

УДК 621.746.3:669.184

М.В. Михайловський, доцент, к.т.н.

С.В. Бейцун, доцент, к.т.н.

С.І. Дьомін, студент

А.А. Іов, студент

МОДЕЛЮВАННЯ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО РОЗІГРІВАННЯ СТАЛЕРОЗЛИВНИХ КОВШІВ

Національна металургійна академія України, м. Дніпропетровськ

В результате решения методом конечных элементов краевой задачи, описываемой эллиптическими дифференциальными уравнениями в частных производных, в программном пакете «ELCUT» получено изменение температурного поля футеровки сталеразливочного ковша при его подготовке под выпуск стали на установке высокотемпературного разогрева.

Ключевые слова: сталеразливочный ковш, футеровка, температурное поле, метод конечных элементов, моделирование

Як результат вирішення методом кінцевих елементів крайової задачі, описуваної еліптичними диференціальними рівняннями у часткових похідних, у програмному пакеті «ELCUT» одержано змінування температурного поля футеровки сталерозливного ковша під час його підготовки під випуск сталі на установці высокотемпературного розігрівання.

Ключові слова: сталерозливний ківш, футеровка, температурне поле, метод кінцевих елементів, моделювання

As a result of the decision by final element method of the boundary value problem, describing by elliptic differential equations in partial derivatives, in the software package «ELCUT» the change of the lining temperature field for ladle at its preparation under discharge of steel on high temperature heating device have been obtained.

Keywords: casting ladle, lining, temperature field, final element method, modeling

Вступ. Розігрівання сталерозливних ковшів здійснюється з метою зниження теплових втрат рідкого металу та запобігання руйнування робочої футеровки ковша, що пов'язано з різким перепадом температур у початковий період випускнення розплаву [1]. Установка сушіння та высокотемпературного розігрівання сталерозливних ковшів призначена для висушування вогнетривкої кладки і підготовки ковша до наливання сталі.

Температурні режими, а також тривалість розігрівання вогнетривкої кладки ковша встановлюють на підставі експериментальних даних для даного типу футеровки залежно від її фізичних властивостей. Витрата палива залежить від зовнішніх умов і конструкції установок [2]. Розігрівання робочого шару сталерозливних ковшів ведеться шляхом подавання у робочий простір ковша продуктів горіння природного газу [3].

Постановка задачі. Великим недоліком сучасних установок є необхідність постійного контролю оператором розігрівання ковшів. Оператор не має прямої інформації про готовність ковша. Висновок про розігрівання є результатом порівняння графіка розігрівання постачальника вогнетривкої футеровки та графіка розігрівання, одержаного за допомогою реєструючого самописного приладу під час

розігрівання ковша. Основним завданням системи управління стендом розігрівання сталерозливних ковшів є відпрацювання вибраних оператором температурно-часових діаграм з контролем усіх основних параметрів технологічного процесу.

Таким чином, завдання управління процесом нагрівання ковша полягає у вибиранні та підтримці режиму роботи, який забезпечить одержання якісної висушеної вогнетривкої кладки з мінімально можливою питомою витратою палива в умовах змінної продуктивності агрегату.

Для обґрунтованого вибирання режимів сушіння та высокотемпературного нагрівання сталерозливних ковшів необхідно уявляти собі динаміку температурного поля футеровки стінок і днища ковша. Оскільки існуючі технічні засоби не дозволяють за виробничих умов оперативно контролювати температуру футеровки ковша, то для управління технологічним процесом її необхідно прогнозувати.

Основний матеріал дослідження. Для моделювання процесу розігрівання сталерозливних ковшів використано програмний пакет «ELCUT», призначений для двовимірного моделювання електромагнітних, теплових і пружних полів методом кінцевих елементів [4]. Пакет дозволяє вирішувати крайові задачі, які описуються еліптичними диференціальними рівняннями у частинних похідних.

