

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ЕНЕРГОПЕРЕТВОРЕННЯ В СПЕЦІАЛІЗОВАНОМУ ЕЛЕКТРОТЕХНОЛОГІЧНОМУ КОМПЛЕКСІ

Метельський В.П., Пачколін Ю.Е., Бондаренко О.О.

Запорізький національний технічний університет
era@zntu.edu.ua

1. Вступ. Новим перспективним напрямком є науково-технічні розробки для створення електротехнологічних комплексів з комбінованим індукційно-дуговим перетворенням електричної енергії в теплову, які дозволяють заощадити енергоносії, підвищити продуктивність та підняти на якісно новий рівень систему керування технологічними процесами, а також вирішити багато техніко-економічних і екологічних задач, які не мали задовільного розв'язання іншими методами. Запропонована робота присвячена дослідженню принципово нового електротехнологічного комплексу з комбінованим індукційно-дуговим перетворенням електричної енергії в теплову [1, 2]. Теоретично-експериментальні дослідження проведені на математичній моделі, яка розроблена в Запорізькому національному технічному університеті з максимальним наближенням до реальних умов експлуатації подібного плавильного агрегату на ВАТ "Мотор Січ" при керуванні процесами енергоперетворення від мікропроцесорних керуючих комплексів Advantech Computer підтвердили доцільність науково-технічного вирішення цієї задачі.

2 Постановка задачі та методи її розв'язання. Основна задача полягає у проведенні теоретичних досліджень та промислово-експериментальних випробувань процесів енергоперетворення в спеціалізованому електротехнологічному комплексі на базі індукційно-дугового способу перетворення електричної енергії в теплову з метою визначення параметрів, необхідних для розробки математичної моделі. Теплотехнічні розрахунки базуються на класичній теорії теплових процесів в електрометалургійних печах [3]. Дослідження процесів енергоперетворення в схрещеному магнітному полі спеціалізованого електротехнологічного комплексу з індукційно-дуговим перетворенням електричної енергії в теплову проводилося з використанням теоретичних основоположень електросталеплавлення, які наведені в працях вчених Тельного С.І., Окоорокова М.В., Шилловського А.К., Борисова Б.П., Гориславця Ю.М., Лозинського О.Ю., Кучаєва А.А., Марущака Я.Ю. та інших.

3 Теоретичні підстави та початкові дані для проведення досліджень. У спеціалізованому електротехнологічному комплексі на базі індукційно-дугового перетворення електричної енергії в теплову об'єктом досліджень є плавильний простір печі, де відбувається нагрів металобрухту до точки Кюрі (720 °С) за допомогою індуктора [4] та з подальшим розплавленням за допомогою сумісної дії електричної дуги та індуктора з одночасним проведенням необхідних технологічних процесів, таких як окислення під синтетичним шлаком, розчинення твердих домішок (окатишів, агломератів, порошків) рафінування та розкислення. Схрещене електромагнітне поле від дуги та індуктора викликає появу електродинамічних зусиль, які призводять до інтенсифікації перемішування металу. Процес впливу електродинамічних зусиль на розплав є достатньо швидким (до 2-3 с) у порівнянні з електромеханічними та тепловими процесами при розплавленні. Електромеханічний процес перемішування є значно швидшим, ніж процес нагріву металу. В зв'язку з цим розрахунок процесів електромагнітного перемішування в розплаві проводиться з припущеннями постійності електродинамічних зусиль та теплового процесу, що дозволяє розраховувати ці швидкодіючі процеси при незначній зміні вказаних параметрів.

Розробка моделей теплоенергетичних процесів в електропічному просторі проводиться при стандартних початкових умовах: температура $T = 298,15 \text{ К}$, тиск у пічному просторі $0,981 \cdot 10^5 \text{ Па}$ (1 атм), при цьому, у першому припущенні, система вважається замкненою (ізолюваною), тобто не обмінюється з навколишнім середовищем ні енергією, ні матеріалами. Вона вважається рівноважною у сенсі Гіббса [5] при умові механічної, термічної, хімічної рівноваги тощо. Закони руху рідин і газів [3] при наявності сил електромагнітного походження перетворюються у закони електромагнітної гідродинаміки, які впливають з рівнянь другого закону Ньютона для одиниці об'єму. В цьому випадку

$$\rho \frac{d\vec{V}}{dt} = \sum f_i, \quad (1)$$

де V – швидкість, ρ – густина рідинного розплаву ванни, f – сила на одиницю об'єму.

Сила в'язкого руху визначається законом Ньютона

$$\tau_w = \eta \frac{dV}{dn}, \quad (2)$$

де τ_w – напруження тертя, η – динамічна в'язкість.

