

ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ РІШЕНЬ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЇ ВАННИ ДУГОВОЇ ПЕЧІ

Тимошенко С.М., Немцев Е.М.

Донецький національний технічний університет, Луцьк, Україна

Анотація. Чисельне моделювання гідродинаміки і тепломасообміну в сталеплавильній ванні дугової печі (ДСП) в умовах пневматичного перемішування демонструє, що впровадження «глибокої» ванни з коефіцієнтом форми (відношення діаметру до глибини) 2,5 проти традиційного 5,0 забезпечує енергоефективний бульбашковий режим продувки при більших витратах інертного газу. Збільшення діаметру пористої пробки та зростання об'єму двофазної області в «глибокій» ванні дозволяє в 150-т ДСП підвищити потужність перемішування та коефіцієнт конвективної тепловіддачі в рідкій сталі в 2-2,2 та 1,4 рази в середньому, відповідно. В контексті «flat bath» процесу, показано можливість інтенсифікації конвективного плавлення скрапу в ванні у середньому на 24% і, таким чином, збільшення продуктивності та, відповідно, покращення енергоефективності ДСП.

Ключові слова: дугова сталеплавильна піч, енергоефективність, «глибока» ванна, пневматичне перемішування, конвективне плавлення скрапу

Вступ. Стан питання. У контексті Зеленого курсу ЄС щодо зменшення «вуглецевого сліду» сталеплавильний комплекс України отримує можливість подолати структурне та технічне відставання шляхом поступового переходу до сучасної світової практики малих металургійних заводів (ММЗ). У технологічному маршруті ММЗ застосовують дугові сталеплавильні печі (ДСП), зокрема працюючі «flat bath» процесом [1]. Енергоефективність ДСП в значній мірі обумовлена енерговитратним процесом плавлення вихідної шихти. Чисельне моделювання тепломасообміну в ДСП сприяє виявленню шляхів збільшення продуктивності печі та, відповідно, покращення енергоефективності.

Відомі математичні моделі описують, як правило, процеси в рідкій сталеплавильній ванні. D. Guo та G. Irons [2] показали, що 80% енергії дуг передається випромінюванням, 15-18% – теплопровідністю у сталеву ванну, а 2-5 % втрачається в електродах. O. Gonzales, M. Ramirez-Argaez та F. Conejo [3] визначили, що швидкість нагрівання рідкої ванни зростає з довжиною дуги

ДСП. М. Kawakami, R. Takatani, L. Brabie [4] узагальнили параметри тепломасообміну у сталевій ванні з примусовим перемішуванням за допомогою критеріальних рівнянь. J. Li, N. Provatas, G. Irons [5] експериментально визначили фактори інтенсифікації плавлення фрагментів скрапу при безперервному завантаженні у ванну ДСП. D. Guo, D. Swickard, M. Alavanjani et al [6] визначили зв'язок коефіцієнту тепловіддачі в сталеплавильній ванні і потужності перемішування. Автори [7] показали можливість зменшення втрат теплоти випромінюванням поверхні розплаву в ДСП через впровадження «глибокої» ванни.

Однак, у відомих дослідженнях не знайшли належного відображення питання спільного впливу потужності перемішування, що вводиться в піч, та коефіцієнту форми ванни на показники енергоефективності при конвективному плавленні скрапу в інноваційному «flat bath» процесі в ДСП.

Мета роботи полягає у підвищенні енергоефективності ДСП.

Основний матеріал. На основі математичної моделі проведено чисельне дослідження процесів тепломасообміну при пневматичному перемішуванні сталеплавильної ванни в пакеті програм Mathcad. Модель (рис. 1) ґрунтується на положеннях гідродинаміки рідинно-газових систем, складених відносно сталеплавильної ванни D. Mazumdar, J. Evans [8]. Двофазна область, що встановлюється в процесі продувки аргоном через пористу пробку діаметром d_p , має відносний вміст газу φ , умовний кут розкриття γ і радіус вихідної плями r_l . Через меншу щільність двофазна область ініціює циркуляцію розплаву з середньою швидкістю u_m . Відносний вміст газу φ у двофазній області об'ємом V^* при інтенсивності витрати аргону Q_0 (нм³/с) становить:

$$\varphi = n_b V_b / V^* \quad (1)$$

де n_b – кількість бульбашок інертного газу, що водночас знаходяться в двофазній області:

$$n_b = \xi \varepsilon \times Q_0 \times (H_b / u_b) / V^* \quad (2)$$

V_b – середній об'єм бульбашки, м³,

ε – коефіцієнт приведення витрати аргону до робочих умов,

u_b – швидкість спливання бульбашок, м/с.