Під час температурного аналізу інтерес представляють розподіл температури, значення температурного градієнта та теплового потоку. Пакет «ELCUT» дозволяє виконувати лінійний і нелінійний стаціонарний температурний аналіз у плоскій та вісесиметричній постановці.

Математична модель містить рівняння у часткових похідних, граничні умови, з якими вирішуються ці рівняння, та модель матеріалу – константи, що визначають його теплофізичні властивості.

У контексті задачі нестационарної теплопровідності у пакеті «ELCUT» використовують рівняння для вісесиметричної задачі

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda(T) \cdot r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right) = -q(T) - C(T) \cdot \rho \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (1)$$

де z , r – координати; T – температура; $\lambda(T)$ – теплопровідність; $q(T)$ – питома потужність тепловиділення внутрішніх джерел теплоти; $C(T)$ – питома теплоємність; ρ – щільність матеріалу; τ – час.

Зазначені рівняння вирішуються спільно з граничними умовами, які в пакеті «ELCUT» відповідають стандартним. Для цілей моделювання теплового стану ковша використовували умову Діріхле – температуру на поверхні матеріалу, яка може бути задана як числом, так і формулою, що описує залежність температури від координат і часу, якщо задання є нестационарним.

Матеріал, що моделюють, характеризується теплопровідністю, яка може бути задана як одним числом, так і парою чисел щодо різних осей, а також теплоємністю та потужністю об'ємних джерел теплоти. Можна також реалізувати функціональні залежності зазначених параметрів від температури у вигляді формул або таблиць. Для останнього разу в проміжках між таблично заданими значеннями функціональна залежність інтерполюється кубічним сплайном.

Таблиця 1 – Структура футеровки сталерозливного ковша і теплофізичні властивості її матеріалів

Матеріал	Товщина, мм		Число шарів		Щільність, кг/м ³	Теплоємність, Дж/(кг·К)	Теплопровідність, Вт/(м·К)
	стінка	днище	стінка	днище			
Корунд	150	150	6	8	3000	$790 + 0,42 T$	$2,10 + 1,90 \cdot 10^{-3} T$
Мулiт	65	65	4	4	2600	$840 + 0,25 T$	$1,39 + 6,10 \cdot 10^{-4} T$
Шамот	32	–	2	–	2000	$880 + 0,23 T$	$0,69 + 3,14 \cdot 10^{-4} T$
АССБ	–	85	–	6	1400	$840 + 0,20 T$	$0,48 + 1,40 \cdot 10^{-4} T$
Сталь	20	28	1	1	7800	500	33,1

Примітка: T – температура матеріалу

Геометрична модель сталерозливного ковша являє собою усічений циліндр із плоским днищем. З метою спрощення геометрії моделі вирішено скоротити кількість шарів футеровки до двох, де першим, внутрішнім шаром є корунд, а другим шаром – комбінація інших матеріалів (муліту, ша-

Геометрична модель в пакеті «ELCUT» містить різні геометричні об'єкти та встановлює зв'язки між ними і властивостями матеріалів, джерелами елами поля й граничними умовами. Основними типами геометричних об'єктів, з яких будують модель у системі «ELCUT», є вершина, ребро та блок. Вершина є точкою на площині, координати якої введено користувачем або обчислено автоматично як результат перетину ребер. Для кожної вершини можна задати крок дискретизації та мітку. Величина кроку дискретизації задає приблизну відстань між сусідніми вузлами сітки кінцевих елементів поблизу даної вершини. Ребро є відрізком прямої або дуги кола, що по'єднує дві вершини, блок є просторовою областю, безперервна межа якої утворена ребрами. Сітку кінцевих елементів створюють у кожному блоці автоматично або з урахуванням кроку дискретизації, заданого в окремих вершинах.

Для моделювання розігрівання обрали 120-тонний набивний сталерозливний кiвш. Для розрахунків процесу нестационарного теплообміну під час нагрівання ковша використовують такі вихідні дані: геометричні розміри ковша (внутрішній діаметр – 3,00 м, висота – 3,70 м, його конусність – 0,06); товщину шарів і теплофізичні властивості матеріалів футеровки; температуру внутрішньої поверхні футеровки, а також параметри конвективного тепловіддавання у довкілля.

