

УДК 621.746.3:669.184

С.В. Бейцун, доцент, к.т.н.

М.В. Михайловський, доцент, к.т.н.

В.Ю. Мурдій, студент

ВПЛИВ ТРИВАЛОСТІ ЦИКЛУ ІМПУЛЬСНОГО РЕЖИМУ РОЗІГРІВАННЯ СТАЛЕРОЗЛИВНОГО КОВША НА ТЕПЛОВМІСТ ЙОГО ФУТЕРОВКИ

Національна металургійна академія України, м. Дніпропетровськ

В результате исследования на компьютерной модели показана возможность существенного энерго- и ресурсосбережения при импульсном разогреве сталеразливочного ковша. Получена зависимость теплосодержания футеровки ковша от времени цикла импульсного режима его разогрева.

Ключевые слова: сталеразливочный ковш, футеровка, теплосодержание, импульсный режим, продолжительность цикла, моделирование

Як результат досліджень на комп'ютерній моделі, показано можливість суттєвого енерго- та ресурсозбереження під час імпульсного розігрівання сталерозливного ковша. Отримано залежність тепловмісту футеровки ковша від тривалості циклу імпульсного режиму його розігрівання.

Ключові слова: сталерозливний ківш, футерівка, тепловміст, імпульсний режим, тривалість циклу, моделювання

As a result of researchs on a computer model it is shown the possibility for a significant energy- and recoursesaving at impulse heating of steel-pouring ladle. The dependence of the enthalpy lining ladle from the cycle duration for the pulsed mode heating has been received.

Keywords: steel-pouring ladle, lining, enthalpy, impulsive mode, duration of cycle, modeling

Вступ. З метою зниження енергетичних витрат на розігрівання сталерозливних ковшів останнім часом широко застосовують імпульсний режим, за яким цілеспрямоване управління тепловим потоком, що передається від факела та продуктів згоряння палива до футеровки ковша, збільшує температурний напір і поверхню теплообміну, а також інтенсивність конвективної тепловіддачі. В результаті цього підвищуються ефективність використання палива та коефіцієнт корисної дії процесу [1].

Окрім цього, застосування імпульсного режиму сприяє більш рівномірному прогріванню футеровки та знижує ймовірність виникнення її локального перегрівання.

Постановка задачі. Метою дослідження є визначення залежності тепловмісту футеровки сталерозливного ковша від тривалості циклу імпульсного режиму для економії енергетичних ресурсів на термічну підготовку ковша під випуск сталі, а також порівняння ефективності безперервного та імпульсного режимів.

Основний матеріал досліджень. Для дослідження змінювання тепловмісту футеровки під час імпульсного розігрівання стале розливного ковша авторами у комп'ютерній моделі використано метод кінцевих елементів, що дозволяє чисельно вирішувати широкий спектр фізичних задач. На даний час існує чимало програмних продуктів [2,3] для вирішення крайових задач,

які описують диференціальні рівняння в частинних похідних. Вони дозволяють виконувати лінійний і нелінійний температурний аналіз для плоскої та вісесиметричної постановки.

Вирішення крайової задачі нестационарної теплопровідності для тіла у декартовій системі координат x, y, z має вигляд

$$K_{xx} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + K_{yy} \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + K_{zz} \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \rho \cdot c \frac{\partial T}{\partial \tau}, \quad (1)$$

де $T = T(x, y, z)$ – поле температури, °С; K_{xx} , K_{yy} , K_{zz} – коефіцієнти теплопровідності за вісями x, y, z , відповідно, Вт/(м·°С); c – питома теплоємність матеріалу, Дж/(кг·°С); ρ – щільність матеріалу, кг/м³; τ – час, с.

Окрім цього, математична модель містить граничні умови для вирішення рівняння (1) та модель теплофізичних властивостей матеріалу.

В якості об'єкта дослідження вибрано 120-тонний набивний сталерозливний ківш. Структура футеровки ковша, а також теплофізичні властивості її компонентів у функції температури наведено у роботі [4].

