

ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІ РІШЕННЯ ЩОДО РАФІНУВАННЯ СТАЛІ В ЕЛЕКТРОДУГОВІЙ ПЕЧІ ЛИВАРНОГО КЛАСУ

Тимошенко С.М.¹ Немцев Е.М.¹, Губинський М.В.²

¹ДонНТУ, Луцьк, Україна

²Інститут чорної металургії НАН України, Дніпро, Україна

Вступ. На відміну від двостадійної технології з позапічною доводкою сталі [1], у ливарному виробництві рафінування, зокрема видалення сірки, проводять безпосередньо в ДСП. Потік сірки зі сталі в шлак J (кг/с) визначається [2] коефіцієнтом масопереносу β (м/с), поверхнею розділу метал-шлак F (м²) та вмістом сірки (кг/м³) у металі [S] й шлаку (S).

$$J = \beta \cdot F([S] - (S)), \quad (1)$$

Розвинена міжфазна поверхня сприяє десульфурації, що коефіцієнту форми сталеві ванни (відношення діаметра до глибини) $m = 4,5-5,5$. Однак ковшові сталеплавильні агрегати «великої» металургії мають «глибоку» ванну з $m = 0,8-1,1$. Величина J в умовах зниженого F забезпечується високим β за рахунок примусового перемішування.

Енергоємна класична технологія й низька питома потужність зумовлюють значно меншу енергоефективність ДСП ливарного класу в порівнянні з ДСП «великої» металургії. Потребують досліджень питання кінетики десульфурації сталі при переході від стандартної до «глибокої» ванни [3] з урахуванням зменшення міжфазної поверхні метал-шлак і пневматичного перемішування.

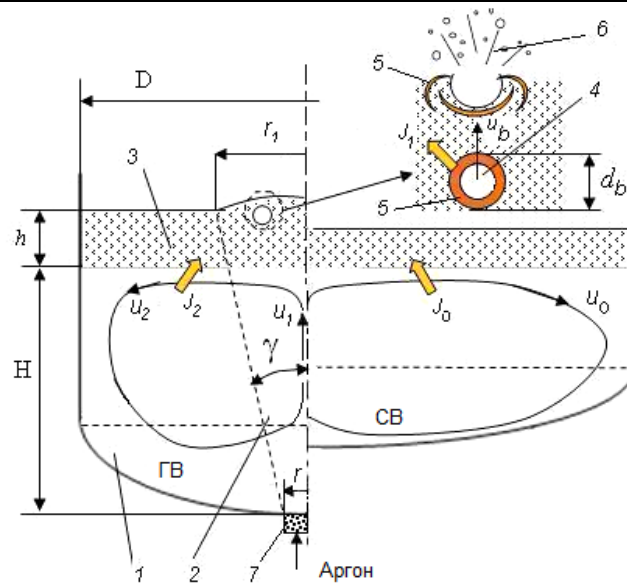
Мета роботи полягала в дослідженні впливу коефіцієнта форми ванни на енергоефективність технологічного періоду плавки на прикладі десульфурації сталі.

Методика передбачала чисельне моделювання масопереносу сірки.

Дослідження. Схема, що відображає геометрію ванни, режим пневматичного перемішування та гідродинаміку розплаву щодо кінетики десульфурації сталі в ДСП, наведена на рис. 1. Дослідження проводили на основі критеріального рівняння, отриманого J. Meitz, S. Schneider і F. Oeters [4]:

$$Sh = 2 + 0,511 \cdot Re^{0,724} \cdot Sc^{0,70}, \quad (2)$$

де $Sh = \beta \cdot L/D_s$ – число Шервуда; β – коефіцієнт масопереносу сірки, м/с; L – характерний розмір, м; D_s – коефіцієнт дифузії сірки в рідкій сталі, м²/с; $Re = u \cdot L/\nu$ – число Рейнольдса; u – швидкість руху, м/с; ν – кінематична в'язкість рідкої сталі, м²/с; $Sc = \nu/D_s$ – число Шмідта.



