

ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІ РІШЕННЯ ПОДОВОГО ЕЛЕКТРОДУ ДУГОВОЇ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЇ ПЕЧІ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

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 через ПЕ і локальна швидкість ЕВТ в анодній ямі становлять $1,8 - 2 \text{ МВт/м}^2$ і $0,75 \text{ м/с}$, відповідно. Рівноважна товщина твердої сталеві частини ПЕ знаходиться в критичній залежності від ширини мідно-сталеві перехідної зони, яка має не перевищувати $20-25 \text{ мм}$. Вдосконалено технологію виготовлення ПЕ з вузькою перехідною зоною методом двостадійного електрошлакового наплавлення міді на сталеву заготовку, що забезпечує сталу експлуатацію та підвищення енергоефективності печі.

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

Постановка проблеми

В дугових сталеплавильних печах постійного струму (ДСППС) виплавляють близько 15 % світової електросталі. Критичним і недостатньо дослідженим вузлом ДСППС є подовий електрод (ПЕ) – анод, який в умовах електровихрових течій (ЕВТ) в рідкій ванні частково розплавляється і формує анодну яму. Актуальним є дослідження теплового стану ПЕ, що безпосередньо впливає на безпеку експлуатації і енергоефективність печі [1].

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Найбільш поширеним в світовій і вітчизняній практиці ДСППС рішенням ПЕ є біметалічний стрижень з верхньою сталеві частиною, що контактує з рідкою ванною, і мідною водоохолоджуваною основою [2,3]. ПЕ стрижневого типу придатний як до сучасних інтенсивних періодичних та безперервних «flat bath» сталеплавильних процесів [4] «великої» металургії, так і до класичної технології плавки, що здійснюється в ливарних цехах [5].

При виготовленні стрижневого ПЕ застосовують: послідовний ЕШП сталеві і мідного витратних електродів [6]; переплав мідного витратного електроду в сталеві товстостінній гильзі [7]; алюмотермічне зварювання сталеві і мідної заготовок з наближенням зони інтенсивного охолодження до

ванни печі [8]; гарячу посадку сталеві гільзи на мідний стрижень з посиленням з'єднання шпильками [9].

В технологіях [6,7] температура шлаку для плавлення мідного електроду становить 1250 °С, що згідно з діаграмою стану Cu-Fe [10], призводить до розчинення заліза в міді до 10 % та сприяє зниженню тепло- і електропровідності перехідної зони ПЕ в 2–3 рази відносно чистої міді. У технології [8] складність полягає в отриманні якісної суцільної перехідної зони мідь-сталь в важкоконтрольованому процесі алюмотермічного зварювання. На якість ПЕ за варіантом [9] негативно впливає додатковий термічний та електричний опір, створює механічним з'єднанням мідь-сталь.

Промисловими дослідженнями теплового стану ПЕ X. Liu, J. Zhou, H. Shi та ін. на діючій 150-т ДСППС [11], встановлено, що анодна яма в процесі плавки може опускатися нижче рівня кожуха поди, що, безумовно, є аварійною ситуацією.

Проблеми теплового стану ПЕ в рідкій ванні ДСППС пов'язані з обмеженою теплопровідністю стрижня при відсутності доступної альтернативи парі мідь-сталь. Недостатньо даних щодо величин конвективної й джоулевої складових теплового потоку через ПЕ, ініційованого ЕВТ, впливу теплофізичних 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, в яких можливості безструмових пауз для періодичного відновлення ПЕ за рахунок «виключення» ЕВТ, суттєво обмежені.

Мета і методика досліджень

Мета роботи полягає в дослідженні впливу ЕВТ на тепловий стан подового електроду і розробці енергоефективних рішень ПЕ. Методика досліджень оснований на чисельних експериментах та промисловій перевірці їх основних положень.

Основний матеріал досліджень. Тепловий стан ПЕ в циркулюючій сталеплавильній ванні описується критеріальним рівнянням [12]:

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

де $Nu = \alpha_b L / \lambda$, $Re = u_{be} L / \nu$, $Pr = \rho C \nu / \lambda$ – 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 ванни на ПЕ; u_{be} – швидкість ЕВТ в зоні ПЕ.

В одномірній постановці стаціонарної задачі теплопередачі, щільність теплового потоку через перетин електроду $q_{be} = q_b + q_j$, Вт/м² 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 сталевий частини b_s (рис. 1а).

