

Романько Я.В., Мешкова А.Г., Суліменко С.Є.

**Дослідження теплової підготовки сталеливарних ковшів
при використанні електричних нагрівачів**

Romanko Ya.V., Meshkova A.H., Sulimeko S.Ye.

**Study of thermal preparation of steel ladles with the use
of electric heaters**

Об'єкт дослідження – процеси теплообміну в робочому просторі сталеливарного ковша та футерівці при його розігріванні з застосуванням електричних нагрівачів. Мета дослідження – визначення впливу характеристик нагрівача та ковша на теплові потоки на поверхні футерівки та температурні поля на різних ділянках ковша. В роботі представлена математична модель розігріву сталеливарного ковша з використанням електронагрівача. Для розрахунку теплообміну випромінюванням між поверхнями футерування, кришки та нагрівальними елементами застосований зональний метод. Задача визначення теплопровідності для кожної ділянки футерування вирішувалася методом кінцевих різниць. Наведено результати розрахунків розігріву сталерозливного ковша ємністю 50 тон. Показано залежності зміни теплових потоків та температури поверхонь по висоті бічної стінки ковша, а також розподілу температури за товщиною футерування.

Ключові слова: електронагрівання, сталерозливний ківш, футерування, математичне моделювання, теплообмін.

The object of study is the process of heat exchange in the working space of a steel ladle and linings when they are heated with frozen electric heaters. The purpose of the study is based on the influence of the heating characteristics of the ladle on the heat flows on the surface of the lining and the temperature fields on different sections of the ladle. This study represents the mathematical model of steel teeming ladle heating using electric heater. The zone method was used to calculate the radiative heat transfer between refractory line, lid, and heating elements. Heat conductivity for each line section was calculated by finite difference method. The results of calculation of steel teeming ladle heating (up to 50 tons) are represented. The dependences of heat flux change and surface temperature upon the height of the ladle's side wall is presented. The temperature distribution over the refractory line's thickness is presented, too.

Key words: electric heating, steel teeming ladle, refractory line, mathematical model, heat transfer.

Вступ. В даний час на металургійних підприємствах експлуатується велика кількість сталеливарних ковшів, які використовуються для транспортування, розливання рідкого металу та проведення низки технологічних процесів. Сушіння та розігрів футерування ковшів є важливим підготовчим етапом, який впливає на експлуатаційну стійкість вогнетривів та температура розплаву. Від цих факторів надалі залежить якість готової продукції – сталі, що виплавляється. Слід зазначити, що тепла підготовка футерування – ще й енергоємний процес, на який йде більша частина енерговитрат на етапі розливання сталі.

Аналіз літературних даних та постановка проблеми. Як відомо, тепла обробка футеровок сталерозливних ковшів проходить на спеціальних стендах сушіння та розігріву. Для опалення на цих установках частіше використовується теплота палива, однак останнім часом альтернативою став електронагрів [1]. У разі використання електричних стендів для теплової підготовки ковшів забезпечується високий ККД, реалізація температурного режиму будь-якої складності, зниження загазованості робочого майданчика [2]. Однак виникають проблеми з експлуатацією нагрівальних елементів та силового електричного обладнання.

На сьогоднішній день цікавить дослідження компонування електронагрівачів та їх розташування в ковші на якість розігріву та сушіння, вибір оптимальних параметрів нагріву із забезпеченням технологічності процесу та економії паливно-енергетичних ресурсів. Нижче описано математичну модель розігріву ковша при використанні електронагріву.

Для моделювання процесу розігріву сталерозливного ковша прийнято, що ківш має форму порожнистого циліндра з плоским дном та плоскою кришкою (рис. 1). Стінка циліндра має внутрішній радіус R_1 та зовнішній радіус R_2 . Висота внутрішнього простору – H . Дно та кришка циліндра мають, відповідно, товщину S_1 та S_2 . На кришці розташований електронагрівач, який представляє собою ряд однакових циліндрів діаметром d і висотою h , рівномірно розташованих по колу радіусом R_3 в центрі кришки.

У початковий момент часу стінки, дно і кришка ковша мають температуру t_0 . Температура електронагрівача протягом процесу нагрівання залишається постійною та дорівнює T_n . Передача теплоти від нагрівача до ковша та кришки здійснюється виключно випромінюванням. При цьому всі поверхні є сірими та дифузними. Прогрів стінок ковша та кришки відбувається теплопровідністю тільки по



товщині футерування. З зовнішніх поверхонь ковша теплота втрачається в довкілля конвекцією та випромінюванням.

