D замінено його турбулентним аналогом- ефективним коефіцієнтом дифузії $D_{Eф}$. Встановлено, що для 250-т конвертора за середніх значень швидкості зневугльцювання 0,2-0,3%/мин D_M в гомогенній зоні розплаву має значення 0,3-0,32 м²/сек; $D_{шл}$ - 0,095-0,11 м²/сек.

3. На основі аналізу літературних даних визначена доля участі в процесі зневугльцювання реакційної зони та об'єма ванни. Одержано рівняння залежності долі вуглецю що вигоріє в реакційній зоні від загального, при різному вмісту вуглецю, та коефіцієнту, що враховує розподіл кисню між шлаком і металом.

4. Розроблено алгоритм і програму реалізації моделі на ЕОМ за неявною кінцево-різницевою схемою з використанням методу прогонки. Проведена чисельна реалізація моделі та ідентифіковані основні кінетичні параметри. Адаптація моделі до конкретного агрегату

(кисневого конвертеру садкою 250 тонн з верхньою продувкою) здійснена вибором джерельних членів та постановкою граничних умов.

5. Результатами модельних експериментів показано, що зменшення швидкості знеуглецювання при $[C] < 0,3\%$ можна пояснити на основі загального опису процесу перенесення домішок та їх взємодії на макрорівні. Показано можливість здійснення незалежного управління окисленістю металу та шлаку шляхом перерозподілу дуттєвого кисню між ними. Швидкість змінення вмісту (FeO) може сягати значень 2-2,5%/хв за незначної зміни окисленості металу. Встановлено, що в умовах інтенсивного знеуглецювання існує відносно невеликий перепад концентрацій домішок по висоті ванни. Це дозволило розглядати процес знеуглецювання як систему з зосередженими параметрами.

6. З врахуванням вищевикладеного розроблено модель знеуглецювання в рівняннях з зосередженими параметрами. Визначені залежності градієнтів концентрацій (O) та [O] по глибині розплаву від ефективних коефіцієнтів дифузії. Модель доповнено системою рівнянь динамічних матеріального та теплового балансів, що враховують окислення домішок до початку інтенсивного знеуглецювання. Проведено ідентифікацію та чисельну реалізацію моделі на ЕОМ типу *IBM PC*. Показано адекватність моделі реальному процесу.

7. Розроблено фізико-хімічну та математичну модель киснево-конверторної плавки на основі принципів фізико-хімічної подібності. Модель представлена системою диференціальних рівнянь окислення домішок, формування окислювального потенціалу металу та шлаку, процесу шлакоутворення, розчинення присадок та плавлення брухту. В початковий період плавки при значних відхиленнях від рівноваги ($A/RT > 1$) окислення домішок відбувається одночасно зі швидкостями, що визначаються кінетичними показниками, швидкість процесу лімітується величиною потоку кисню, який витрачається на окислення домішок. Поблизу рівноваги ($A/RT < 1$) швидкість окислення домішок залежить від величини відхилення реакцій від рівноваги.

8. Адаптація моделі до конкретного агрегату відбувається вибором джерельних членів і постановкою граничних умов. При цьому уточнюються значення коефіцієнтів в рівняннях, що визначають масоперенесення кисню зі шлаку в метал, величину константи об'ємної швидкості реакції знеуглецювання та вплив керуючих дій на розподіл кисню між шлаком і металом.

9. Розроблено алгоритм та програму чисельної реалізації моделі на ЕОМ типу *IBM PC*. Час розрахунку складає 15-40 сек. Робота моделі в режимі "машинного" часу дозволяє прогнозувати хід і результати плавки в міжплавочний період чи перед початком продувки; в режимі "реального" часу - з заданим випередженням прогнозувати та, при необхідності, корегувати хід процесу.