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

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 сталевий частини; α_w – коефіцієнт конвективної тепловіддачі від стінки каналу ПЕ до води [13].

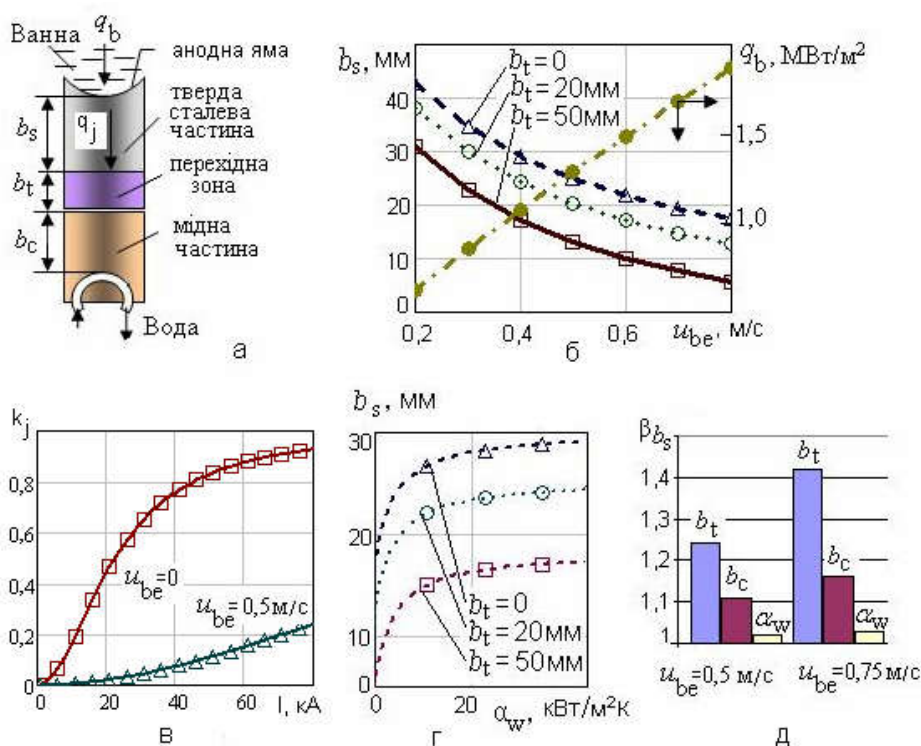


Рисунок 1 – Схема біметалевого ПЕ стрижневого типу (а). Залежність товщини b_s : від швидкості ЕВТ u_{be} при $b_c = 50$ мм, $\alpha_w = 30$ кВт/(м²К) (б); від α_w при $b_c = 50$ мм, $u_{be} = 0,5$ м/с і варіюванні b_t (г). Відносний внесок теплоти Джоуля k_j в залежності від сили струму I при різних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

Величина b_s падає зі зростанням u_{be} , і при $u_{be} \geq 0,5$ м/с стає критично малою, а режим роботи ПЕ – нестабільним (рис. 1б). Внесок k_j джоулевої 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/м².

Інтенсифікація водяного охолодження ПЕ в практичній області: $\alpha_w \geq 20$ кВт/(м²К), що визначається верхньою експлуатаційною температурою міді $t_c^* = 260$ °С, при характерній довжині мідної частини ПЕ до водяного каналу $b_c = 45\text{--}50$ мм, практично не впливає на b_s (рис. 1г). Визначальний вплив на товщину твердої сталевий частини ПЕ має ширина перехідної зони b_l (її тепловий опір). Даний вплив зростає зі збільшенням інтенсивності ЕВТ металу u_{be} (рис. 1д).

Проведено оцінку, в нестационарній постановці задачі, часу встановлення та величини рівноважної товщини b_s в діючому ПЕ. Розглядали (рис. 2а) теплоізольовану по боковій поверхні сталеву частину ПЕ вихідною довжиною $h_l + b_s$ при фіксованих температурах верхнього торця, що дорівнює температурі ванни t_b , і нижнього охолоджуваного торця t_c . Мідну частину та перехідну зону не моделювали і вважали такими, що забезпечують стабільну t_c за рахунок поглинання теплоти водою. Частка сталевий стрижня довжиною h_l від верхнього торця по осі x , є розплавленою частиною електроду, а температура на границі фаз є температурою плавлення t_m .

