

УДК 621.717:669.046

К.М. Ялова, А.М. Павленко

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛОВОЇ РОБОТИ ДУГОВИХ ПЕЧЕЙ НА ЕТАПІ ПРОПЛАВЛЕННЯ КОЛОДЯЗІВ

Анотація. В роботі розглянуто етап проплавлення колодязів теплової роботи дугової сталеплавильної печі. Проаналізовані процеси теплообміну, що мають місце в об'ємі шихти, «болота» та футеровки печі. Зроблено математичний опис процесу проплавлення колодязів з урахуванням початкових і граничних умов теплообміну.

Ключові слова. Математична модель, електродугова піч.

Постановка проблеми

Сьогодні спостерігається стрімкий ріст долі електросталеплавильного виробництва в загальному обсязі технологій виготовлення сталі. В цілому, прогнозується, що до 2015 року світове виробництво електросталі складе приблизно 35-40% від загального об'єму виробленої сталі, а в Україні це значення складе 8-10%. Зростаючий дефіцит енергоресурсів і зростання їх вартості викликає необхідність пошуку нових технологічних рішень при створенні нових і модернізації діючих дугових сталеплавильних печей, використання альтернативних джерел теплоти, удосконалення існуючих технологічних процесів для зниження питомих витрат енергоносіїв. Оптимізація технологічних процесів в дугових печах з метою скорочення енергоспоживання і скорочення тривалості плавлення є важливою і актуальною задачею при проведенні експериментальних і теоретичних досліджень.

Аналіз публікацій по темі дослідження

Незважаючи на актуальність пошуку енергозберігаючих режимів і схем завантаження при розплавленні металошихти у дугових печах, цьому питанню присвячено досить обмежений перелік робіт таких авторів, як: Єгоров А.В., Ігнатов І.І., Тимошпольський В.І.. В теперішній час в літературі подано інформацію щодо енергетичного режиму роботи печі та залежності тривалості плавки від увідної потужності. Однак, процес плавлення не розглядається достатнім чином з точки зору теорії тепломасообміну з врахуванням

законів і механізмів передачі теплоти на кожній окремій стадії теплової роботи печі і в процесі плавки в цілому. А необхідність урахування таких видів теплообміну як: конвективно-радіаційний теплообмін футеровки з повітрям, конвективний теплообмін з пічними газами, теплопередача від стікаючого розплаву, радіаційний теплообмін в колодязях між шихтою і поверхнею електродів носять суперечливий характер.

Формулювання мети статті

Реконструкція функціонуючих дугових печей, проектування нових, введення в експлуатацію нових енергозберігаючих способів плавлення неможливі без детального аналізу теплової роботи печі. В наш час це можна зробити ефективним і економічним методом математичного моделювання. Для створення математичної моделі необхідно докладно проаналізувати фізичні процеси тепломасообміну та механізми передачі теплоти для кожного окремого етапу теплової роботи печі. Також актуальним питанням є створення ефективної методики, алгоритму та програми для розрахунку на ЕОМ.

Теплова робота дугових сталеплавильних печей умовно поділяється на чотири стадії або етапи: запалення дуг, проплавлення колодязів, закритого горіння дуг і доплавлення металошихти відкритими дугами. Основною ціллю етапу запалення дуг є встановлення стійкого горіння дуги між поверхнею електродів і завалочними матеріалами. Тривалість цього етапу в основному залежить не від теплових процесів, що мають місце в робочому просторі, а від особливостей роботи пічного трансформатора і електричного обладнання в цілому. Тому етап запалення дуг можна вважати підготовчим технологічним етапом [1]. Після встановлення стійкого горіння дуг розпочинається етап проплавлення колодязів. Проаналізуємо теплові процеси, що мають місце в період цього етапу.

Основна частина

Джерелом теплоти в об'ємі шихти на цьому етапі є енергія електричної дуги, енергія згоряння палива в пальниках (при їхньому використанні), теплота утворюваного „болота”, теплота стікаючого розплаву та теплота футеровки печі, акумульованої від попереднього етапу. Рухливими границями в період, який розглядається є верхня границя „болота” $Z_o(\tau)$, що переміщується із-за стікання до нього рідкого металу, границі областей колодязів $Z_{ik}(\tau)$, а також границя

бокової поверхні шихти в зоні дії газокисневих пальників (за умови їх роботи пальників).