Циркуляція призводить до усереднення металу в об'ємі ванни за температурою та хімічним складом через перемішування. Потужність пневматичного перемішування N_{ps} (Вт/т) визначається роботою ізотермічного розширення об'єму газу, що вдувають в ванну в одиницю часу Q_0 (нм³/с):

$$N_{ps} = \rho_g \cdot Q_0 \cdot R \cdot T \cdot \ln(1 + H_b / 1,48) / (M \cdot \mu_g) \quad (3)$$

де R – універсальна газова стала, Дж/(кмоль·К),

1,48 – гідростатична висота стовпа рідкої сталі, м,

M – місткість печі, т,

T – температура металу, К,

ρ_g, μ_g – густина (кг/нм³) і молекулярна маса (кг/кмоль) газу.

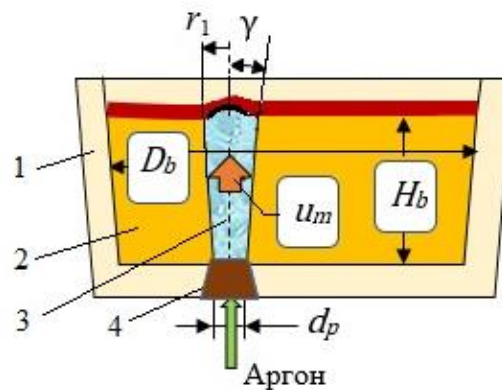


Рисунок 1 – Сталеплавильна ванна дугової печі: 1 – подина, 2 – рідка сталь, 3 – двофазна область, 4 – пориста пробка. Позначення в тексті

Відомі положення доповнено в моделі оцінкою порогової витрати інертного газу за умов збереження бульбашкового режиму, якому відповідає значення $\varphi_m \leq \pi/6$. Такий режим є найбільш енергоефективним для даного коефіцієнта форми ванни $m = D_b/H_b$ і діаметра пробки d_p (рис. 1). Приклад застосування математичної моделі для оцінки енергетичних характеристик пневматичного перемішування проілюстровано на рис. 2.

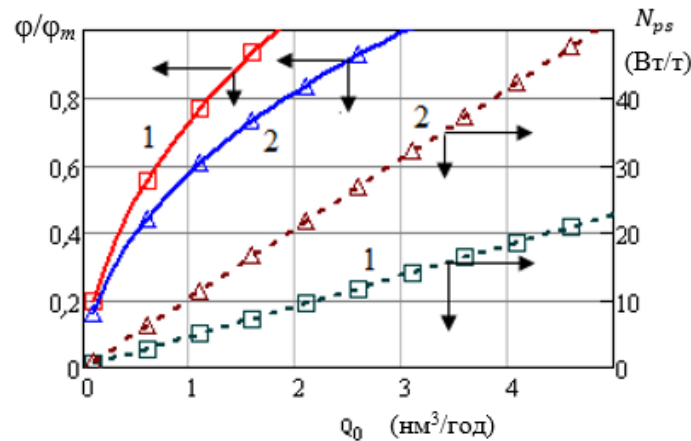


Рисунок 2 – Відносний вміст газу в двофазній області (φ/φ_m) і потужність пневматичного перемішування N_{ps} в залежності від інтенсивності продувки інертним газом Q_0 :
 1 – вихідна ванна, 2 – «глибока» ванна

Модель демонструє можливість реалізувати у «глибокій» ванні ($m = 2,5$) бульбашковий режим продувки при більш високих витратах аргону Q_0 у порівнянні з базовою ванною ($m = 5,0$) і, таким чином, отримати у 2-2,2 рази більшу потужність перемішування, що надає певні переваги при реалізації процесів тепломасообміну.

За допомогою моделі була визначена можливість інтенсифікації конвективного плавлення фрагментованого скрапу в 150-т ДСП при переході від «базової» ванни до «глибокої» за умов збереження місткості печі з урахуванням підвищеного при «flat bath» процесі «болота». При оцінці була застосована відома інженерна методика Семикіна-Старка, що визначає час плавлення фрагменту скрапу τ_{melt} (с) від коефіцієнта конвективної тепловіддачі у ванні α_{con} (Вт/(м²·К)), співвідношення маси m_s (кг) та поверхні F_s (м²) фрагменту, його теплоємності C_s (кДж/(кг·К)), з урахуванням температур ванни t_b , плавлення скрапу t_{ms} та початкової t_0 :

$$\tau_{melt} = \left\{ \left[(m_s / F_s) \cdot C_f \right] / \alpha_{con} \right\} \cdot \ln \left[(t_b - t_0) / (t_b - t_{ms}) \right] \quad (4)$$

Оцінку α_{con} визначали через потужність перемішування N_{ps} згідно даних [6]: $\alpha_{con} = 7412 \cdot N_{ps}^{0,2}$. Результати, з урахуванням розміру пористої пробки d_p , щодо «шредерного» скрапу з насипною щільністю 0,8-0,9 т/м³ представлено на рис. 3.