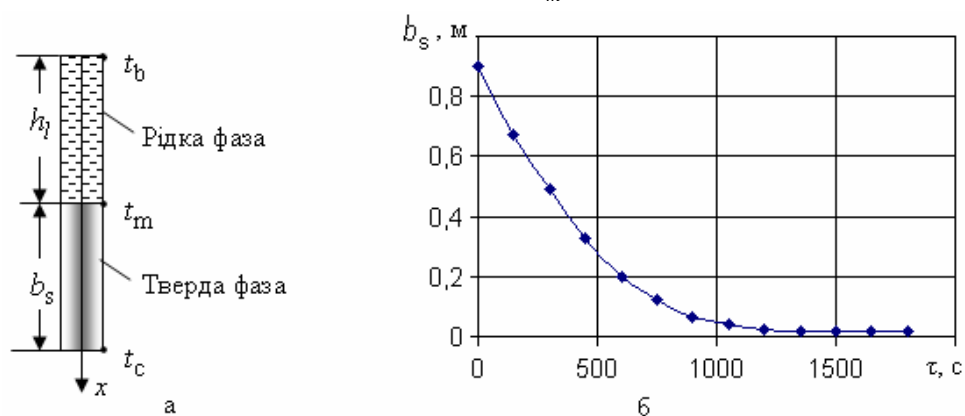


Рисунок 2 – Розрахункова модель ПЕ (а) і процес встановлення рівноважної товщини сталевий частини ПЕ b_s у часі τ

Вирішували одновимірне рівняння теплопровідності з урахуванням теплоти Джоуля для твердої та рідкої фаз ($i = 1,2$) сталевий стрижню:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a_i \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + j_{be}^2 / (\sigma_{eli} C_i \rho_i), \quad i = 1,2 \quad (3),$$

де τ – час, с; $a_i = \lambda_i / \rho_i C_i$ – коефіцієнт температуропровідності i -тої області; λ_i, ρ_i, C_i – коефіцієнт теплопровідності, щільність і теплоємність сталі, відповідно, в i -тої області; j_{be} – щільність струму в ПЕ; σ_{eli} – електропровідність i -тої області ПЕ.

Конвективну складову теплопровідності в рідкій фазі враховували множителем χ_{con} до стаціонарної теплопровідності, згідно з [13]. Умова Стефана на границі фаз в даній задачі має вигляд:

$$\lambda_1 \chi_{con} \left. \frac{\partial t}{\partial x} \right|_{x=h_1-0} = \lambda_2 \left. \frac{\partial t}{\partial x} \right|_{x=h_1+0} + \rho_1 q_m \frac{\partial h_1}{\partial \tau} \quad (4),$$

де індекси 1,2 належать до рідкої і твердої фази, відповідно; q_m – питома теплота плавлення сталі.

Рівняння (3) з урахуванням (4) при заданих граничних умовах вирішували чисельно методом сіток по неявній різницевій схемі в пакеті «Delphi» для умов: діаметр і довжина сталеві частини ПЕ 0,3 і 0,9 м, відповідно; сила струму 60 кА.

Результати розрахунку, представлені на рис. 2б. Рівноважна товщина сталеві 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).

Для оцінки локальної u_{be} проведено чисельне тривимірне 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. Процедура включала два етапи: отримання поля ЕВТ і об'ємної електромагнітної сили (модуль EMag) та моделювання гідродинамічних і теплових процесів з урахуванням ЕВТ.

В домені «ванна» задані щільність, в'язкість, тепло- і електропровідність, теплоємність сталі, як функції температури; на поверхнях 4-х ПЕ (анооди) і 2-х лунок під електродами (катоди) прикладена напруга 600 В; на поверхнях стиків мідь-сталь ПЕ задано робочу температуру 800 К; на поверхні ванни, що випромінює - температура 1825 К і ступінь чорноти 0,7.

Результати моделювання (рис. 3) 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 складові (рис. 1.в) – близько 2 МВт/м². Рівноважні характеристики двофазної сталеві частини ПЕ (рис. 4) свідчать про критичність умов роботи ПЕ за товщиною твердого шару сталеві частини b_s (рис. 1б), що, за даними моделювання, становить менш, ніж 50 мм. Одержані дані стосовно теплового стану ПЕ в ДСППС знаходяться у відповідності до [11] і підтверджують актуальність досягнення вузької перехідної зони мідь-сталь.

