

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО ТА МАШИНОБУДУВАННЯ

УДК 669.184

В.С. Богушевський, В.Ю. Сухенко, С.В. Кадигроб, А.О. Шульга

ВПЛИВ ПАРАМЕТРІВ УСТАТКУВАННЯ КОНВЕРТЕРА НА СОБІВАРТІСТЬ СТАЛІ

The influence of technological and human factors on the cost of steel, the improvement of the process and the organization of production were investigated. Technological factors include the basicity of slag, lining life, rate of oxygen input, changes in nitrogen content in the metal, clean of blowing, conditions of slag formation. Statistical relationship between the lining life and the basicity of slag was obtained. Found that the most important factors that affect the resistance lining this is a temperature in bath, chemical composition of the slag, duration of blowing time and idle time. Statistical relationship the action of average number turndown converter for melting on lining life was obtained. The study found that the control system can realize the basic provisions to reduce the cost of BOF steel, which is associated with an increase of scrap, lining life of the unit and weight yield, reduced material consumption, improve the process and the organization of production, reducing the duration of blowing and melting in general. The indicators received from the first turndown of the main parameters of melting – the carbon content and the temperature of the bath, and the simultaneous achievement of these parameters were presented.

Keywords: BOF, parameters of melting, cost of steel, APCS.

Вступ

Економічний ефект автоматизованої системи керування технологічним процесом (АСК ТП) конвертерного виробництва досягається за рахунок випуску плавки за заданими марками сталі, підвищення виходу корисного, підвищення якості продукції, економії матеріалів, робочої сили, зниження тривалості плавки, а також підвищення ефективності керування в результаті покращення інформаційного забезпечення експлуатаційного персоналу. Це дає змогу підвищити ритмічність і координацію роботи автоматизованого технологічного комплексу, попередити виникнення аварійних ситуацій, знизити простой технологічних агрегатів з організаційних причин, підвищити коефіцієнти використання устаткування тощо. Крім цього, впровадження АСК має важливі соціальні наслідки, вивільняючи обслуговуючий персонал від напруженої рутинної роботи, покращуючи умови праці й змінюючи її характер. При цьому підвищується змістовність праці й творча складова в ній [1, 2].

Упровадження АСК у виробництво проходить протягом кількох років у складних, постійно змінюваних організаційно-технічних і економічних умовах виробництва при одночасній дії багатьох взаємозалежних факторів технічного, технологічного й організаційного характеру. Практично неможливо досягти такого стану, за якого вплив системи проявився б у чистому вигляді, при сталому значенні неконтрольованих збурень. Тому економічну ефективність оцінюють на основі аналізу великого ма-

сиву звітних даних роботи цеху з АСК ТП і без неї [3, 4].

Наведені в статті дослідження проводились у Національному технічному університеті України “КПІ” за темою “Модель керування конвертерною плавкою по енергозберігаючій технології”, державний реєстраційний номер 0112U003476.

Постановка задачі

Мета роботи – дослідити зв’язок між технологічними параметрами роботи устаткування конвертера й основними статтями собівартості сталі.

Результати досліджень

Розглянемо вплив деяких технологічних факторів на собівартість сталі. Одним із важливих параметрів плавки є основність кінцевого шлаку, що визначається за інших рівних умов не масою введених шлакотвірних матеріалів, а масою розчиненого вапна [5]. На практиці основність кінцевого шлаку коливається в широких межах, у результаті чого змінюється собівартість сталі. З метою визначення оптимального значення основності для мінімізації собівартості продукції нами досліджено зв’язок основності шлаку з масовою часткою заліза в ньому та стійкістю футерівки конвертера. Для 130-тонного конвертера Єнакіївського металургійного заводу (ЄМЗ) сумарна частка оксидів заліза в шлаку через його основність можна виразити статистичним рівнянням [6]

$$\sum_0^{\tau_k} \text{FeO} = 2,91 + 4,72B \quad (1)$$

$$(r = 0,55, \sigma = 3,1\%, P > 0,950),$$

де τ_k – тривалість продувки, хв; FeO – частка оксидів заліза в шлаку, %; B – основність кінцевого шлаку; r – коефіцієнт кореляції; σ – середнє квадратичне відхилення; P – достовірність коефіцієнта кореляції.

Фізико-хімічно залежність (1) пояснюється кращим розчиненням вапна більш залістим шлаком.