Теплота в шихті, болоті та футеровки печі передається теплопровідністю і описуються відповідними рівняннями:

$$c_{ш}\rho_{ш}\frac{\partial T_{ш}}{\partial \tau} = \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(\lambda_{ш}r\frac{\partial T_{ш}}{\partial r}) + \frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial \varphi}(\lambda_{ш}\frac{\partial T_{ш}}{\partial \varphi}) + \frac{\partial}{\partial z}(\lambda_{ш}\frac{\partial T_{ш}}{\partial z}) + Q_{зоп},$$

$$Z_{б} < z \leq Z_{ш}, \quad (1)$$

$$c_{б}\rho_{б}\frac{\partial T_{б}}{\partial \tau} = \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(\lambda_{б}r\frac{\partial T_{б}}{\partial r}) + \frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial \varphi}(\lambda_{б}\frac{\partial T_{б}}{\partial \varphi}) + \frac{\partial}{\partial z}(\lambda_{б}\frac{\partial T_{б}}{\partial z}),$$

$$Z_{ф} < z \leq Z_{б}, \quad (2)$$

$$c_{ф}\rho_{ф}\frac{\partial T_{ф}}{\partial \tau} = \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(\lambda_{ф}r\frac{\partial T_{ф}}{\partial r}) + \frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial \varphi}(\lambda_{ф}\frac{\partial T_{ф}}{\partial \varphi}) + \frac{\partial}{\partial z}(\lambda_{ф}\frac{\partial T_{ф}}{\partial z}),$$

$$0 \leq z \leq Z_{ф}, R_{ш} < r \leq R_n. \quad (3)$$

за умови $\tau_1 \leq \tau \leq \tau_2$, де далі $T_{ш} = f(r, \varphi, z, \tau)$ – температура, $^{\circ}\text{C}$ шихти; $c_{ш} = f(T_{ш})$, $\lambda_{ш} = f(T_{ш})$, $\rho_{ш} = f(T_{ш})$ – масова теплоємність, $\text{Дж}/\text{кг}^{\circ}\text{C}$, коефіцієнт теплопровідності, $\text{Вт}/\text{м}^{\circ}\text{C}$, щільність, $\text{кг}/\text{м}^3$ шихти відповідно; r, φ, z – координати в циліндричній системі координат, $0 \leq r \leq R_n$, $0 \leq \varphi \leq 2\pi$, $0 \leq z \leq Z_{ш}$, R_n – радіус печі, $Z_{ш}$, $Z_{б}$, $Z_{ф}$ – відповідно висота завалки, висота первинного „болота” та висота футеровки подини; $T_{ф} = f(r, \varphi, z, \tau)$ – температура футеровки, $^{\circ}\text{C}$; $c_{ф} = f(T_{ф})$, $\lambda_{ф} = f(T_{ф})$, $\rho_{ф} = f(T_{ф})$ – відповідно масова теплоємність, коефіцієнт теплопровідності та щільність футеровки. $T_{б} = f(r, \varphi, z, \tau)$ – температура „болота”, $^{\circ}\text{C}$; $c_{б} = f(T_{б})$, $\lambda_{б} = f(T_{б})$, $\rho_{б} = f(T_{б})$ – відповідно масова теплоємність, коефіцієнт теплопровідності і щільність „болота”.