Для розрахунку теплообміну випромінюванням усередині ковша застосовується зональний метод. Внутрішня поверхня циліндричної стінки ковша умовно розбивається на N_z рівних ділянок

заввишки $\Delta z = H / N_z$. На внутрішній поверхні кришки виділяється дві зони – внутрішня та зовнішня. Перша з них знаходиться всередині кола, утвореного нагрівачами радіусом R_n , а друга займає решту поверхні кришки.

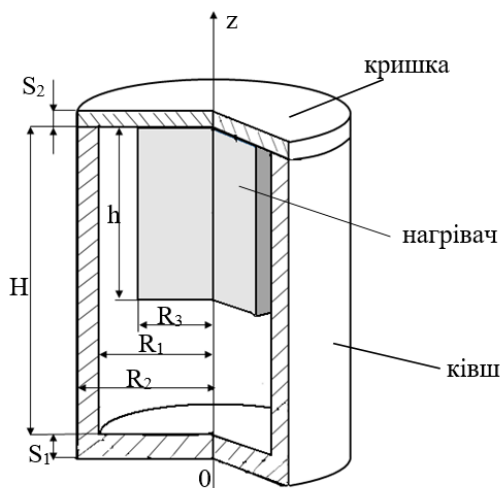


Рисунок 1 – Схема сталерозливного ковша з електричним нагрівачем

На поверхні донної частини ковша розташовуються внутрішня та зовнішня зони дна, що мають такі ж розміри, як зони кришки. Таким чином, внутрішня поверхня ковша поділена на $(N_z + 4)$ зон. До них додається зона, що представляє поверхню

$$q_i = \sigma_0 \varepsilon_i \sum_{j=0}^{N_z+4} \varepsilon_j f_{ij} (T_j^4 - T_i^4), \quad i = 1, 2, \dots, N_z + 4, \quad (1)$$

де q_i – щільність результуючого теплового потоку випромінюванням падаючого на зону i , Вт/м²; $\sigma_0 = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²К⁴) – коефіцієнт випромінювання чорного тіла; ε_i і ε_j – ступеня чорноти зон i і j ; T_i і T_j – температури зон i і j , К; f_{ij} –

всіх елементів електронагрівача. Їй надається номер 0.

Щільності теплових потоків на зони системи розраховуються як:

дозволяючий кутовий коефіцієнт випромінювання із зони i на зону j .

Дозволяючі кутові коефіцієнти враховують багаторазові відображення променистих потоків від сірих поверхонь системи та знаходяться з вирішення наступної системи рівнянь:

$$f_{ij} = \phi_{ij} + \sum_{k=0}^{N_z+4} \phi_{ik} (1 - \varepsilon_k) f_{kj}, \quad i, j = 0, 1, 2, \dots, N_z + 4, \quad (2)$$

де ϕ_{ij} – кутовий коефіцієнт випромінювання із зони i на зону j .

Кутові коефіцієнти розраховуються у системі без електронагрівача. Для цього використовуються аналітичні залежності для простих геометричних конфігурацій та властивості кутових коефіцієнтів [3, 4]. Потім приблизно знаходиться пропускальна здатність ряду елементів електронагрівача, яка дорівнює

$$p = \frac{d \cdot N_e}{2\pi R_n}, \quad (3)$$

де N_e – кількість циліндричних елементів нагрівача.

Далі розраховуються кутові коефіцієнти між зонами системи за наявності в ній електронагрівача:

$$\phi_{ij} = \phi'_{ij} - \phi_{i0} (1 - P_{ij}), \quad i, j = 1, 2, \dots, N_z + 4, \quad (4)$$

де ϕ'_{ij} – кутовий коефіцієнт випромінювання із зони i на зону j в системі без електронагрівача; P_{ij} – пропускальна здатність нагрівача між зонами i і j .

Пропускальна здатність P_{ij} приймає значення p , коли промінь проходить один ряд елементів нагрівача, і значення p^2 , коли промінь проходить два ряди елементів. В решті випадків $P_{ij} = 1$. Кутові коефіцієнти випромінювання з поверхонь футерування та кришки на електронагрівач знаходяться як:

$$\phi_{i0} = 1 - \sum_{j=1}^{N_z+4} \phi_{ij}, \quad i = 1, 2, \dots, N_z + 4. \quad (5)$$

Після визначення значень щільності променистих потоків за формулою (1) для кожної виділеної ділянки футерування ковша та кришки вирішується диференціальне рівняння теплопровідності протягом малого інтервалу часу $\Delta\tau$. При цьому на внутрішній поверхні футерування задаються граничні умови другого роду для кожної ділянки. Для зовнішніх поверхонь ковша в якості граничної умови задається теплообмін з навколишнім середовищем.