Масу шлаку можна подати приблизно як суму маси заліза, оксидів силіцію, кальцію, мангану і магнію [7]:

$$m_{\text{шл}} = 1,25(m_{\text{Fe}} + m_{\text{SiO}_2} + m_{\text{CaO}} + m_{\text{MnO}} + m_{\text{MgO}}), \quad (2)$$

де $m_{\text{шл}}$, m_{Fe} , m_{SiO_2} , m_{CaO} , m_{MnO} , m_{MgO} – маси відповідно кінцевого шлаку, заліза, оксидів силіцію, кальцію, мангану і магнію в шлаку, т; 1,25 – коефіцієнт, що враховує масове співвідношення між m_{Fe} і $\sum \text{FeO}$.

Оскільки

$$m_{\text{Fe}} = 0,01 \sum \text{FeO} m_{\text{шл}}, \quad (3)$$

$$B = \frac{m_{\text{CaO}}}{m_{\text{SiO}_2}}, \quad (4)$$

а частки MnO і MgO при переробці низькоманганових чавунів, що має місце останніми роками, є величинами приблизно сталими, то кінцеве рівняння маси заліза як функції основності кінцевого шлаку має вигляд

$$m_{\text{FeO}} = \frac{\text{Si}_q m_q (0,015 + 0,105B + 0,086B^2)}{(79,3 - 4B)}, \quad (5)$$

де Si_q – масова частка силіцію в чавуні, %; m_q – маса чавуну, т.

Відомо, що з підвищенням основності підвищується стійкість футерівки [8]. Авторами отримана статистична залежність

$$N = N_{\text{ср}} + 68(B - 2,5) \quad (6)$$

$$(r = 0,46, \sigma = 19,3\%, P > 0,950),$$

де $N, N_{\text{ср}}$ – відповідно поточна стійкість футерівки і стійкість футерівки, що відповідає основності 2,5.

На рис. 1 наведено графік залежності прирощення відносної собівартості сталі від основності кінцевого шлаку, що побудований за таких умов: $m_6 = 31$ т, $m_q = 114$ т, $\text{Si}_q = 0,6\%$. Крива 1 відповідає залежності

$$\Delta C_1 = \frac{\text{Si}_q m_q (C_6 m_6 + C_q m_q) (0,015 + 0,105B + 0,086B^2)}{m_c^2 C_{\text{мін}} (79,3 - 4B)}, \quad (7)$$

де ΔC_1 прирощення відносної собівартості, грн/т; C_6, C_q – питома ціна відповідно брухту й чавуну; m_6, m_c – відповідно маса брухту й садки конвертера, т; $C_{\text{мін}}$ – питома мінімальна за основністю собівартість сталі, грн/т.

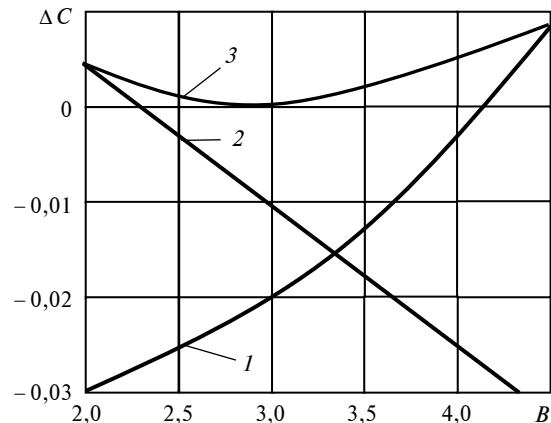


Рис. 1. Залежність прирощення відносної собівартості сталі від основності кінцевого шлаку: 1 – подорожчання внаслідок збільшення вигару заліза; 2 – здешевлення внаслідок збільшення стійкості футерівки; 3 – сумарна зміна

Криву 2 аналітично можна подати як

$$\Delta C_2 = -K(N_{\text{ср}} + 68B)/C_{\text{мін}}, \quad (8)$$

де ΔC_2 – прирощення відносної собівартості сталі; K – коефіцієнт, що визначає питому економію витрат на вогнетриву при збільшенні на одну плавку стійкості футерівки, грн/т.

Диференціюючи функцію $\Delta C_1 + \Delta C_2$ по B і прирівнюючи похідну до нуля, отримуємо оптимальне за собівартістю значення основності, що дорівнює для вибраних умов 3,3. Для всього діапазону початкових умов оптимальне значення собівартості коливається в межах 3,0–3,5.

Нами досліджено вплив середньої кількості повалок на плавку на стійкість футерівки конвертера. Статистичній обробці були піддані плавки по 30 компаніях. Графік (рис. 2) може бути пояснений тим, що внаслідок скорочення числа проміжних повалок зменшується кількість тепломінів футерівки, від якої обернено пропорційно залежить стійкість вогнетривів. Результати статистичної обробки: $r = -0,76$, $\sigma = 0,19$, $P > 0,950$.