Для врахування фазового переходу від твердого до рідкого стану завалочних матеріалів, зміни їх властивостей і виділення теплоти фазового переходу в інтервалі температур солідус (T_s) – ліквідус (T_L), використовується припущення [2]:

$$c_{\bar{\sigma}} = \begin{cases} c_{u\bar{\sigma}}(T), T < T_S; \\ c_{u\bar{\sigma}}(T) - \frac{Q}{T_L - T_S}, T_S \leq T \leq T_L; \\ c_{\bar{\sigma}}(T), T \geq T_L. \end{cases} \quad (4)$$

$$\rho_{\bar{\sigma}} = \begin{cases} \rho_{u\bar{\sigma}}(T), T < T_S; \\ \frac{\rho_{u\bar{\sigma}} + \rho_{\bar{\sigma}}}{2}, T_S \leq T \leq T_L; \\ \rho_{\bar{\sigma}}(T), T \geq T_L. \end{cases} \quad (5)$$

$$\lambda_{\bar{\sigma}} = \begin{cases} \lambda_{u\bar{\sigma}}(T), T < T_S; \\ \frac{\lambda_{u\bar{\sigma}} + \lambda_{\bar{\sigma}}}{2}, T_S \leq T \leq T_L; \\ \lambda_{\bar{\sigma}}(T), T \geq T_L. \end{cases} \quad (6)$$

де Q – теплота фазового переходу в інтервалі температур солідусу і ліквідусу, Дж / кг.

Початковими умовами для рівнянь (1)-(3) в розглядуваному етапі, є поле температур для шихти, „болота” і футеровки стін та подини печі:

$$T_{u\bar{\sigma}}(\tau = \tau_1) = T_{u\bar{\sigma}1}, T_{\bar{\sigma}}(\tau = \tau_1) = T_{\bar{\sigma}1}, T_{\phi\bar{\sigma}}(\tau = \tau_1) = T_{\phi\bar{\sigma}1}, T_{\phi\partial}(\tau = \tau_1) = T_{\phi\partial1}, \quad (7)$$

де $T_{u\bar{\sigma}1}$, $T_{\bar{\sigma}1}$, $T_{\phi\bar{\sigma}1}$, $T_{\phi\partial1}$ – відповідно температура шихти, „болота”, футеровки бокової поверхні стін, футеровки подини, отримані в результаті розв’язання задачі теплопровідності на момент часу завершення етапу запалення дуг.

На осі симетрії печі задана умова симетрії:

$$\left. \frac{\partial T_{u\bar{\sigma}}}{\partial r} \right|_{r=0} = 0; \quad \left. \frac{\partial T_{\bar{\sigma}}}{\partial r} \right|_{r=0} = 0; \quad \left. \frac{\partial T_{\phi}}{\partial r} \right|_{r=0} = 0. \quad (8)$$

На границі „болото” – шихта ($z = Z_{\bar{\sigma}}(\tau)$) задана гранична умова IV роду:

$$\begin{cases} \lambda_{u\bar{\sigma}} \left. \frac{\partial T_{u\bar{\sigma}}}{\partial z} \right|_{z=Z_{\bar{\sigma}}} = \lambda_{\bar{\sigma}} \left. \frac{\partial T_{\bar{\sigma}}}{\partial z} \right|_{z=Z_{\bar{\sigma}}} \\ T_{u\bar{\sigma}} \Big|_{z=Z_{\bar{\sigma}}} = T_{\bar{\sigma}} \Big|_{z=Z_{\bar{\sigma}}} \end{cases} \quad (9)$$

На поверхні дотикання шихти з футеровкою стін печі задана умова:

$$\left\{ \begin{array}{l} \lambda_{\text{ш}} \frac{\partial T_{\text{ш}}}{\partial r} \Big|_{r=R_n} = \lambda_{\phi} \frac{\partial T_{\phi}}{\partial r} \Big|_{r=R_n} \\ T_{\text{ш}} \Big|_{r=R_n} = T_{\phi} \Big|_{r=R_n} \end{array} \right. , \quad (10)$$

а для границі зіткнення „болота” з футеровкою поду та бокових стін задані умови:

$$\left\{ \begin{array}{l} \lambda_{\phi} \frac{\partial T_{\phi}}{\partial z} \Big|_{z=Z_{\phi}} = \lambda_{\phi} \frac{\partial T_{\phi}}{\partial z} \Big|_{z=Z_{\phi}} \\ T_{\phi} \Big|_{z=Z_{\phi}} = T_{\phi} \Big|_{z=Z_{\phi}} \end{array} \right. ; \quad \left\{ \begin{array}{l} \lambda_{\phi} \frac{\partial T_{\phi}}{\partial z} \Big|_{r=R_{\text{ш}}} = \lambda_{\phi} \frac{\partial T_{\phi}}{\partial z} \Big|_{r=R_{\text{ш}}} \\ T_{\phi} \Big|_{r=R_{\text{ш}}} = T_{\phi} \Big|_{r=R_{\text{ш}}} \end{array} \right. .(11)$$