1 – рідка сталь, 2 – двофазна область, 3 – шлак, 4 – бульбашка, 5 – сталевая плівка,
 6 – бризки плавильного пилу, 7 – пориста пробка

Рисунок 1 – Схема процесу десульфуратії в ДСП зі стандартною (СВ) і «глибокою» ванною (ГВ) з пневматичним перемішуванням

Процес десульфуратії в ДСП включає шлакоутворення та перемішування розплаву продувкою аргоном з витратою Q через пористу пробку радіусом r . У процесі барботажу в розплаві утворюється двофазна область з кутом розкриття γ і радіусом вихідної плями r_1 . Двофазна область ініціює циркуляцію у ванні діаметром D і глибиною H . Середні швидкості сталі у двофазній області та на периферії u_1 і u_2 визначаються за D. Mazumdar і R. Guthrie [5].

Як показали Z. Nan і L. Holappa [6], на поверхні бульбашок аргону йде десульфуратія сталевих плівок. Внесок цього фактору в процес в цілому в ДСП раніше не вивчали.

Завдання полягає в оцінці коефіцієнта масопереносу сірки за рівнянням (2) та загальної поверхні бульбашок у шлаку, як величин, що визначають кінетику десульфуратії сталі, за рівнянням (1), з урахуванням, геометрії та гідродинаміка ванни.

Основні параметри двофазної області (зрізаний зворотний конус) – вміст газу φ та кут розкриття γ визначали за [7]:

$$\gamma = 82,35 \cdot Fr_m^{0,12} \cdot (H/D)^{-0,254} (2r/D)^{0,441}, \quad (3)$$

$$\varphi = (\alpha Q \cdot H / u_b) / V, \quad (4)$$

де $Fr_m = [\alpha \cdot Q / (\delta \cdot \pi \cdot r^2) / (g \cdot H)] \cdot (\rho_g / \rho)$ – модифіковане число Фруда; δ – відкрита пористість пробки; ρ_g, ρ – щільність газу та рідкої сталі, відповідно, кг/м^3 ; $V = (\pi/3)(r_1^2 + r \cdot r_1 + r^2)$ – об'єм двофазної області, м^3 ;

Співвідношення $\varepsilon_J = J/J_0$ (характеризує порівняльну ефективність видалення сірки в «глибокій» ванні з продувкою інертним газом і стандартній ванні без примусового перемішування. Результати, залежно від режиму обробки сталі та геометрії, дано на рис. 2.

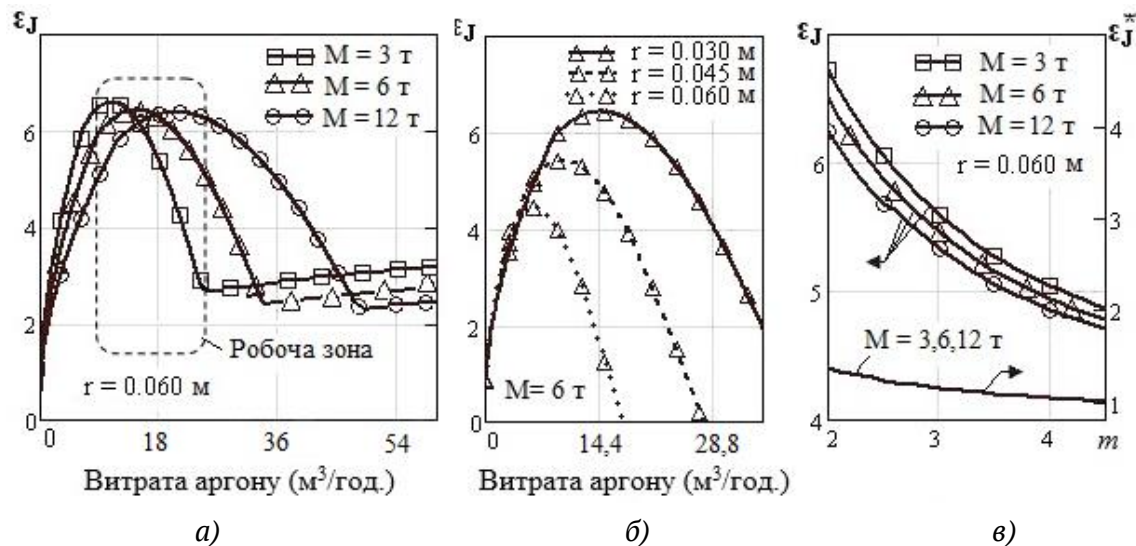


Рисунок 2 – Співвідношення ефективності десульфурації в «глибокій» і стандартній ванні ε_J , включаючи умовний випадок перемішування стандартної ванни ε_J^* , від витрати аргону (а, б), радіуса пористої пробки (б) і коефіцієнта форми ванни m при пороговій витраті аргону Q_m (в)