При наявності електромагнітних сил від індуктора та електричної дуги $\vec{f} = [\vec{j}, \vec{B}]$ (\vec{j} – вектор густини

струму, \vec{B} – вектор індукції).

Величина подемоторних сил визначається силами електричного характеру для однорідного середовища розплаву [8]:

$$\vec{f}_e = \rho_e \vec{E} + \frac{\epsilon - \epsilon_0}{2} \text{grad } E^2, \quad (3)$$

де ρ_e – густина електричного заряду, E – напруженість, ϵ – діелектрична стала електричного поля розплаву, ϵ_0 – діелектрична стала електричного поля у вакуумі.

Сили магнітного характеру дорівнюють

$$\vec{f}_m = \frac{\mu - \mu_0}{2\mu} \text{grad } B^2, \quad (4)$$

де μ – магнітна проникність розплаву сталі; μ_0 – магнітна проникність вакууму.

У гідродинаміці, при наявності сил тяжіння, нормального тиску та в'язкості, рівняння (1) прийме вигляд

$$\rho \frac{d\vec{V}}{dt} = p\vec{g} + \text{grad } p + \eta \nabla^2 \vec{V}, \quad (5)$$

де ∇^2 – диференціальний оператор Лапласа.

При урахуванні сил електричного характеру (3) (при дії поля електродів), магнітного характеру (4) (при дії поля індуктора) рівняння (5) матиме вигляд:

а) при дії поля електродів

$$\rho \frac{d\vec{V}}{dt} = p\vec{g} + \text{grad } p + \eta \nabla^2 \vec{V} + \rho_e \vec{E} + \frac{\epsilon - \epsilon_0}{2} \text{grad } E^2; \quad (6.1)$$

б) при дії поля індуктора:

$$\rho \frac{d\vec{V}}{dt} = p\vec{g} + \text{grad } p + \eta \nabla^2 \vec{V} + \frac{\mu - \mu_0}{2} \text{grad } B^2; \quad (6.2)$$

в) при сумісній дії полів електродів та індуктора:

$$\rho \frac{d\vec{V}}{dt} = p\vec{g} + \text{grad } p + \eta \nabla^2 \vec{V} + \rho_e \vec{E} + \frac{\epsilon - \epsilon_0}{2} \text{grad } E^2 + \frac{\mu - \mu_0}{2} \text{grad } B^2; \quad (6.3)$$

При дії на струмопровідний розплав сталі сил $\vec{f} = f_x \vec{i} + f_y \vec{j} + f_z \vec{k}$ рівняння (1) з урахуванням (5) прийме вигляд

$$\rho \frac{d\vec{V}}{dt} = p\vec{g} + \text{grad } p + \eta \nabla^2 \vec{V} + [\vec{j}, \vec{B}]; \quad (7)$$

Для струмопровідних середовищ (розплаву металів) \vec{j} визначається за законом Ома

$$\vec{j} = \sigma [\vec{E} + [\vec{V}, \vec{B}]], \quad (8)$$

де σ – питома провідність.

4 Визначення параметрів руху розплаву в порожнині комплексу. Через те, що електромагнітне поле є схрещеним (при діаметрі електродів $d_{01} = 95$ мм і розпалі $l_p = 380$ мм та індуктора $d_{02} = 980$ мм і висоті $h_{02} = 1400$ мм). Подина печі є не струмопровідною, у цьому випадку магнітне число Рейнольдса $Re_m < 1$, так що густина струму $j = \sigma E$. Швидкість руху у верхньому перетині має лінійний характер. Електричне поле в інтервалі $0 \leq x \leq r_e$ (де $r_e = d_e / 2 = 440$ мм – радіус ванни), а магнітне поле – по осі z (висоті індуктора $z = 1400$ мм).

Для знаходження швидкості використовуються рівняння пограничного шару:

$$v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} = F_x - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2}; \quad 0 = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + F_y; \quad \frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial y} = 0 \quad (9)$$

при граничних умовах $v_x = 0$ при $y = 0$, $\frac{\partial v_x}{\partial y} = 0$ при $y = h$. Складові сил будуть

$$F_x = g \sin \alpha + \frac{1}{\rho} [\vec{j}, \vec{B}]_x; \quad F_y = -g \cos \alpha + \rho^{-1} [\vec{j}, \vec{B}]_y.$$