Ківш являє собою усічений циліндр внутрішнім діаметром 3,00 м, висотою 4,10 м і конусністю стінки 0,06 з округлим днищем. Для створення об'ємної геометричної моделі спроектовано базовий ескіз у половину перерізу ковша за діаметром. В ескізі враховано геометрію та розташування кожного шару футеровки і кожуха

ковша. Об'ємну модель ковша отримали за допомогою обертання цього ескізу навколо вертикальної осі.

Як критерій ефективності розігрівання сталерозливного ковша використано питомий тепловміст стінки та днища ковша у характерних перерізах (для стінки – на рівні шлакового поясу, а для днища – за його віссю), який визначають як

$$I(x) = \rho \cdot \delta \cdot C[T(x)] \cdot T(x), \text{ Дж/м}^2, \quad (2)$$

де ρ , δ – щільність, кг/м³, і товщина, м, матеріалу футеровки, відповідно; $C[T(x)]$ – залежність теплоємності матеріалу футеровки від температури, $C[T(x)] = C_0 + b \cdot T(x)$; C_0 – теплоємність матеріалу футеровки за температури 0°C, Дж/(кг·°C); b – температурний коефіцієнт; $T(x)$ – профіль температури, що лінеарізовано за результатами моделювання; $T(x) = T_0 + a \cdot x$; T_0 – температура внутрішньої поверхні шару футеровки, °C; a – коефіцієнт лінеарізації, град./м; x – координата товщини футеровки, м.

Величину питомого тепловмісту для k -го шару футеровки визначають за формулою

$$I_k = \int_0^{\delta_k} I_k(x) dx_k = \int_0^{\delta_k} \rho_k \cdot [C_{0k} + b_k \cdot (T_{0k} + a_k \cdot x)] \cdot (T_{0k} + a_k \cdot x) dx_k. \quad (3)$$

Після інтегрування рівняння (3) одержують співвідношення

$$I_k = \rho_k \cdot [T_{0k} \cdot (C_{0k} + b_k \cdot T_{0k}) \cdot \delta_k + \frac{a_k \cdot (C_{0k} + 2b_k \cdot T_{0k}) \cdot \delta_k^2}{2} + \frac{a_k^2 \cdot b_k \cdot \delta_k^3}{3}]. \quad (4)$$

Питомий тепловміст стінки та днища ковша дорівнює сумі питомих тепловмістів відповідних шарів футеровки у зазначених перетинах

$$I = \sum_{k=1}^n I_k. \quad (5)$$

Для порівняння ефективності режимів розігрівання використано відношення величини питомого тепловмісту футеровки ковша I_r , якого одержано за досліджуваним режимом розіг-

рівання, до величини питомого тепловмісту I_0 за стаціонарним режимом для тих же граничних умов

$$K_I = \frac{I_r}{I_0}. \quad (6)$$

На першому етапі досліджували вплив тривалості циклу нагрівання ковша, для чого послідовно моделювали його розігрівання за $\tau_u = 15; 30; 45; 60; 75; 90$ хвилин і, далі, 2; 4; 6; 8 і 12 годин. Коефіцієнт заповнення циклу режиму розігрівання, згідно роботи [5], приймали як 0,90.

На рис. 1 подано графіки змінювання відносного питомого тепловмісту K_I футеровки стінки (1) та днища (2) ковша залежно від тривалості циклу нагрівання. Оцінку відносного питомого тепловмісту K_I футеровки стінки та днища ковша виконували у зазначених вище перетинах. Аналіз графіків на рис. 1 показує, що ефективність імпульсного розігрівання монотонно зростає із зменшенням тривалості циклу, сягаючи за $\tau_u = 15$ хвилин для перерізу стінки на рівні шлакового поясу значення 0,997 та значення 0,991 – для осьового перерізу днища.

