DOI: 10.34185/1991-7848.itmm.2020.01.008
УДК 621.365.22

ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІ РІШЕННЯ ПОДОВОГО ЕЛЕКТРОДУ ДУГОВОЇ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЇ ПЕЧІ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Тімошенко С.М. д.т.н., с.н.с., Губинський М.В. д.т.н., проф.

Донецький національний технічний університет, м. Покровськ
Національна металургійна академія України, м. Дніпро

Анотація. Проведено чисельні дослідження електровихрових течій (ЕВТ) в сталеплавильній ванні дугової печі постійного струму і теплопередачі з фазовим переходом через подовий електрод (ПЕ). Щільність теплового потоку в ПЕ і локальна швидкість ЕВТ в анодній ямі становлять 1,8 –2 МВт/м^2 і 0,75 м/с, відповідно. Рівноважна товщина твердої сталевої частини ПЕ знаходиться в критичній залежності від ширини мідно-сталевої перехідної зони, яка має не перевищувати 20–25 мм. Вдосконалено технологію виготовлення ПЕ з вузькою перехідною зоною, що забезпечує сталу експлуатацію ПЕ та підвищення енергоефективності печі.

Ключові слова: дугова сталеплавильна піч постійного струму, подовий електрод, фазовий перехід, перехідна зона мідь-сталь, енергоефективність.

Вступ. Критичним і недостатньо дослідженим вузлом дугових печей постійного струму (ДСППС) є подовий електрод (ПЕ) , який в умовах електровихрових течій (ЕВТ) в рідкій ванні частково розплавляється. Актуальним є дослідження теплового стану ПЕ, що впливає на безпеку експлуатації і енергоефективність печі [1,2]. Недостатньо даних щодо величин конвективної й джоулевої складових теплового потоку через ПЕ, ініційованого ЕВТ, впливу характеристик перехідної зони мідь-сталь та інтенсивності охолодження мідної частини стрижня на положення лінії фазового переходу. Розглянуті проблеми особливо стосуються інноваційних «flat bath» сталеплавильних технологій.

Основний матеріал. Тепловий стан ПЕ в циркулюючій сталеплавильній ванні описується критеріальним рівнянням [3]:

$$\mathrm{Nu} = 0,017 \cdot \mathrm{Re}^{0,8} \cdot \mathrm{Pr}^{0,33} \qquad (1)$$

де $\mathrm{Nu} = \alpha_b L / \lambda$, $\mathrm{Re} = u_{be} L / \nu$, $\mathrm{Pr} = \rho C \nu / \lambda$ – числа Нуссельта, Рейнольдса, Прандтля; L –характерний розмір; ρ, λ, ν, C – щільність, теплопровідність, кінематична в'язкість, теплоємність рідкої сталі, відповідно. α_b – коефіцієнт конвективної тепловіддачі від ванни до ПЕ; u_{be} – швикість ЕВТ в зоні ПЕ.

В одномірній постановці стаціонарної задачі теплопередачі щільність теплового потоку через перетин електроду $q_{be} = q_b + q_j$, Вт/м^2 обумовлена тепловим навантаженням від рухомої ванни $q_b = \alpha_b (t_b - t_m)$ і через виділення теплоти Джоуля $q_j = UI / F_{be}$ (де t_b, t_m – температура ванни і плавлення сталі, відповідно; F_{be} –площа перерізу стрижня ПЕ; U, I –робочі напруга і сила струму). Величиною q_{be} визначається залишкова рівноважна товщина твердої сталевої частини b_s (рис. 1а).

$$b_s = \left[\left[(t_c - t_w) / q_{be} \right] - (1/\alpha_b) + (b_t / \lambda_t) + (b_c / \lambda_c) + (1/\alpha_w) \right] \lambda_s \qquad (2)$$

де t_c, t_w – робоча температура міді і води, відповідно; $b_t, \lambda_t, b_c, \lambda_c$ –ширина та коефіцієнт теплопровідності перехідної зони і мідної частини ПЕ, відповідно; λ_s – коефіцієнт теплопровідності твердої сталевої частини; α_w – коефіцієнт конвективної тепловіддачі від стінки каналу ПЕ до води.