Теплота внутрішньої поверхні футеровки передається теплопровідністю до зовнішньої поверхні (3), яка в свою чергу вступає в конвективно-радіаційний теплообмін з навколишнім середовищем. На границі теплообміну між зовнішньою поверхнею футеровки бокових стін, подини та навколишнім середовищем задаються відповідні умови:

$$-\lambda_{\phi} \frac{\partial T_{\phi}}{\partial r} \Big|_{r=R_n} = \alpha_{\Sigma} (T_{\phi}(r=R_n) - T_c) \quad ; \quad -\lambda_{\phi} \frac{\partial T_{\phi}}{\partial z} \Big|_{z=0} = \alpha_{\Sigma} (T_{\phi}(z=0) - T_c) , (12)$$

де α_{Σ} – сумарний коефіцієнт тепловіддачі від поверхні футеровки стін і подини до навколишнього середовища.

Колодязі, що утворюються на протязі цього періоду, екранують електричні дуги, завдяки чому променеву енергію дуги отримує тільки поверхня шихти безпосередньо під електродами. В зоні плями дуги (на рухливій границі колодязя) (рис.1) на поверхні шихти задається гранична умова радіаційного теплообміну:

$$-\lambda_{\text{ш}} \frac{\partial T_{\text{ш}}}{\partial z} \Big|_{z=Z_{ki}(\tau)} = \varepsilon_{\text{шп1}} \sigma_0 \left((T_{\text{дуги}} + 273)^4 - (T_{\text{ш}}(z=Z_{ki}(\tau)) + 273)^4 \right) , \quad (13)$$

де $i=1,2,3$ – номер колодязя; $Z_{ki}(\tau)$ – висота поверхні i -того колодязя; $\varepsilon_{\text{шп1}}$ – приведена міра чорноти в системі „шихта – дуга”.

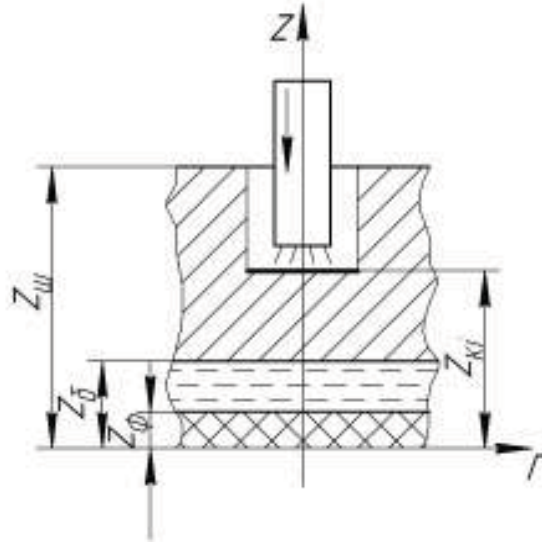


Рисунок 1 – Схема опромінення шихти електричною дугою

В результаті проплавлення колодязів, розплавлений метал стікає вниз під дією сили тяжіння, передаючи при цьому свою ентальпію розташованим нижче шарам шихти. Відбувається конвективний теплообмін між шихтою та стікаючим металом. В області руху електродів, задається наступна гранична умова третього роду для конвективного теплообміну між рідким стікаючим металом та шихтою (рис. 2):

$$\lambda_{ш} \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{(z=F_{ш})} = \alpha_{V_{рм}} (T_{рм} - T_{ш}) ; \quad (14)$$

$$\lambda_{ш} \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{(r=R_{ik})} = \alpha_{V_{рм}} (T_{рм} - T_{ш}) , \quad (15)$$

де $\alpha_{V_{рм}}$ – об’ємний коефіцієнт тепловіддачі рідкого металу, $T_{рм}$ – температура рідкого стікаючого металу, R_{ik} – радіус і-того колодязя. Бокова поверхня колодязя приймається нерухливою границею, а величина R_{ik} визначається як подвійний діаметр електродів [3].