10. Зіставлення результатів розрахунку з відомими промисловими даними показало достатньо високу адекватність моделі натурним процесам і можливість прогнозу порушень ходу технологічного процесу на основі моделювання, що дозволяє вжити заходів для їх запобігання. Встановлені закономірності ходу процесу при коливаннях деяких початкових умов. Проведено дослідження щодо впливу різних факторів на основні показники плавки в широкому діапазоні початкових умов. Вивчено вплив температури та хімічного складу чавуну, компактності й хімічного складу брухту, фракційного складу вапна, інтенсивності продувки та положення фурми, зносу футеровки на показники процесу. Так, при використанні великовагового брухту окисленість шлаку на початку дещо знижується, температура ванни зростає. Застосування легковагового спричиняє різкі стрибки температури, зменшення швидкості зневугльцювання та прискорення переокислення шлаку. По мірі вигорання вуглецю та зниження маси нерозплавленого брухту криві наближаються. Динаміка окислення вуглецю змінюється несуттєво через те, що збільшення поверхні брухту з одного боку спричиняє зниження концентрації вуглецю за рахунок розбавлення розплаву, а з іншого - до зменшення швидкості зневугльцювання за рахунок зниження температури ванни.

11. Моделюванням показано, що відносні потоки кисню, що витрачається на окислення домішок, мають достатньо добре відомий характер. Після 30% часу продувки, значна частина кисню витрачається на окислення вуглецю. На степінь засвоєння та розподіл дуттьового кисню впливають положення фурми та інтенсивність продувки. Встановлено, що положення фурми чинить більший вплив, ніж змінення інтенсивності продувки. Обробкою промислових даних одержані рівняння зв'язку засвоєння та розподілу дуттьового кисню між шлаком і металом з керуючими діями.

12. Розроблено конструкцію двоярусної 8-ми соплової фурми з центральною подачею води на охолодження та незалежним підводом кисню на кожний ярус сопел. Розроблена конструкція 6-ти соплової двоконтурної фурми з нарізною подачею кисню на центральний та зовнішній контур.

13. Розроблено алгоритм динамічного управління плавкою. Використання його дозволяє оптимізувати хід процесу та підвищити вихід рідкої сталі. Проведена серія дослідних плавок з використанням розробленої двоконтурної фурми. Використання дослідної фурми дозволяє одержати більш стабільний варіант ведення процесу. На підставі аналізу результатів дослідних плавок встановлено, що при застосуванні розробленої фурми підвищилась лужність, знизився вміст оксидів заліза в кінцевому шлаці та збільшився вихід гідного на 0,1%.