Стінки та днище набивного ковша складаються з декількох шарів різних матеріалів: стінки – з хромомагнетитового (корунда), мулітового, шамотного вогнетирів та сталевих кожуха. У днищі ковша замість шамотного вогнетриву використовують алюмосилікатний самотвердіючий бетон (АССБ). Структура футеровки ковша, а також теплофізичні властивості її компонентів у функції температури наведено у табл. 1.

моту та сталевих кожуха) з наведеними значеннями їх властивостей.

Значення теплоємності C_2 та щільності ρ_2 другого (комбінованого) шару футеровки розраховують за формулами:

$$C_2 = \sum \frac{C_i \cdot \rho_i \cdot \delta_i}{\delta_2}; \quad (2)$$

$$\rho_2 = \sum \frac{\rho_i \cdot \delta_i}{\delta_2}, \quad (3)$$

де C_i , ρ_i , δ_i – теплоємність, щільність і товщина шарів муліту, шамоту та сталевих кожуха відповідно; δ_2 – товщина комбінованого шару (сума товщин муліту, шамоту і сталевих кожуха), прийнята такою, що дорівнює $\delta_2 = 117$ мм.

З умови збереження величини термічного опору зазначених шарів значення теплопровідності λ_2 другого (комбінованого) шару футеровки стінки ковша знаходили як

$$\lambda_2 = \frac{\delta_2}{\sum \delta_i / \lambda_i}, \quad (4)$$

де λ_i – теплопровідність відповідних шарів футеровки.

Для днища значення зазначених характеристик розраховують аналогічно за властивостями муліту, АССБ і кожуха. При цьому товщина другого (комбінованого) шару футеровки дорівнює сумі товщин муліту, АССБ і кожуха та становить 178 мм.

На рис. 1 зображено геометричну модель сталерозливного ковша. Щільність сітки кінцевих елементів підібрано як результат дослідження точності одержаних результатів залежно від цього параметра моделювання. У підсумку вона прийнята такою, що дорівнює 0,01 м, яка забезпечує похибку визначення температури не більше ніж 1 °С.

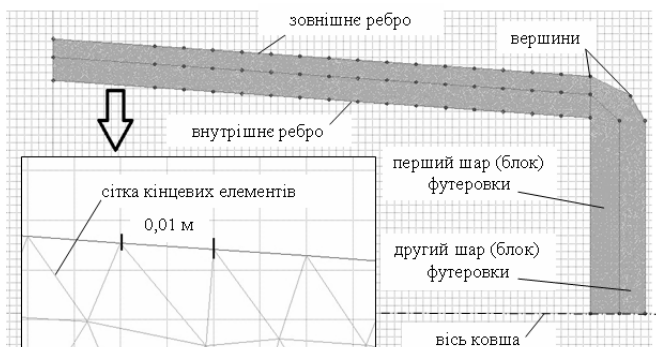


Рисунок 1 – Геометрична модель ковша у системі «ELCUT»

Запропонована модель нагрівання ковша [5-8] полягає в тому, що на внутрішній поверхні (ребрі) футеровки задають раціональний температурний графік сушіння та високотемпературного розігрівання ковша, який задано постачальником вогнетривких матеріалів [9], та складається з двох етапів:

– лінійне зростання температури протягом восьми годин до значення 650 °С з подальшою витримкою за цієї температури на протязі чотирьох годин;

– лінійне зростання температури протягом восьми годин до значення 1100 °С з подальшою витримкою за цієї температури на протязі чотирьох годин.

Моделювання нестационарного нагрівання стінки та днища ковша здійснювали з урахуванням початкового поля температур шарів футеровки ($T = 30$ °С = idem). Від зовнішньої поверхні ковша у довкілля, що має постійну температуру 30 °С, теплота відводиться конвекцією. Згідно з виконаними розрахунками прийнято значення коефіцієнта тепловіддавання 25 Вт/(м²·К).