Проте практична реалізація методу імпульсного розігрівання накладає певні технічні обмеження на дискретність процесу. За максимальним значенням критерію ефективності режимів розігрівання, що дорівнює 0,99, в середньому для стінки та днища це значення реалізується за тривалості циклу нагрівання 45 хвилин, а також коефіцієнті його заповнення, що дорівнює 0,90.

На другому етапі досліджували змінювання тепловмісту футеровки за безперервним та імпульсним режимами розігрівання ковша. У роботі [6] для ковша, що є аналогічним до досліджуваного, запропоновано температурний режим сушіння та високотемпературного розігрівання, що складається з чотирьох етапів: лінійного зростання температури протягом восьми годин до 650 °C; витримки за цієї температури протягом чотирьох годин; лінійного зростання температури протягом восьми годин до 1100 °C; подальшої чотиригодинної витримки. Загальна тривалість такого процесу термічної підготовки ковша становить 24 години.

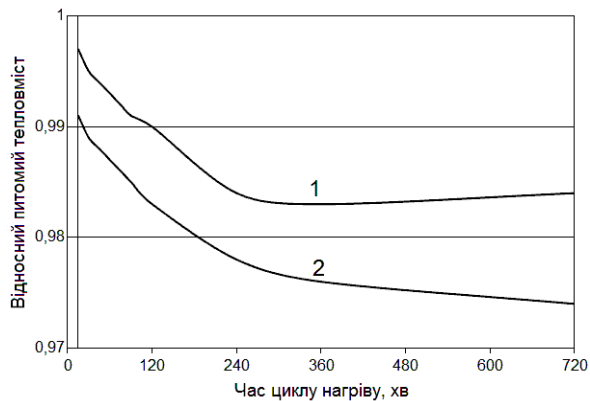


Рисунок 1 – Залежність відносного питомого тепловмісту футеровки стінки (1) та днища (2) ковша від тривалості циклу нагрівання

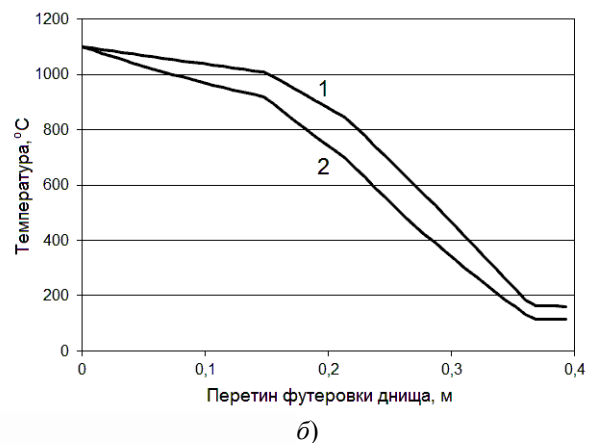
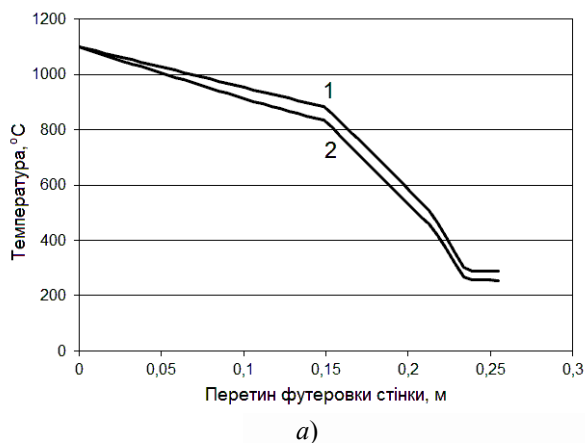


Рисунок 2 – Розподіл температури футеровки стінки (а) та днища (б) розігрітого ковша

Порівняння ефективності режимів розігрівання ковша подано у табл. 1. Розглянуто три режими: режим сталого теплопередавання за температури внутрішньої поверхні футеровки 1100 °С; безперервний режим розігрівання згід-

но температурному графіку роботи [6]; режим імпульсного розігрівання за цим же графіком із тривалістю циклу $\tau_y = 45$ хвилин.