Вдосконалено технологію виготовлення ПЕ для ДСППС методом двохстадійного електрошлакового наплавлення міді на сталеву заготовку. Ширина перехідної зони до 20–25 мм досягається обмеженням температури сталеві заготовки 1150 °С та шлаковим режимом: флюс на базі тетраборату натрію при наплавленні проміжного шару з високою адгезією міді до сталі; флюс на базі гексафтороалюмінату натрію при наплавленні основного шару.

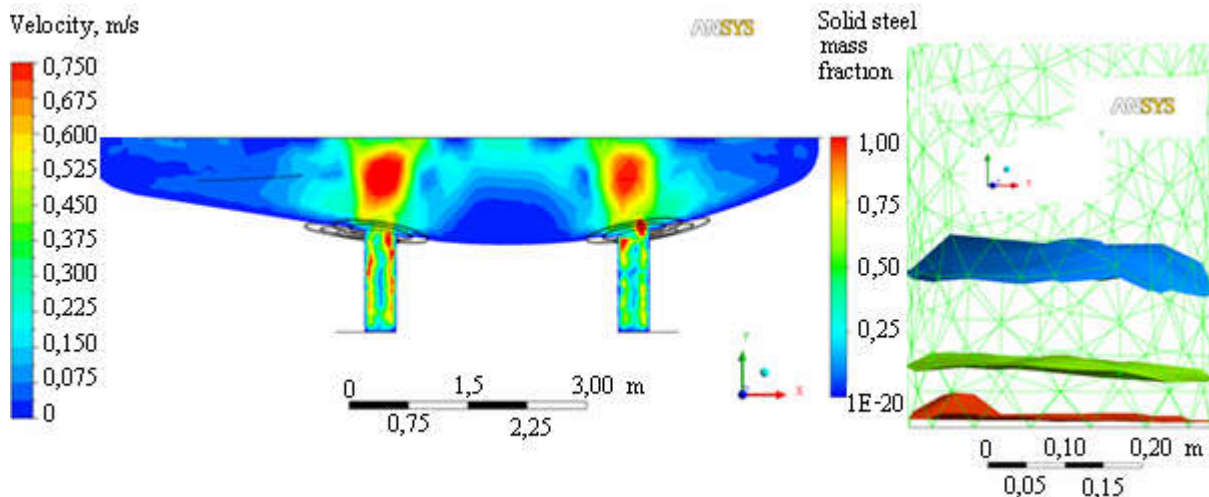


Рисунок 3 – Поле швидкостей в ванні печі та анодній ямі в вертикальному перерізі: робоче вікно-еркер

Рисунок 4 – Ізоповерхні масової долі твердої сталі в анодній ямі

Макроструктура стику мідь-сталь й результати механічних випробувань зразка ПЕ (рис. 5), свідчать про міцність перехідного шару, що перевищує міцність міді на розрив. Згідно з даними хімічного аналізу (Atomic-emission spectrometer «Spectrolab M»), в 20–25 мм від стику забезпечується вміст заліза в міді на рівні хімічного складу міді М2 і, відповідно, коефіцієнт теплопровідності більше, ніж 380 Вт/(м·К) при 20 °С.

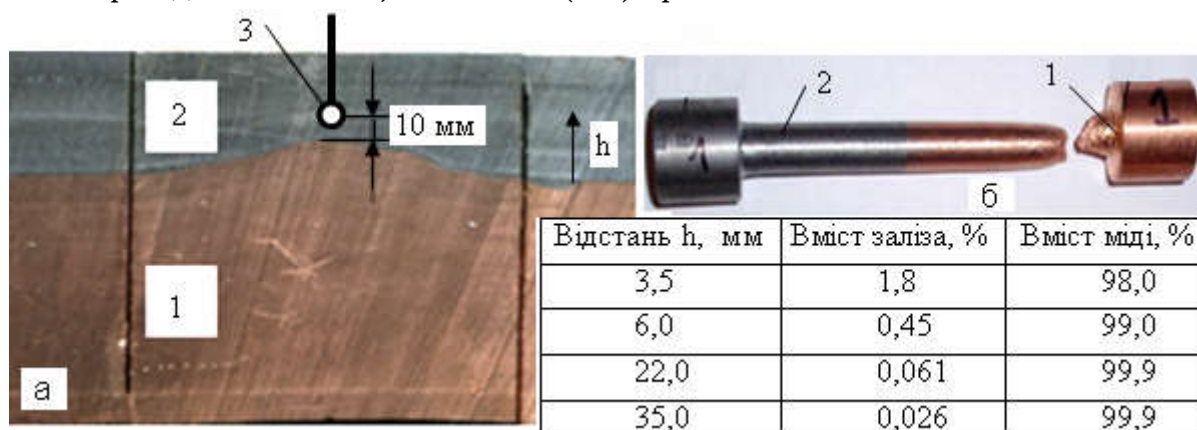


Рисунок 5 – Структура стику мідь-сталь (а), зразок після механічних випробувань (б). Хімічний склад перехідної зони. 1-сталь. 2- мідь, 3- термопара контролю

Характеристики перехідної зони ПЕ відповідають умовам сталої експлуатації промислової ДСППС.