Для вирішення задачі теплопровідності застосовується метод кінцевих різниць. На кожній розрахунковій ділянці по товщині стінки вводиться вузлова рівномірна сітка. Після розрахунку розподілу температур у вузлах сітки протягом малого інтервалу часу виконується перерахунок променистих потоків на зони системи. Для цього спочатку задаються нові значення температур зон, які приймаються рівними значенням температур у вузлах сітки відповідних ділянок, розташованих на їх внутрішній поверхні. Після цього за формулою (1) розраховуються щільності теплових потоків і т.д.

Результати дослідження. За запропонованою вище математичною моделлю було розраховано розігрів футерування сталерозливного ковша ємністю 50 тонн. При цьому були прийняті такі основні розміри ковша: середній внутрішній радіус ковша $R_1 = 1,04$ м; висота внутрішнього простору $H = 2,5$ м; товщина бічної стінки футерування та днища $S=0,22$ м і $S_1=0,4$ м відповідно; товщина кришки $S_2 = 0,22$. Було прийнято, що робочі поверхні ковша виконані з шамоту, а кришка футерована волокнистими вогнетривкими блоками. На кришці були встановлені 10 U-подібних карбідокремнієвих нагрівальних елементів, розташованих по колу радіусом $R_3=0,5$ м. Приймали, що нагрівачі мали температуру поверхні 1550 К. Розігрів тривав 2 години.

Зміна щільності теплового потоку та температури поверхні футерування на різних ділянках бічної стінки показана на рисунку 2.

Максимальне значення результуючої щільності теплового потоку на футерування має місце на початку розігріву на ділянці шлакового пояса, що пояснюється його близьким розташуванням до нагрівача та кришки стенду (див. рис. 2 а). В результаті стрімко піднімається температура поверхні у зазначеній зоні та інтенсивність променистого теплообміну знижується вдвічі за перші 30 хвилин.

Нагрів верхньої зони бічної поверхні та кришки призводить до збільшення теплового потоку на нижній ділянці за рахунок перевипромінювання теплоти. Приблизно через годину розподіл променистої енергії зони вирівнюється. Наприкінці розрахункового періоду перепад температури по висоті бічної поверхні футерування ковша становить 225 °С.

На рисунку 3 показано розподіл температури за товщиною шлакового пояса через 30, 60 і 120 хвилин від початку розігріву ковша. За перші 30 хвилин футерування прогрівається на глибину 90 мм, при цьому броня залишається холодною, температура тут починає підніматися тільки до закінчення другої години. Нижня частина бічної стінки, розташована біля днища, прогрівається гірше (див. рис. 3 б). Однак перепад температур за товщиною футерування в нижній зоні на початковому етапі більш ніж у три рази нижче, в порівнянні з зоною шлакового пояса, що говорить про меншу ймовірність руйнувань вогнетривів при розігріві.

Температура внутрішньої поверхні ковша досягає для шлакового пояса 870 °С, а для ділянки в районі днища 640 °С. Для подальшого підвищення температури доцільно продовжити нагрівання і підвищити температуру нагрівачів за рахунок підвищення потужності, що подається на них.

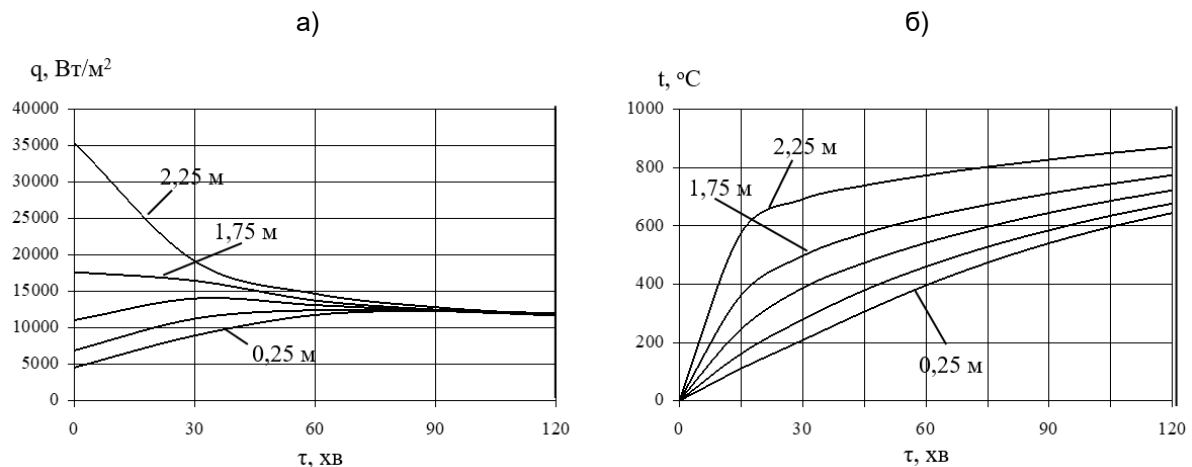


Рисунок 2 – Зміна щільності теплового потоку (а) та температури внутрішньої поверхні (б) при нагріванні футерування ковша на різних ділянках бічної стінки