Для системи тіл „поверхня електроду – бокова поверхня шихти” (рис.2) задається гранична умова радіаційного теплообміну:

$$-\lambda_{ш} \frac{\partial T_{ш}}{\partial r} \Big|_{r=R_{ki}} = \varepsilon_{np2} 2\sigma_0 \left((T_{ел} + 273)^4 - (T_{ш}(r=R_{ki}) + 273)^4 \right) , \quad (16)$$

де ε_{np2} – приведена ступінь чорноти системи „бокова поверхня шихти – електрод”.

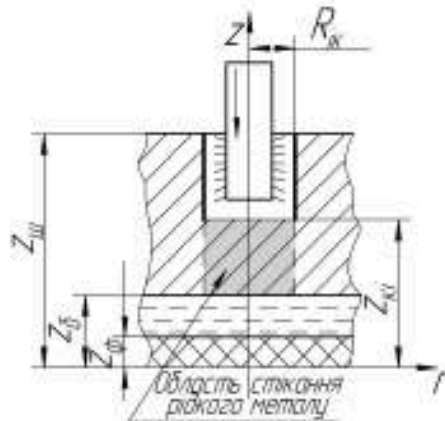


Рисунок 2 – Схема опромінення бокової поверхні колодязів

Верхня поверхня шихти, поверхня склепіння та відкрита поверхня футеровки стін складають на даному етапі замкнену систему сірих тіл, між якими відбувається теплообмін випромінюванням. На верхній поверхні шихти ($z = Z_u(\tau)$) задана умова променевого теплообміну в результаті поглинання променевої енергії, що випромінюється футеровкою склепіння та бокових стін:

$$\lambda_{ш} \frac{\partial T_{ш}}{\partial z} \Big|_{z=Z_u} = \varepsilon_{прз} \sigma_0 \left((T_{ф} + 273)^4 - (T_{ш} + 273)^4 \right), \quad (17)$$

де $\sigma_0 = 5,77 \cdot 10^{-8}, \text{Вт} / \text{м}^2 \text{К}^4$ – коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла, $\varepsilon_{прз}$ – приведена міра чорноти в системі шихта – футеровка печі, що бере участь у променистому теплообміні.

Висновки та перспективи подальших досліджень

Для аналізу адекватності отриманих даних розрахунки проводився для змінних мас первинного завантаження і печей різної геометрії. Параметрична ідентифікація створеної моделі здійснювалась урахуванням даних промислових плавок ДСПЗ-М Дніпродзержинського сталеливарного заводу. Тривимірні рівняння теплопровідності з відповідними початковими і граничними умовами замінялися кінцево-різницевиими співвідношеннями на підставі методу кінцевих різниць [4]. Теплові баланси розрахункових чарунок розраховувались при використанні методу контрольного об'єму з розщепленням теплових потоків по координатам. Загальне відхилення розрахункових даних етапу проплавлення колодязів від даних промислових плавок не перевищує 4%.

Створена математична модель етапу проплавлення колодязів є складовою частиною комплексної математичної моделі теплової роботи дугових печей, створення якої, надасть можливість проведення чисельних експериментів щодо процесу плавлення пористого тіла.

ЛІТЕРАТУРА

1. Никольский Л.Е., Смоляренко В.Д., Кузнецов Л.Н. Тепловая работа дуговых сталеплавильных печей, М.: Металлургия, 1981. – 320с.
2. Расчет оптимальных режимов нагрева жидкого металла в дуговой сталеплавильной печи/ И.И. Игнатов, Л.Б. Рапопорт – Математическое моделирование и расчеты ЭТО. Сборник научных трудов, М: ВНИИЭТО, 1989. – С.3-10.
3. Теплообмен в дуговых сталеплавильных печах: Учеб. пособие / Макаров А.Н., Тверь: ТГТУ, 1998. – 183 с
4. Егоров А.В. Расчет мощности и параметров электроплавильных печей, М: МИСИС, 2000. – 271с.