Після перетворень Лапласа з (9) маємо наступне співвідношення:

$$u = \frac{k_1}{2} (1 - y^2) - 1 - 2 \sum_{m=1}^{\infty} \left(1 - \frac{\cos \gamma_m \bar{y}}{\cos \gamma_m} \right) / \gamma_m^2 \cdot \left[\gamma_m^2 \left(1 - \frac{R_e}{k_3} \right) + R_e \frac{k_1}{k_3} \right] / \left[\gamma_m^2 \left(1 - \frac{R_e}{k_3} \right) + \frac{R_e}{k_3} \right] \exp \left(-\gamma_m^2 \frac{\bar{x}}{R_e} \right), \quad (10)$$

де γ_m – корені рівняння $\operatorname{tg} x = x$; $\bar{u} = (v_x - u_0)/u_0$; $\bar{x} = x/h_0$; $\bar{y} = (y - h_0)/h_0$; $k_1 = Re \cdot \sin \alpha / F_2$; $k_2 = Re \cdot \cos \alpha / F_2$; $k_3 = k_2 + Ha^2 G$; $G = E_0 / (B_0 u_0)$. У випадку, коли $R_3 / k_3 < 1$ маємо:

$$u = \frac{k_1}{2} (1 - \bar{y}^2) - 2 \sum_{m=1}^{\infty} \left(1 - \frac{\cos \gamma_m \bar{y}}{\cos \gamma_m} \right) \cdot \left(\gamma_m^2 + Re \frac{k_1}{k_3} \right) \exp \left(-\gamma_m^2 \frac{\bar{x}}{Re} \right) / \gamma_m^2 \left(\gamma_m^2 + \frac{Re}{k_3} \right). \quad (11)$$

У рівнянні (11) ряд у правій частині швидко сходиться, тому

$$\frac{v_x}{u_0} = \frac{k_1}{2} (1 - \bar{y}^2) - 2 \left(1 - \frac{\cos \gamma_1 \bar{y}}{\cos \gamma_1} \right) \cdot \left(\gamma_1^2 + Re \frac{k_1}{k_3} \right) / \gamma_1^4 \exp \left(-\gamma_1^2 \frac{\bar{x}}{Re} \right), \quad (12)$$

де $\gamma_1 = 4,4933$ – найменший корінь рівняння $\operatorname{tg} x / x = 1$.

Рішення (7) у вигляді (10) – (12) виконано при умові, що швидкість розплаву та індукція наведеного магнітного поля залежить тільки від координати y , прикладене електричне поле має z -складову, градієнт тиску $\partial p / \partial x = 0$. Тут слід врахувати викривлення поверхні розплаву від дії електричної дуги. У цьому випадку поверхню розплаву вважаємо нахиленою до центра ванни і система рівнянь (7) – (9) прийме вигляд

$$\eta \frac{d^2 v_x}{dy^2} = -(\rho g \sin \alpha - \sigma E_z B) - \frac{1}{\mu} B \frac{dB_x}{dy}; \quad \frac{1}{\sigma \mu} \frac{d^2 B_x}{dy^2} = -B \frac{dv_x}{dy}; \quad \frac{d}{dy} \left(p + 2 \frac{B^2}{2\mu} \right) = -\rho g \cos \alpha + \sigma B_x E_z, \quad (13)$$

де граничні умови $v_x = 0$ при $y = 0$; $\frac{dv_x}{dy} = 0$ при $y = h$.

5 Визначення параметрів теплообміну. Швидкість плавлення залежить від протікання тепло-масообмінних процесів у зоні розплаву на різних стадіях плавлення (окислення, рафінування, розкислення, витримки). При наявності електромагнітного поля індуктора рівняння енергії має член, який враховує виділення джоулевого тепла від дуги та індуктора. У цьому випадку стіни футерування не струмопровідні. Тут при великих числах Гартмана в пограничному шарі, що має великий градієнт швидкості, за рахунок в'язкої та джоулевої дисипації маємо такі приблизні аналітичні вирази нижчезаведених параметрів і коефіцієнтів корисної дії як окремих теплоенергетичних процесів, так і ККД усього комплексу з індукційно-дуговим перетворенням електричної енергії в теплову.

Число Нуссельта дорівнює

$$Nu = 0,07 P_e \sqrt{\lambda} \cdot \left\{ \lg P_e + \lg 0,18 \sqrt{\lambda} + 0,25 \beta Ha^2 / \sqrt{\lambda} Re - 16,25 \beta Ha^2 / \lambda Re P_e \right\}^{-1}; \quad (14)$$

де $\lambda = \tau w \cdot (0,5 \rho v_{cp}^2)^{-1}$ – коефіцієнт опору; $\beta = (1 - \beta Ha^2 / (6 Re)) / \sqrt{\lambda} = 2 \lg (Re \sqrt{\lambda}) - 0,8$; $Pr = 0,02$.