Величина b_s падає зі збільшенням швидкості ЕВТ, і при $u_{be} \geqslant 0{,}5$ м/с стає критично малою, а режим роботи ПЕ - нестабільним (рис. 1б). Внесок k_j джоулєвої складової q_j в загальне теплове навантаження на ПЕ не перевищує 20 %. Він зростає з підвищенням струму і падає з ростом u_{be} (рис. 1в). В сумі q_b та q_j в промисловій ДСППС становить 1–2 МВт/м^2.

Інтенсифікація охолодження ПЕ понад $\alpha_w \geqslant 20$ кВт/(м^{2}К) практично не впливає на b_s (рис. 1г). Визначальний вплив на b_s має ширина перехідної зони b_t (її тепловий опір), він зростає зі збільшенням інтенсивності руху металу u_{be} (рис. 1д).

В нестаціонарній постановці задачі рівноважна товщина сталевої частини ПЕ досягається за 20–22 хв., а її величина прагне до 20 мм, що відповідає стаціонарній моделі для випадку без перехідної зони (рис. 1б).

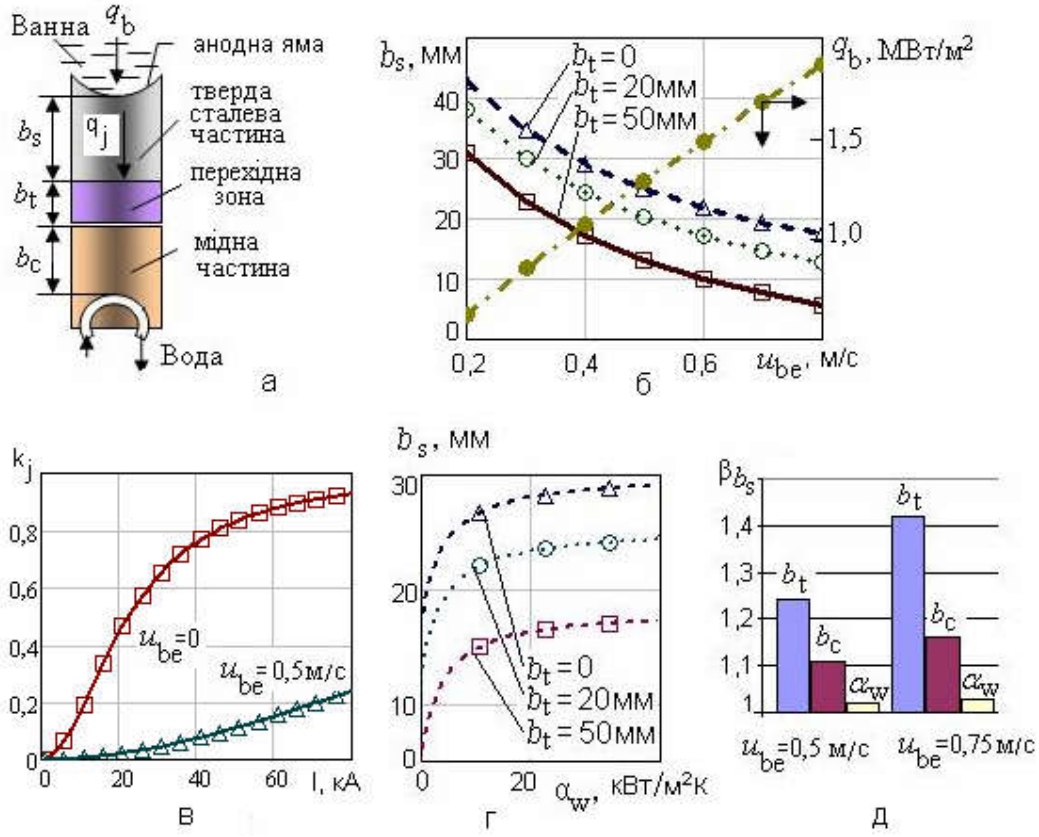

Рисунок 1 – Схема біметалевого ПЕ стрижневого типу (а). Залежність товщини b_s: від швидкості ЕВТ u_{be} при b_c =50 мм, α_w = 30 кВт/(м²К) (б); від α_w при b_c =50 мм, u_{be} = 0,5 м/с і варіюванні b_t (г). Відносний внесок теплоти Джоуля k_j в залежності від сили струму *I* при різних u_{be} (г). Відносна (β_{b_s}) зміна b_s при зниженні b_t, b_c і α_w вдвічі (д)