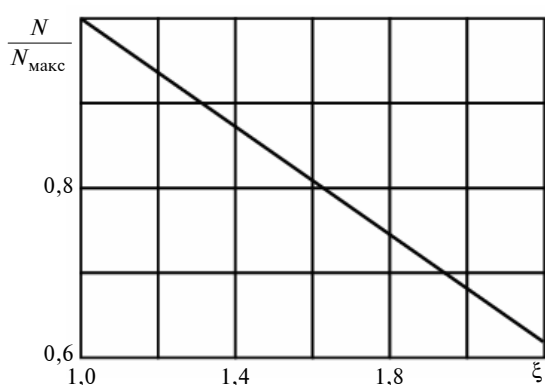


Рис. 2. Залежність відносної стійкості футерівки конвертера від кількості повалок на плавку

До найважливіших факторів, що впливають на стійкість футерівки конвертера, належать температура ванни, хімічний склад шлаку, тривалість продувки й простою агрегату. Перегрів плавки призводить до інтенсивного зношення футерівки в результаті підвищення активності кінцевого шлаку, що своєю чергою збільшує собівартість сталі. Холодні плавки також збільшують собівартість готового продукту внаслідок того, що вони зазвичай коректуються додувками при високому положенні фурменого кінцевика над ванною з утворенням великої маси залістого шлаку, що знижує стійкість футерівки конвертера.

На 350-тонних конвертерах комбінату "Азовсталь" досліджено вплив інтенсивності подачі кисню на економічні показники процесу [9]. З підвищенням інтенсивності продувки за інших рівних умов тривалість продувки скорочується, а втрати металу збільшуються, внаслідок чого продуктивність конвертера збільшується непропорційно скороченню тривалості продувки. Питома витрата кисню при цьому збільшується.

Втрати металу призводять до підвищення витрат на задане, що разом із витратами на кисень не повністю компенсуються зниженням витрат по переробці. Внаслідок цього собівар-

тість сталі з підвищенням витрати кисню збільшується.

Підвищення якості дуття (98,0–99,5 %) покращує економічні показники процесу. Так, з підвищенням об'ємної частки в кисневому дутті на 0,1 % продуктивність конвертера збільшується на 8–9 т/год (у середньому на 2,8 %), собівартість знижується приблизно на 0,54 %, а фондоємність – на 1,5–3 %.

Нами на 160-тонному конвертері були проведені дослідження з виявлення залежності масової частки азоту в металі від низки факторів. Статистична обробка експериментальних даних дала можливість установити, що частка азоту в металі за однакової частки вуглецю зростає зі збільшенням кількості додувок (рис. 3). Це пов'язано, вочевидь, з інтенсивним підсмоктуванням повітря на початку додувки, а також з низькою швидкістю зневуглецювання металу в цей період. Результати статистичної обробки: $r = 0,71$, $\sigma = 0,0001$, $P > 0,950$.

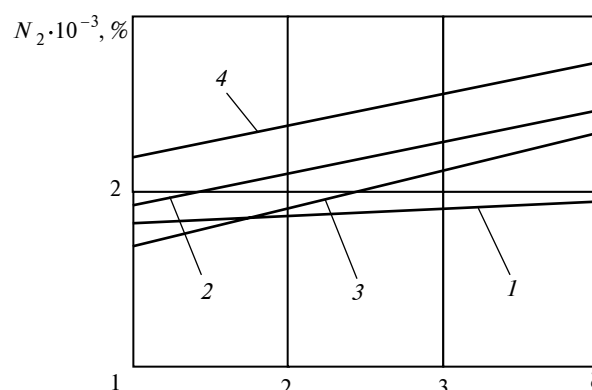


Рис. 3. Залежність масової частки азоту в металі від числа повалок конвертера при частці вуглецю, %: 1 – $0,4 < C \leq 0,6$; 2 – $0,3 < C \leq 0,4$; 3 – $0,2 < C \leq 0,3$; 4 – $0,07 < C \leq 0,2$

При дослідженні зміни частки азоту в металі по ходу додувки з метою виключення впливу технологічних параметрів процесу – частки азоту в чавуні, умов шлакоутворення, чистоти дуття – проби дуття для аналізу на азот відбирали до і після додувки й за різницею аналізів визначали прирощення частки азоту. Встановлено, що це прирощення залежить від тривалості додувки (рис. 4). На початку додувки частка азоту збільшується, вочевидь, стрибкоподібно, потім внаслідок десорбції азоту пухирцями CO знижується. В кінці додувки зі зменшенням швидкості зневуглецювання частка азоту незначно збільшується. АСК ТП, зменшуючи кількість повалок конвертера й частку

азоту в металі, сприяє підвищенню якості виплавленої сталі.