Електромагнітна об'ємна сила

$$f_z = -\frac{4 \sigma_p IB}{\pi r_0^2 \psi_0} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin \alpha \sin \psi}{n} \cdot \rho^{n-1} \cos(n-1) \psi / \left\{ \left(1 + \frac{\sigma_k}{\sigma_p} \right) \left[1 - \left(1 - \frac{\sigma_k}{\sigma_p} \right) / \left(1 + \frac{\sigma_k}{\sigma_p} \right) \rho_1^2 n \right] \frac{\sigma_k}{\sigma_p} \right\}, \quad (15)$$

де σ_k, σ_p – електропровідність металу, що твердіє, та розплаву; ψ – кут розпаду електродів, $\psi = 17,5^\circ$.

Тиск всередині розплаву

$$p = 4IB \cdot \sin \alpha \sin \psi_0 / (\pi r_0 \psi_0) \cdot \left\{ \left(1 + \frac{\sigma_k}{\sigma_p} \right) \left[1 + \left(1 - \frac{\sigma_k}{\sigma_p} \right) / \left(1 + \frac{\sigma_k}{\sigma_p} \right) \rho_1^2 \right] \right\}^{-1}. \quad (16)$$

У безрозмірному виді та при умові відсутності скоринки металу, що твердіє, для тиску розплаву:

$$p = 2 \cdot \left\{ \left(1 + \frac{\sigma_k}{\sigma_p} \right) \left[1 + \left(1 - \frac{\sigma_k}{\sigma_p} \right) \cdot \left(\left(1 + \frac{\sigma_k}{\sigma_p} \right) (1 - \Delta)^2 \right)^{-1} \right] \right\}^{-1}, \quad (17)$$

де $\Delta = 1 - \rho_1$ – відносне значення скоринки твердого металу.

Динамічні величини параметрів для визначення ккд комплексу у вигляді операторних по Лапласу передатних функцій, які показані через критеріальні числа, визначаються за такими формулами:

- електричної дуги

$$K_{e,d}(\xi, F_0) = \exp[h(\xi - 1)] + \exp \left[\frac{h}{2} (\xi - 1) \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cdot \left[1 + \left(\frac{h}{2\mu_n} \right) \right]^{-1} \cdot \left\{ \frac{2\mu_n}{h} \cos \mu_n \xi \right\} \right] \exp \left\{ - \left[\mu_n^2 + \left(\frac{h}{2} \right)^2 \right] F_0 \right\}, \quad (18)$$

де μ_n – корені характеристичного рівняння;

ξ – опір Руху.

$$\operatorname{tg} \mu_n = -\frac{\mu}{h/2}; \quad A_n = \frac{2 \cos \mu_n}{\mu_n - \sin \mu_n \cos \mu_n}; \quad (19)$$

- електромагнітного індуктора

$$K_{инд.}(\xi, Fo) = \frac{1}{2} \exp[-h(1-\xi)] \operatorname{erfc} \left[\frac{1-\xi}{2\sqrt{Fo}} + \frac{h}{2}\sqrt{Fo} \right] - \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left[\frac{1-\xi}{2\sqrt{Fo}} + \frac{h}{2}\sqrt{Fo} \right] - \\ - \frac{1}{2} \exp(-h) \operatorname{erfc} \left[\frac{1-\xi}{2\sqrt{Fo}} - \frac{h}{2}\sqrt{Fo} \right] + \frac{3}{2} \exp(h\xi) \cdot \operatorname{erfc} \left[\frac{1-\xi}{2\sqrt{Fo}} + \frac{h}{2}\sqrt{Fo} \right]; \quad (20)$$

- спеціалізованого електротехнологічного комплексу з індукційно-дуговим перетворенням електроенергії

$$K_{с.е.к.}(Fo) = \frac{1 + \frac{Ki}{2}}{1 + Ki} \frac{1 + \frac{Bi}{2}}{1 + Bi_0 + \frac{Bi_0}{Bi_1}} - \frac{1}{\sqrt{Pd}} \frac{\sin \sqrt{Pd} + \frac{Bi_0}{\sqrt{Pd}} (1 - \cos \sqrt{Pd})}{\left(1 + \frac{Bi_0}{Bi_1}\right) \cos \sqrt{Pd} + \left(\frac{Bi_0}{\sqrt{Pd}} - \frac{\sqrt{Pd}}{Bi_1}\right) \sin \sqrt{Pd}} \times \\ \times \exp(-Pd \cdot Fo) - \sum_{n=1}^{\infty} A_n \left(1 - \frac{\mu_n^2}{Pd}\right)^{-1} \frac{\sin \mu_n}{\mu_n} \left[1 + \frac{Bi_0}{\mu_n} \operatorname{tg} \frac{\mu_n}{2}\right] \cdot \exp(-\mu_n^2 Fo). \quad (21)$$

Співвідношення (14) – (21) отримані шляхом дослідження інтегрально-диференціальних рівнянь (13) зі співвідношеннями (11), (12), а також з урахуванням рекомендацій, наведених в літературі [6, 7].