Таблиця 1 – Порівняння ефективності режимів розігрівання ковша за тепловмістом

Режими розігрівання	Сталый		Безперервний		Імпульсний	
	стінка	днище	стінка	днище	стінка	днище
Розташування						
Питомий тепловміст, МДж/м ²	650,8	575,5	622,1	498,2	620,4	495,9
Критерій ефективності K_f	1,000	1,000	0,956	0,866	0,953	0,862

В цілому, для всього ковша можна оцінити відносний запас тепловмісту футеровки, одержаного в результаті його розігрівання, як середнє значення для зазначених перерізів стінки та днища. При цьому відношення величини критеріїв ефективності імпульсного та безперервного режимів розігрівання складе 0,996. Іншими сло-

вами, ківш за імпульсним розігріванням протягом 24 годин запасе теплоти лише на 0,4 % менше, ніж за безперервним розігріванням.

Якщо, в першому наближенні, припустити пропорційність витрат палива значенню температури внутрішньої поверхні футеровки, то економія палива за імпульсним розігріванням з ко-

ефіцієнтом заповнення циклу 0,90 складає приблизно 10 %. Таким чином, аналіз наведених даних моделювання демонструє високу ефективність імпульсного режиму розігрівання ковша.

Висновки. Дослідження на комп'ютерній моделі встановлено вплив тривалості циклу імпульсного режиму розігрівання на тепловміст фу-

теровки ковша. Виконано порівняння тепловмісту футеровки ковша за безперервним та імпульсним режимами розігрівання. Показано високу ефективність імпульсного режиму. Дані результати можуть бути корисними для енерго- та ресурсозбереження під час підготовки сталерозливних ковшів.

Бібліографічний список

1. **Сушенко, А. В.** Разработка и промышленное освоение импульсного режима отопления стенов для сушки и разогрева сталеразливочных ковшей [Текст] / А. В. Сушенко, О. В. Носоченко, М. Л. Хазнаферов и др. // *Металлург.* – 2002. – № 9. – С. 45-47. – Библиогр.: с. 47.
2. **Дубицкий, С. Д.** ELCUT 5.1 – платформа разработки приложений анализа полей [Текст] / С. Д. Дубицкий // *Exponenta Pro. Математика в приложениях.* – 2004. – № 5. – С. 20-26.
3. **Бруйка, В. А.** Инженерный анализ в ANSYS Workbench: Учебное пособие [Текст] / В. А. Бруйка, В. Г. Фокин, Е. А. Солдусова и др. – Самара : Самарский государственный технический университет, 2010. – 271 с. – Библиогр.: с. 270. – ISBN 978-5-7964-1392-0. – 50 экз.
4. **Бейцун, С. В.** Исследование на компьютерной модели разогрева сталеразливочных ковшей / С. В. Бейцун, Н. В. Михайловский, В. Ю. Мурдий [Текст] // *Вестник Приазовского государственного технического университета. Серия: Технические науки.* – 2015. – Вып. 30, Т. 1. – С. 105-111. – Библиогр.: с. 111.
5. **Беленький, А. М.** Автоматическое управление металлургическими процессами [Текст] : Учебник для вузов / А. М. Беленький, В. Ф. Бердышев, О. М. Блинов и др. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : *Металлургия*, 1989. – 384 с. – Библиогр.: с. 381. – ISBN 5-229-00224-7. – 4550 экз.
6. **Переходченко, В.** Автоматизированная система управления станом вертикальной сушки ковшей [Текст] / В. Переходченко, А. Ребедак, С. Гаркавенко и др. // *Современные технологии автоматизации.* – 2006. – № 3. – С. 32-36. – Библиогр.: с. 36.

Стаття надійшла до редакції 17.11.2015 р.
Рецензент, проф. О.Ю. Потап

Текст даної статті знаходиться на сайті ЗДІА в розділі Наука
<http://www.zgia.zp.ua>