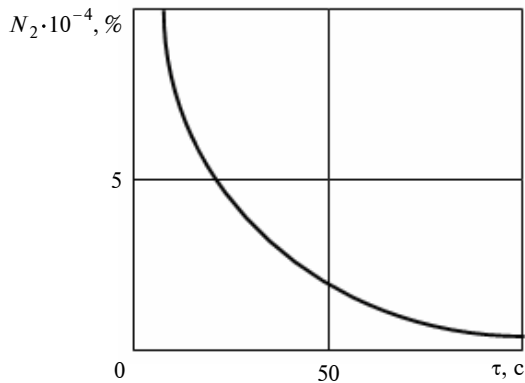


Рис. 4. Залежність приросту масової частки азоту від тривалості додувки

У процесі впровадження АСК ТП конвертерного виробництва сталі на ЄМЗ нами на всіх етапах проведені дослідження економічної ефективності роботи системи, проаналізовані статті собівартості продукції. Поряд із традиційними статтями розрахунку економічного ефекту, такими як підвищення продуктивності конвертерного цеха, зниження витрати шихти, вогнетривких матеріалів і розкиснювачів, підвищення виходу корисного, необхідно враховувати статті розрахунку, що пов'язані з підвищенням випуску замовлених марок сталі, оскільки при зменшенні цього показника (рис. 5), крім прямих втрат, що пов'язані з переводом якісних марок сталі в рядові, мають місце ще втрати у вигляді штрафів, неустойок, пені, що виплачуються споживачам металу. При річному випуску незамовлених марок сталі у розмірі 11,2 % невиробничі витрати збільшуються на 25,9 млн грн. АСК дає можливість закінчувати продукцію із заданими якісними показниками

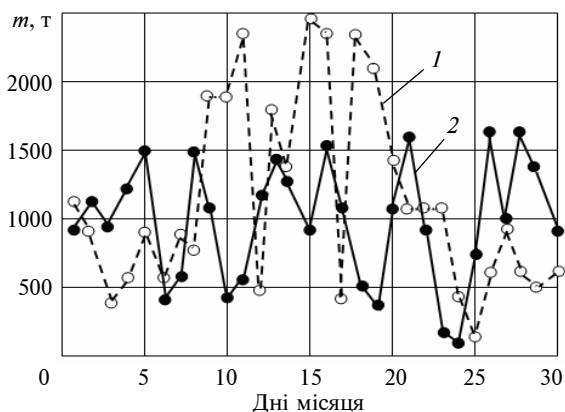


Рис. 5. Графіки заданого (1) і фактичного (2) добового виробництва сталі *m* марки НЛЗ5ГС протягом місяця

металу й видавати сталь по марках й асортименту відповідно до портфеля замовлення й вимог технології прокатного виробництва. Це дає змогу скоротити брак, звести до мінімуму економічні санкції (штрафи).

Складність вирішення теоретичних і практичних задач зі створення АСК ТП не дає змоги в короткий строк використати переваги обчислювальної техніки, тому що отримання найбільшої ефективності системи в процесі її промислової експлуатації розтягується на декілька років. З урахуванням готовності технологічного агрегату відбувається поетапне впровадження АСК на ЄМЗ із нарощуванням автоматизованих функцій відповідно до пріоритетності задач, що розв'язуються. На першому етапі в період освоєння системи передбачалася робота системи в статичному режимі, на другому – з реалізацією функцій динамічного керування, нарешті, на третьому – експлуатація інтегрованої АСК в цілому (рис. 6).