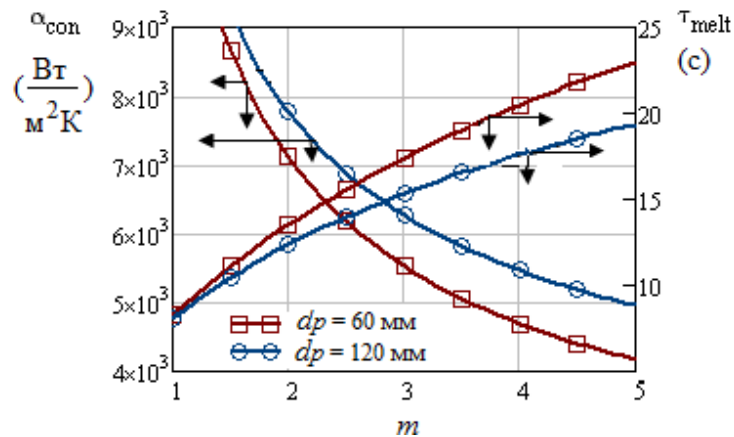


Рисунок 3 – Залежність коефіцієнту конвективної тепловіддачі в сталеплавильній ванні α_{con} та часу плавлення скрапу τ_{melt} від коефіцієнту форми ванни m за умов варіювання діаметра пористої пробки d_p

За результатами чисельного моделювання, зменшення коефіцієнту форми ванни ДСП, що працює за «flat bath» процесом, з 5,0 до 2,5 дозволяє очікувати на інтенсифікацію плавлення скрапу в умовах пневматичного перемішування в середньому на 24% за рахунок підвищення коефіцієнту конвективної тепловіддачі в середньому в 1,4 рази.

Висновки. Впровадження «глибокої» ванни з коефіцієнтом форми 2,5 проти традиційного 5,0 забезпечує енергоефективний бульбашковий режим продувки при більших витратах інертного газу. Збільшення діаметра пористої пробки та зростання об'єму двофазної області в «глибокій» ванні дозволяє в 150-т ДСП підвищити потужність перемішування та коефіцієнт конвективної тепловіддачі в рідкій сталі в 2-2,2 та 1,4 рази в середньому, відповідно. В контексті «flat bath» процесу, показано можливість інтенсифікації конвективного плавлення скрапу у середньому на 24% і, таким чином, збільшення продуктивності та енергоефективності ДСП.

ЛІТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Malfa, E., Giavani, C., Battaglia, V. The evolution of the Consteel® EAF. SEASIS Quarterly (South East Asia Iron and Steel Institute) May 2012, 41(3).
2. Guo, D., Irons, J. Modeling of radiation intensity in an EAF. Third International Conf. of CRD in the Minerals and process industry. Proc. CSIRO, Melbourne, Australia, 2003, p. 223-228.
3. Gonzalez, O., Ramirez-Argaez, M., Conejo, A. Effect of arc length on fluid flow and mixing phenomena in electric arc furnace. ISIJ International, 2010, vol.50, 1, p. 1-8.

4. Kawakami, M. Takatani, R, Brabie, L. Heat and mass transfer analysis of scrap melting in steel bath. Tetsu to Hagane, 1999, vol. 85, 9, p. 658-665.
5. Li, J., Provatas, N., Irons, G. Modeling of scrap melting in the heel of an EAF. Iron & Steel Technology, 2008, vol.5, 3, p.216-223.
6. Guo, D. Swickard, D. Alavanjaetal, M. Numerical Simulation of Heavy Scrap Melting in BOF Steelmaking. Iron & Steel Technology, 2013, 4, p. 125-132.
7. Timoshenko, S.N, Stovpchenko, A.P., Kostetski, Yu.N. Gubinski, M.V. Energy efficient solutions for EAF steelmaking. Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, 2018, vol. 88, 1, p. 18-24.
8. D. Mazumdar, J., Evans, Modeling of Steelmaking Processes. Boca Raton, London, New York: CRC Press, 2010, 463 p.

NUMERICAL SIMULATION OF ENERGY-EFFICIENT SOLUTIONS OF THE ARC FURNACE STEEL MELTING BATH

Timoshenko Sergii, Niemtsev Eduard

Abstract. *Numerical modeling of hydrodynamics and heat and mass transfer in the arc furnace (EAF) steel melting bath under pneumatic stirring conditions demonstrates that the introduction of a «deep» bath with a form factor (ratio of diameter to depth) of 2.5 against the traditional 5.0 provides an energy-efficient bubbling mode of purging at higher inert gas flowrate. An increase in the diameter of the porous plug and the volume of the two-phase region in the "deep" bath allows in 150-ton EAF to increase the mixing power and the coefficient of convective heat transfer in liquid steel by 2-2.2 and 1.4 times on average, respectively. In the context of the «flat bath» process, it is shown the possibility of intensifying the convective melting of scrap in the bath by 24% in average and, thus, increasing productivity and, accordingly, improving the energy efficiency of the EAF.*

Keywords: *arc steel melting furnace, energy efficiency, "deep" bath, pneumatic stirring, convective melting of scrap*