Оцінку локального значення u_{be} в анодній ямі проведено шляхом чисельного моделювання ЕВТ, гідродинаміки і теплообміну ванни ДСППС в пакеті «ANSYS CFX» із залученням керуючих рівнянь гідромеханіки: нерозривності, балансу імпульсу (Нав'є–Стокса), дисипації енергії в рамках $k-\varepsilon$ моделі турбулентності; теплопровідності та електродинаміки: Максвелла, узагальненим законом Ома, законом збереження електричного заряду. Результати моделювання свідчать, що в анодній ямі спостерігається максимальна локальна швидкість ЕВТ 0,75 м/с, при якій, згідно з (1) та рис. 1б, щільність теплового потоку конвекції становить 1,8 МВт/м², а з урахуванням джоулевої складової (рис. 1в) – близько 2 МВт/м². Рівноважні характеристики двофазної сталевої частини ПЕ підтверджують критичність умов роботи ПЕ за

товщиною твердої сталевої частини b_s (рис. 1б), що становить, згідно з моделюванням, менш, ніж 50 мм. Одержані дані стосовно теплового стану ПЕ в ДСППС відповідають [2].

Розроблено технологічні основи отримання ПЕ в вузькою перехідною зоною методом двохстадійного електрошлакового наплавлення міді на сталеву заготовку.

Висновки. В промислових умовах щільність теплового потоку, що проходить через ПЕ в анодній ямі, становить 1,8 –2 МВт/м^2 , а максимальна локальна швидкість ЕВТ сягає 0,75 м/с. В даних умовах рівноважна товщина твердої сталевої частини ПЕ знаходиться в критичній залежності від ширини мідно-сталевої перехідної зони, яка має не перевищувати 20–25 мм. Внесок джоулевої складової в загальне теплове навантаження на ПЕ не перевищує 20 %. Інтенсифікація водоохолодження при коефіцієнті тепловіддачі більш, ніж 20 кВт/(м^{2}К) практично не впливає на товщину твердої сталевої частини ПЕ.

Вдосконалено технологію виготовлення ПЕ з перехідною зоною з шириною, що не перевищує 20–25 мм і забезпечує умови сталої експлуатації і, тим самим, підвищення енергоефективності ДСППС.

References

1. Lupi, S. (2017). *Fundamentals of Electroheat: Electrical Technologies for Process Heating*. © Springer International Publishing Switzerland. 620p.

2. Liu, X., Zhou, J., Shi, H. et al. (2008). Melting mechanism of Water-cooled billet-type bottom electrode of direct current arc furnace: a numerical approach. *Metallurgical and materials transactions*, vol. 39B, 10, 713-724.

3. Kawakami, M., Takatani, R, Brabie, L. (1999). Heat and Mass Transfer Analysis of Scrap Melting in Steel Bath. *Tetsu to Hagane*, vol. 85, 9, 658-665.

ENERGY EFFICIENT SOLUTIONS OF DC ELECTRIC ARC FURNACE BOTTOM ELECTRODE

Timoshenko Serhii, Gubynskyi Mykhailo

Annotation. Numerical studies of electrovortex flows (EWF) in the steelmaking bath of DC electric arc furnace and heat transfer with a phase transition through bottom electrode (BE) were carried out. The heat flux density through BE

and local EVF velocity in anode well are 1.8–2 MW/m^2 and 0.75 m/s, respectively. The equilibrium thickness of solid steel BE part is critically dependent on the width of copper-steel transition zone, should not exceed 20-25 mm. Manufacturing technology of BE with a narrow transition zone, which ensures stable operation and increases energy efficiency of the furnace, has been improved.

Keywords: DC ELECTRIC ARC FURNACE, ELECTROVORTEX FLOWS, BOTTOM ELECTRODE, PHASE TRANSITION, COPPER-STEEL TRANSITION ZONE, ENERGY EFFICIENCY.