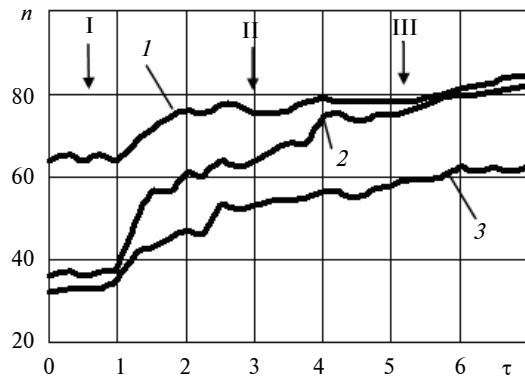


Рис. 6. Зміна відносного числа плавок (*n*), що потрапляють у задані межі в процесі функціонування системи (за роками): I – введення в промислову експлуатацію статичної підсистеми; II – введення динамічної підсистеми і елементів замкнутого керування; III – введення інтегрованої АСК з реалізацією функцій диспетчерського керування; 1 – по температурі; 2 – по вуглецю; 3 – одночасно по температурі й вуглецю

До основних причин, що стримують упровадження системи в діючих цехах, належить людський фактор – синдром стресу і психологічний бар'єр. Причиною стресу є те, що персоналу доводиться працювати зі складним вартісним устаткуванням. При цьому в діях оператора-технолога практично зникає автономія, оскільки його дії з допомогою комп'ютерної техніки завжди можна простежити. Великі стресові навантаження має і персонал, що обслуговує АСК, навіть часткова зупинка якої призводить до великих втрат. Відомо, що будь-

яка стресова і рутинна робота знижує продуктивність праці.

Іншим важливим людським фактором, що гальмує швидкий прогрес в автоматизації, є консерватизм у мисленні та в укладі життя більшості людей, їх природне небажання змінювати звичну ситуацію. Тому процес упровадження АСК, що функціонує як людино-машинна система, де оператор-технолог реалізує ергатичний зворотний зв'язок, супроводжується визначеним психологічним бар'єром – наслідком інерційності традиційного керування.

Людським фактором, що стримує швидке освоєння засобів автоматизації, є також недостатня кваліфікація кадрів і необхідність великих капітальних вкладень. Тому одним із напрямів подальшого вдосконалення й зростання ефективності АСК ТП конвертерної плавки є підсилення особистої відповідальності керівництва цеха за впровадження системи, підвищення кваліфікації персоналу із введенням для нього матеріальних стимулів за освоєння роботи з АСК.

Висновки

Розглянуто такі технологічні параметри, як основність кінцевого шлаку, вплив середньої

кількості повалок, температура ванни та її хімічний склад, тривалість продувки і простою агрегату, параметри дугтя і їх зв'язок зі стійкістю футерівки, людський фактор, а також вплив кожного з параметрів і їх сукупності на собівартість конвертерної сталі. За результатами досліджень встановлено, що внаслідок скорочення числа проміжних повалок зменшується кількість тепломінів футерівки, від якої обернено пропорційно залежить стійкість вогнетривів; підвищення якості дугтя покращує економічні показники процесу; АСК дає змогу закінчувати продувку із заданими показниками металу і видавати сталь по марках й сортаменту відповідно до портфеля замовлення й вимог технологічного прокатного виробництва.

АСК ТП дає змогу реалізувати основні резерви зниження собівартості конвертерної сталі, що пов'язані з підвищенням частки брукхту в металошихті, стійкості футерівки агрегату і виходу корисного, зменшенням витрати матеріалів, удосконаленням технологічного процесу й організацією виробництва, що дають можливість скоротити тривалість продувки і плавки в цілому.

Подальші дослідження будуть проведені в напрямі вивчення керуючих параметрів конвертерної плавки на собівартість сталі.

1. *Математические модели и системы управления конвертерной плавкой* / В.С. Богушевский, Л.Ф. Литвинов, Н.А. Рюмшин, Н.А. Сорокин. – К.: НПК “Киевский институт автоматики”, 1998. – 304 с.
2. *Создание базовой интегральной динамической модели современных конвертерных процессов на основе законов неравновесной термодинамики* / Б.Н. Окороков, П.Ю. Шендриков, О.А. Комолова, В.Г. Поздняков // Изв. вузов. Черная металлургия. – 2010. – № 5. – С. 31–36.
3. *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.
4. *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.
5. *Модель керування конвертерним процесом у системі прийняття рішень* / В.С. Богушевський, С.В. Жук, К.О. Сергеева, М.В. Горбачова // Системні дослідження та інформ. технології. – 2012. – № 4. – С. 35–44.
6. *V. Bogushevsky et al.*, “System for the BOF Process Control”, Adv. Sci. Open Access J., vol. 5, pp. 26–29, 2013.
7. *R. Walker and D. Anderson*, “Reaction mechanisms in basic oxygen steelmaking. Thermodynamics and kinetics of refining”, Iron and Steel, vol. 45, no. 3, pp. 271–276, 1972.
8. *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.
9. *Кобыляков И.И.* Методика анализа влияния факторов на формирование экономических показателей работы конвертерного цеха // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1987. – № 10. – С. 28–31.