Висновки. Максимальне значення ε_J становить 5–6,7 при оптимальній витраті аргону $Q_{opt} = 11–23$ м³/год. (рис. 2а). Робоча зона Q_{opt} має тенденцію до зростання зі збільшенням місткості ДСП і діаметра пористої пробки. Отримані результати дозволяють очікувати скорочення технологічного періоду в середньому в 1,5 рази, а часу плавки на 8–10 %. Економія електроенергії в ДСП ливарного класу очікується 60–70 кВтг/т.

Література

1. Yu. Toulouevski, I. Zinurov, Innovation in Electric Arc Furnaces. Scientific Basis for Selection. Berlin: Springer-Verlag, 2010, 258 p.
2. C. Zhu, P. Chen, G. Li, X. Luo, W. Zheng, A Mathematical Model of Desulphurisation Kinetics for Ultra-low sulphur Steels Refining by Powder Injection during RH Processing. ISIJ International, Vol. 56, 2016, p. 1368–1377.
3. S. Timoshenko, A. Stovpchenko, Yu. Kostetski, M. Gubinski, Energy efficient solutions for EAF steelmaking. Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, vol. 88, 2018, p. 18–24.
4. J. Meitz, S. Schneider, F. Oeters, Model experiments on mass transfer in ladle metallurgy. Steel research, vol. 62, 1991, p. 1-9.
5. D. Mazumdar, R. Guthrie, The Physical and Mathematical Modeling of Gas Stirred Ladle Systems. ISIJ International, vol. 35, 1995, p. 1-20.

6. Z. Han, L. Holappa, Mechanisms of Iron Entrainment into Slag due to Rising Gas Bubbles. *ISIJ International*, vol. 43, 2003, p. 292-297.
7. D. Mazumdar, J. Evans, *Modeling of Steelmaking Processes*. Boca Raton, London, New York: CRC Press, 2010, 463 p.

ENERGY EFFICIENT SOLUTIONS FOR STEEL REFINING IN FOUNDRY CLASS ELECTRIC ARC FURNACE

Timoshenko Sergii, Niemtsev Eduard, Gubinskij Mikhail

Abstract. Analysis of recent research and publications. The technological period in foundry class electric arc furnaces (EAF) is usually long term, is determined by desulfurization of steel and accompanied by significant energy loss through emissive surface of shallow steelmaking bath. Known mathematical models of Sulphur removal do not take into attention the impact of hydrodynamics factors due to deepening of the steelmaking bath of the same volume. Purpose. The task is to show feasibility of energy savings in foundry class EAF due to implementation of “deep” bath with forced pneumatic mixing. Method. Numerical modeling of sulfur removal in the steelmaking bath under conditions of forced pneumatic mixing. Research findings. Mathematical model takes into account removal of sulfur on interfacial surface of thin steel film, covering gas bubbles, geometry of bath and two-phase region, hydrodynamics, coalescence of bubbles. Simulation showed that in a “deep” bath, having shape factor (diameter to depth ratio) 2.5, rate of desulfurization, increases up to 5-6.7 times compared with a standard not forcibly stirred bath with shape factor 4.5, due to amplification of mass transfer in two-phase region and film desulfurization, reaching at least 23-28 % in overall process. Rise of porous plug radius contributes to increase sulfur removal velocity due to enlargement of threshold flowrates, corresponding to transition bubble - jet mode and bath “breakdown” mode. Effect of bath deepening in overall improvement of desulfurization kinetics is on average 23%. Practical significance. The obtained results allow to expect a shortening of the technological period due to increase of sulfur removal processes by an average of 1.5 times. Taking into account the share of the technological period in the total duration of melting on average 25-30%, the reduction of melting time will be 8-10%, and the saving of electricity, with an average specific consumption in small-capacity arc furnaces of 850 kWh/t, is expected to be 60-70 kWh per ton of crude steel.

Keywords: arc steelmaking furnace, energy efficiency, “deep” bath, desulfurization, pneumatic stirring.