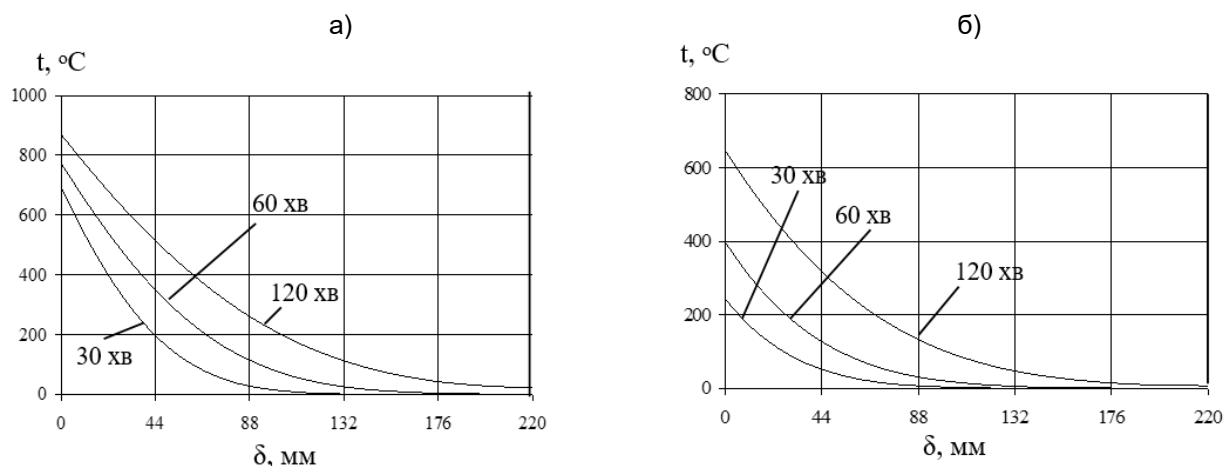


Рисунок 3 – Розподіл температур за товщиною бічної стінки ковша в районі шлакового пояса (а) та днища (б) при нагріванні ковша

Висновки. За результатами розрахунків видно, що при розігріві футерування ковша знаходиться в різних теплових умовах, що відбивається на температурному полі футерування протягом усього процесу. Розроблена математична модель ковша

дозволяє враховувати вплив потужності нагрівача, його конфігурації та компонування, інших важливих факторів на нерівномірність та економічність нагріву футерування..

Перелік посилань

1. Вихлевщук В.А. Высокотемпературный нагрев футеровки сталеразливочных ковшей / В.А. Вихлевщук, А.С. Стороженко, А.П. Шкирмонтав [и др.] // Чёрная металлургия. – 1992, №9. – С.13–21.
2. Бершицкий И.М. Энергосберегающие и экологически безопасные установки для электрической сушки и подогрева футеровки ковшей / И.М. Бершицкий, А.В. Тарарышкин // Сталь. – 2010, №2. – С. 24 – 25.
3. Блох А.Г. Теплообмен излучением. Справочник / А.Г. Блох, Ю.А. Журавлев, Л.Н. Рыжков. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 432 с.
4. Michael F. Modest. Radiative heat transfer. An imprint of Elsevier Science. New York. Academic Press, 2003. - 822 p.

References

1. Vikhlevshchuk, V. A., Storozhenko, A. S., Shkirmontov, A. P. et al. (1992). Vysokotemperaturnyi nagrev futerovki stalerazlivochnykh kovshei. Chernaia metallurgii, (9), 13–21
2. Bershitskii, I. M., & Tararyshkin, A. V. (2010). Energoberegaiushchie i ekologicheski bezopasnye ustanovki dlia elektricheskoi sushki i podogreva futerovki kovshei. Stal, (2), 24 – 25
3. Blokh, A. G., Zhuravlev, I. U. A., Ryzhkov, L. N. (1991). Teploobmen izlucheniem. Spravochnik Energoatomizdat
4. Michael, F. (2003). Modest. Radiative heat transfer. An imprint of Elsevier Science. Academic Press

Надійшла до редколегії / Received by the editorial board: 14.08.2024

Прийнята до друку / Accepted for publication: 20.11.2024