1. Яковлев Ю.Н., Камкина Л.В., Рыдванская Т.В., Сигарев Е.Н. // Анализ различных динамических моделей процесса обезуглероживания и их использование при исследовании сталеплавильных процессов // Известия вузов. Черная металлургия. 1992. №6. С.65-68.
2. Сигарев Е.Н., Яковлев Ю.Н., Учитель Л.М., Рыдванская Т.В. // Математическая модель обезуглероживания в ванне кислородного конвертера // Известия вузов. Черная металлургия. 1991. № 12. С.64-67.
3. Яковлев Ю.Н., Рыдванская Т.В., Сигарев Е.Н. // Анализ необратимости процессов в сталеплавильных агрегатах как в открытых металлургических системах и разработка динамической прогнозирующей модели процесса обезуглероживания // Труды I конгресса сталеплавильщиков. Ассоциация сталеплавильщиков. Москва. АО "Черметинформация". М. 1992. С.89-93.
4. Яковлев Ю.Н., Камкина Л.В., Сигарев Е.Н., Рыдванская Т.В. // Динамическая прогнозирующая модель конвертерного процесса на принципах неравновесности металлургических реакций // Труды II Конгресса сталеплавильщиков. 1993. Липецк. Ассоциация сталеплавильщиков. АО "Черметинформация". М. 1994. С. 118-120.
5. Яковлев Ю.Н., Учитель Л.М., Сигарев Е.Н., Рыдванская Т.В. // Использование модели с сосредоточенными параметрами для описания процесса обезуглероживания // Тезисы докладов Всесоюзного совещания "Моделирование физико-химических систем и технологических процессов в металлургии". Новокузнецк. 1991. С. 64-67.
6. Яковлев Ю.Н., Рыдванская Т.В., Сигарев Е.Н., Кожемяко Е.В. // Математическое моделирование процесса обезуглероживания в двухваннных печах при продувке ванны кислородом // Тезисы докладов II Всесоюзного совещания "Применение ЭВМ в научных исследованиях и разработках". Днепропетровск. 24-27 октября. 1989. С. 49-50.
7. Яковлев Ю.Н., Учитель Л.М., Сигарев Е.Н., Иванов А.В., Рыдванская Т.В. // Исследование кинетики окисления углерода в сталеплавильных процессах с помощью математических моделей // Тезисы докладов X Всесоюзной конференции "Физико-химические основы металлургических процессов". Часть 2. Москва. 1991. С.121-125.
8. Яковлев Ю.Н., Учитель Л.М., Сигарев Е.Н., Рыдванская Т.В. // Математическое моделирование процессов обезуглероживания в конвертерной ванне // Тезисы докладов II Всесоюзного совещания "Базы физико-химических и технологических данных для оптимизации металлургических технологий". КМИ. Курган. 1990. С.110-111.
9. Сигарев Е.Н., Рыдванская Т.В. // Динамическая модель с сосредоточенными параметрами процесса обезуглероживания в кислородном конвертере // Тезисы докладов V Всесоюзной конференции "Тепло- и массообменные процессы в ваннах сталеплавильных агрегатов". ММИ. Мариуполь. 1991. С. 56-57.

АНОТАЦІЯ

Сігарьов Є.М. “Розробка динамічної моделі киснево-конвертерного процесу з використанням принципів фізико-хімічної подібності для дослідження та управління”. Дисертація на здобуття вченої ступені кандидату технічних наук з спеціальності 05.16.02. “Металургія чорних металів”. Державна металургійна академія України, м. Дніпропетровськ, 1997 р.

Захищаються результати теоретичних та експериментальних досліджень ходу киснево-конвертерного процесу з використанням математичної моделі. Розроблені фізико-хімічна та математична моделі киснево-конвертерного процесу на основі принципів фізико-хімічної подібності. Встановлені закономірності ходу процесу при коливаннях початкових умов. Розроблена конструкція дослідної фурми та технологія ведення плавки з використанням математичної моделі. Проведено дослідно-промислово апробацію на Дніпровському металургійному комбінаті.

ANNOTATION

Sigaryov E.N. “The development of oxygen converter process dynamic model with the use of physico-chemical similarity principles for investigation and control”. Dissertation for the scientific degree of Candidate of Science (Eng.) on the speciality “Ferrous metal metallurgy” 05.16.02. State metallurgical academy, Ukraine, Dnepropetrovsk, 1997.

The results of theoretical and experimental investigations of the oxygen converter process with the use of mathematical model are defended.

A physico-chemical and mathematical model of oxygen-converter smelting based on the physical-chemical similarity principles has been developed. The process regularities by some initial condition changes have been established. The structure of an experimental tuyere and technology of smelting with the use of mathematical model has been developed. The results of the work have been experimentally probed at the Dneprovsky iron and steel works.



Австралія

Підписано до друку 15.05.97. Формат 60x84 1/6
Об'єм 0,85 ум.арк. Тираж 100 прим. Зам. № 381
Безкоштовно, різнограф ДДТУ
322618, Дніпродзержинськ, вул. Дніпробудівська, 2

Faint, illegible text at the top of the page, possibly a header or introductory paragraph.

Second paragraph of faint, illegible text.

SYNOPSIS

Third paragraph of faint, illegible text.

Fourth paragraph of faint, illegible text.

Faint text at the bottom of the page, possibly a footer or reference information.