Висновок. Розроблена математична модель (21) враховує основні складові процесів, які відбуваються в пичному просторі спеціалізованого електротехнологічного комплексу, придатна для визначення ккд індукційно-дугового перетворення електричної енергії в тепло. За допомогою цієї моделі можливе визначення енергетичних показників та електротермічних характеристик, необхідних при проектуванні системи автоматизації технологічних процесів, а також для проведення комп'ютерного дослідження запропонованого комплексу.

Для визначення коефіцієнта корисної дії запропонованого комплексу необхідно по технічним характеристикам електротехнологічної підсистеми дугової печі з додатковим джерелом теплової енергії – індуктором, задатися електричними та геометричними параметрами дуги та індуктора, а також величинами критеріальних чисел після обчислення коренів характеристичного рівняння.

В результаті проведеного дослідження електрометалургійних процесів у запропонованому комплексі були отримані числові величини термодинамічних критеріїв подібності, що мають значення $Re_s = 0,1 - 14,0$; $Ha = 10^2 - 10^3$; $Re_m = 0,5 - 1,0$; $Ha^2 / Re = 10 - 10^2$; $st_s = 10^3 - 10^2$; $N = 10 - 10^4$; $Eu_m = 10^{-5}$; $HaN/Re = 10 - 10^4$; $Pr_m = 10^6$; $Ha_1 = Re_s / Re_m = 0,1 - 10^2$. Ці величини прийняті для щільності металу $\rho = (6,8 - 7,8) \cdot 10^3$ кг/м³; динамічний в'язкості $\eta_{ом} = (1,5 - 10)$ мН с/м²; питомої провідності розплаву $\sigma = (0,7 - 1,0) \cdot 10^6$ (Ом м)⁻¹; питомої теплоємності розплаву $C_p = 830$ Дж/(кг °К); коефіцієнта теплопровідності розплавів $\lambda = 17$ Вт/(м °К); коефіцієнта температуропровідності $a = 3 \cdot 10^{-6}$ м²/с; швидкості руху металу $v = 1$ м/с; характерного розміру $l_0 = 0,5$ м; часу перебування розплаву в робочій зоні $t = 1$ с; магнітної індукції $B = (0,5 - 1,0)$ Тл, напруженості електричного поля $E = (1 - 10)$ В/м.

Впровадження у виробництво запропонованого високоефективного комплексу дасть змогу:

- реалізувати одне із найбільш пріоритетних положень антикризової програми розвитку промислово-енергетичного комплексу України, спрямованої на створення енергозберігаючого устаткування;
- отримувати метали або їх сплави високої якості із заздальгідь заданими властивостями, що відповідають чинним міжнародним стандартам.

ЛІТЕРАТУРА

1. Патент "Сталеплавильний комплекс" UA № 6644-7C21C5/00 (опублікована у бюл. № 5 від 16.05.2005 р.)
2. Патент "Спосіб плавлення металу на сталеплавильних комплексах" UA № 23419 U МПК (2006) C21C5/00 (опублікована у бюл. № 7 від 25.05.2007 р.)
3. Григорян В.А., Беляничков Л.Н., Стомахин А.Я. Теоретические основы электросталеплавильных процессов. – М.: Металлургия, 1987. – 272 с.
4. Сидоренко М.Ф. Теория и технология электроплавки стали. – М.: Металлургия, 1985. – 270 с.
5. Чуйко Н.М., Чуйко А.Н. Теория и технология электроплавки стали. – Киев.; Донецк: Вища школа, 1983. – 248 с.
6. Кацевич Л.С. Теория теплопередачи и тепловые расчёты электрических печей. – М.: Энергия, 1977. – 304 с.
7. Кучаев А.А. Алгоритмы численного решения трёхмерного электромагнитного поля для установки ковш-печь // Техн. электродинамика, 2001, № 1. – С. 21 – 25.
8. Шамота В.П. Течія провідної рідини в обертовому електромагнітному полі. Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук. – Київ, 2001.