Висновки

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

Вдосконалено технологію виготовлення ПЕ з перехідною зоною шириною, що не перевищує $20-25 \text{ мм}$ і забезпечує умови сталої експлуатації і, тим самим, підвищення енергоефективності ДСППС.

ЛИТЕРАТУРА

1. Lupi, S. (2017). *Fundamentals of Electroheat: Electrical Technologies for Process Heating*. © Springer International Publishing Switzerland. 620p.
2. Sagermann, T. (2019) Daye Special Steel to utilize pin-type bottom electrode from SMS Group in electric arc furnace. Available at: [www.sms-group.com /press-media/press-releases/press-detail/daye-special-steel1109/](http://www.sms-group.com/press-media/press-releases/press-detail/daye-special-steel1109/)(assessed 12.07.2019).
3. Лопухов, Г.А. (2004). Подовый электрод дуговой сталеплавильной печи постоянного тока конструкции фирмы «Danieli». *Электрометаллургия*, 6, 48-51.
4. Adachi, T., Sellan, R. (2012). The jumbo size 420 t EAF at Tokyo Steel, Japan. *MPT International*, 2, 54-62.
5. Тищенко, П.И., Тищенко, А.П., Тимошенко, С.Н., Фридман, М.А. (2012). Подовый электрод дуговой печи постоянного тока. *Металлургическая и горнорудная промышленность*, 7, 282-284.
6. Зайцев, В.А., Медовар, Л.Б., Тищенко, П.И., Федоровский, Б.Б., Журавель, В.М. (2011). Применение ЭШП по двухконтурной схеме для получения сталемедных заготовок анодов дуговых печей постоянного тока. *Современная электрометаллургия*, 2, 14-16.
7. Соловьев, Г.И., Давыдов, А.К., Марфицын, В.В. (2003). Изготовление заготовок подовых электродов электрошлаковым способом. *Заготовительные производства в машиностроении*, 6, 12-13.
8. Patent US 5651024. H05B 7/06. Cooled bottom electrode for direct current electric furnace. G. Gensini, M. Pavlicevic. Danieli & Co Off. Mec. Spa (Italy). Priority data 05.11.1994. (www.espacenet.com).
9. Патент РФ 2285356. H05B7/06. Подовый электрод электропечи. Малиновский В.С., Сорокин В.А. Приоритет 21.06.2004. (www.espacenet.com).
10. Диаграммы состояния двойных металлических систем: Справочник под общ. ред. Н.П. Лякишева в 3-х т.Т.2. (1997). М.: Машиностроение. 1024 с.
11. 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.

12. 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.
13. Кутателадзе, С.С., Боришанский, В.М. *Справочник по теплопередаче*. (1958). М.: Госэнергоиздат. 414 с.

REFERENCES.