Як результат моделювання, на рис. 2 подано температурне поле футеровки ковша після його розігрівання протягом 12 годин (а) і наприкінці розігрівання протягом ще 12 годин (б).

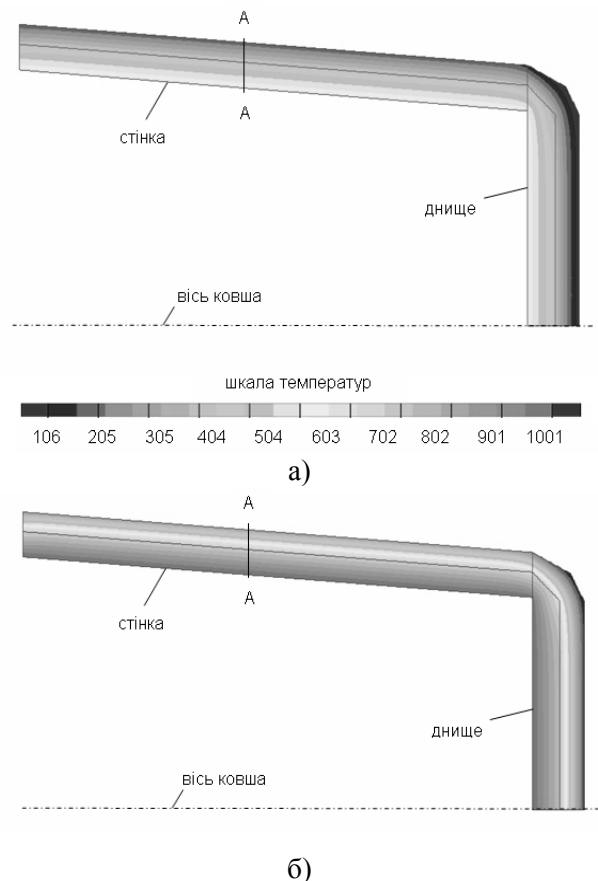


Рисунок 2 – Температурне поле футеровки ковша через 12 (а) та 24 години (б) його розігрівання

На рис. 3,а зображено розподіл температури за товщиною футеровки стінки (у перерізі А-А) через 12 годин (а, крива 1) і через 24 години (б, крива 2) його нагрівання, на рис. 3, б – розподіл температури щодо осі днища ковша за аналогічні періоди.

Висновки. На підставі аналізу конструкції й технології розігрівання сталерозливних ковшів розроблено математичну модель, яку реалізовано в програмному пакеті «ELCUT», що призначений для вирішення нестационарних теплофізичних задач

методом кінцевих елементів для промислових об'єктів складної форми.

Як результат моделювання одержано розподіл температури за шарами футеровки за різний час

підготовки ковша. Створену комп'ютерну модель можна використовувати в якості прогнозуючої під час розробки АСУ підготовкою ковшів.