1. Lupi, S. (2017). *Fundamentals of Electroheat: Electrical Technologies for Process Heating*. © Springer International Publishing Switzerland. 620p.
2. Sagermann, T. (2019) Daye Special Steel to utilize pin-type bottom electrode from SMS Group in electric arc furnace. Available at: [www.sms-group.com /press-media/press-releases/press-detail/daye-special-steel1109/](http://www.sms-group.com/press-media/press-releases/press-detail/daye-special-steel1109/)(assessed 12.07.2019).
3. Lopukhov, G.A. (2004). Bottom electrode of DC EAF “Dalieli & Co” design. *Electrometallurgiya. Electrometallurgy*, 6, 48-51 [in Russian].
4. Adachi, T., Sellan, R. (2012). The jumbo size 420 t EAF at Tokyo Steel, Japan. *MPT International*, 2, 54-62.
5. Tischenko, P.I., Tischenko, A.P, Timoshenko, S.N., Fridman, M.A. (2012). Bottom electrode of DC EAF. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost. Metallurgy & Mining Industry*, 7, 282-284. [in Russian].
6. Zaitsev, V.A., Medovar, L.B., Tischenko, P.I., Fedorovsky, B.B., Zhyravel, V.M. (2011). Two-circuit ESRT application for copper-steel DC EAF anodes manufacturing. *Sovrenemmaja Electrometallurgia. Modern Electrometallurgy*, 2, 14-16. [in Russian].
7. Solov'ev, G.I., Davidov, A.K., Marfitsin, V.V. (2003). Manufacturing of bottom electrodes by ESRT-method. *Zagotovitelny proizvodstva v mashinostroenii, Procurement in engineering*, 6, 12-13. [in Russian].
8. Patent US 5651024. H05B 7/06. Cooled bottom electrode for direct current electric furnace. G. Gensini, M. Pavlicevic. Danieli & Co Off. Mec. Spa (Italy). Priority date 05.11.1994. (www.espacenet.com).
9. Patent Ru 2285356. H05B7/06. Bottom electrode of electric furnace. Malinovsky V.S., Sorokin V.A. Priority date 21.06.2004. (www.espacenet.com).
10. State diagrams of binary metal systems: A reference book. Under the general. ed. N.P. Lyakishev in 3 books. B.2. (1997). М.: Машиностроение. 1024 p. [in Russian].
11. 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.
12. 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.
13. Kutateladze, S.S., Borishansky, V.M. *Heat Transfer Reference* (1958). М.: Gosenergoizdat. 414 p. [in Russian].

Received 14.01.2020.

Accepted 20.01.2020.

UDC 621.365.22

S. Timoshenko, M. Gubinskij

ENERGY EFFICIENT SOLUTIONS OF DC ELECTRIC ARC FURNACE BOTTOM ELECTRODE

Analysis of recent research and publications. The problems of thermal state of billet-type bottom electrode (BE) in liquid bath of DC electric arc furnace (EAF) are associated with limited thermal conductivity of the rod in the absence of available alternative to copper-steel pair. There isn't enough data on values of convective and Joule components of heat flux, passing through BE, initiated by electrovortex flows (EVF);

regarding influence of thermophysical characteristics of transition copper-steel zone and cooling rate of BE copper part on the position of phase transition surface of steel part. Problems are considered, especially related to innovative “flat bath” steelmaking technologies, in which the possibilities of dead time pauses for periodic renewal of the BE body due to “EVF-off” are significantly limited.

Purpose. To investigate the effect of EVT on the thermal state of bottom electrode and to develop on this base the energy efficient BE solutions.

Methodology. Numerical simulations of BE thermal state and an industrial testing of essentials.

Findings & Originality. For the first time, the joint effect of EVF, Joule heat, and characteristics of BE transition zone copper – steel on the position and equilibrium thickness of solid steel part of the BE, which determines the energy efficiency of DC EAF operation, was comprehensively studied.

Research implications. Numerical simulations of EVF in DC EAF steelmaking bath and heat transfer with a phase transition through BE were carried out. The heat flux density and local EVF velocity in anode well are 1.8–2 MW/m² and 0.75 m/s, respectively. Equilibrium thickness of solid steel BE part is critically dependent on the width of copper-steel transition zone, should not exceed 20-25 mm. Contribution of Joule component of total thermal load on the BE does not exceed 20%. Intensification of cooling rate above $\alpha \geq 20$ kW/(m²K) practically doesn't affect the BE solid steel part thickness.

Practical implications. Manufacturing technology of BE with a narrow transition zone by the method of two-stage electro-slag welding of copper on a steel billet, which ensures stable DC EAF operation and increases energy efficiency, has been improved.

Keywords: DC electric arc furnace, electrovortex flows, bottom electrode, phase transition, copper-steel transition zone, energy efficiency.

Тимошенко Сергій Миколайович – д.т.н., с.н.с., ДВНЗ Донецький національний технічний університет, професор, м. Покровськ, stimoshenko155@gmail.com.

Губинський Михайло Володимирович – д.т.н., професор, Національна металургійна академія України, м. Дніпро, gubinm58@gmail.com.

Timoshenko Sergii – Dr. of Sci. (Eng.), professor, Donetsk National Technical University, stimoshenko155@gmail.com.

Gubinskij Mikhail – Dr. of Sci. (Eng.), professor, National Metallurgical Academy of Ukraine, gubinm58@gmail.com.