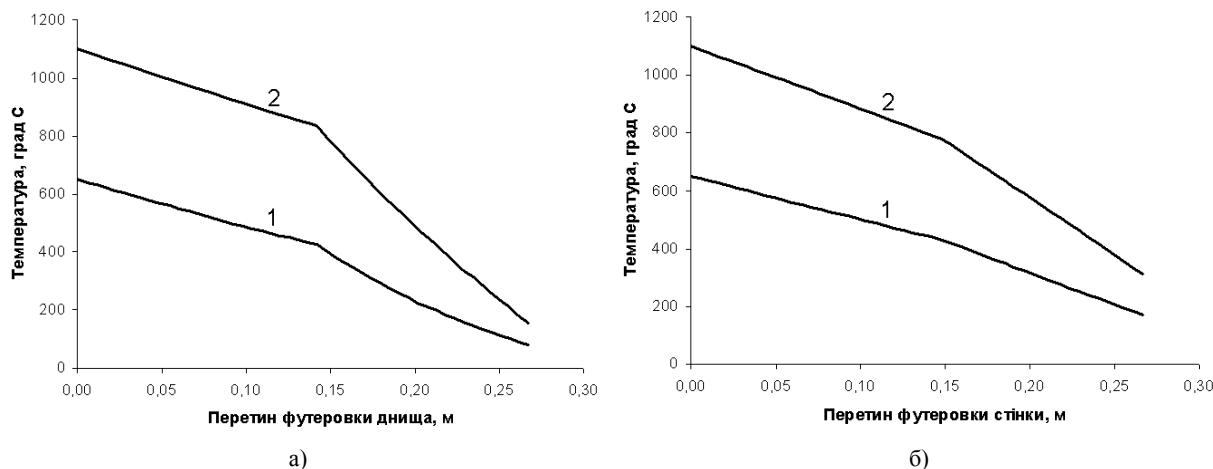


Рисунок 3 – Розподіл температури футеровки стінки розігрітого ковша в перерізі А–А (а) та футеровки днища по осі розігрітого ковша (б): 1 - через 12 год.; 2 - через 24 год.

Висновки. Розроблена модель теплового стану футеровки корисна не тільки для вибирання оптимальних режимів розігрівання, але й для оцінки

технічних вирішень під час вдосконалення конструкції ковшів та інших металургійних агрегатів.

Бібліографічний список

1. **Вихлевщук, В. А.** Ковшешая доводка стали [Текст] / В. А. Вихлевщук, В. С. Харахулах, С. С. Бродский. – Днепропетровск : Системные технологии, 2000. – 190 с. – Библиогр.: с. 171-187. – 300 экз. – ISBN 966-7316-37-8.
2. **Огурцов, А. П.** Производство стали от старта до финиша. Сталеразливочный ковш и внепечные технологии [Текст] / А. П. Огурцов. – Днепропетровск : ДГТУ, 2011. – Т. 2. – 275 с. – Библиография приведена в конце каждого раздела. – 300 экз. – ISBN 978-966-00-1189-2.
3. **Спирин, В. А.** Система управления станом сушки и высокотемпературного разогрева сталеразливочных ковшей [Текст] / В. А. Спирин, В. В. Чистяков, А. С. Бельков и др. // Современные технологии автоматизации. – 2000. – № 3. – С. 66-71. – Библиогр.: с. 71.
4. **Дубицкий, С. Д.** ELCUT 5.1 – платформа разработки приложений анализа полей [Текст] / С. Д. Дубицкий // Eхронтента Pro. Математика в приложениях. – 2004. – № 5. – С. 20-26. – Библиогр.: с. 26.
5. **Бейцун, С. В.** Исследование теплового состояния сталеразливочных ковшей на компьютерной модели [Текст] / С. В. Бейцун, Н. В. Михайловский, В. И. Шibaкинский // Черные металлы. – 2014. – № 8. – С. 23-27. – Библиогр.: с. 27.
6. **Бейцун, С. В.** Тепловое состояние ковшей при внепечной обработке стали [Текст] / С. В. Бейцун, Н. В. Михайловский, В. И. Шibaкинский // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2013. – № 4. – С. 104-107. – Библиогр.: с. 107.
7. **Бейцун, С. В.** Моделирование теплового состояния сталеразливочных ковшей [Текст] / С. В. Бейцун, Н. В. Михайловский // Металлургическая теплотехника : сборник научных трудов Национальной металлургической академии Украины. – Вып. 4 (19). – Днепропетровск : Новая идеология, 2012. – С. 3-8. – Библиогр.: с. 8.
8. **Бейцун С. В.** ELCUT-модель теплового состояния расплава в ковше [Текст] / С. В. Бейцун, Н. В. Михайловский, С. И. Демин // Праці XVII міжнар. конф. «Теплотехніка та енергетика в металургії», 7-9 жовтня 2014. – Дніпропетровськ : НМетАУ. 2014. – Днепропетровск : Новая идеология. – С. 15-16. – Библиогр.: с. 16.
9. **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 10.06.2014 р.
Рецензент, проф. О.Ю. Потап