

УДК 669.184

М. В. Михайловський, к.т.н., доцент, ORCID 0000-0002-9960-6189**В. І. Шибакінський**, к.т.н., доцент, ORCID 0000-0002-9961-3457**С. В. Бейцун**, к. т. н., доцент*Український державний університет науки і технологій*

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕРМІЧНОЇ ПІДГОТОВКИ КОВШІВ

Анотація. Метою роботи є розробка комп'ютерної моделі нагрівання ковша відкритим факелом на установці сушіння та високотемпературного розігріву для управління процесом термічної підготовки. Завдання управління установками сушіння та високотемпературного розігріву ковшів (УСВР) полягає у реалізації режимів їх роботи, що забезпечують отримання заданого температурного профілю шарів футерування сталерозливних при мінімальній витраті палива. Оскільки сучасні технічні засоби контролю не дозволяють отримувати релевантну інформацію про температурне поле футерування стінок і днища ковша, необхідно було створити прогнозуючу модель його розігріву відкритим факелом на УСВР. Як об'єкт дослідження обрано 68-тонний набивний сталерозливний ківш КС-68. За даними дослідження в ККЦ ПрАТ «Євраз – Дніпровський металургійний завод» здійснена оцінка форми та розмірів відкритого факела. Цифровою фотокамерою фіксувався факел на виході пальника УСВР при витраті природного газу 50 м³/год, що відповідає штатному режиму сушіння та розігріву ковша. Для цілей моделювання отримана форма факела апроксимувалась двома усіченими конусами. Визначення параметрів конвективно-променистого теплообміну в системі «факел – кришка – стінка – днище ковша» проводилося з урахуванням температури факела, теплофізичних властивостей матеріалів футерування, а також коефіцієнтів опроміненості та ступеня чорноти поверхонь. Розрахунок температурного поля у футеруванні стінки та днища ковша проводився методом кінцевих елементів, реалізованим у пакеті ANSYS. На підставі моделювання отримано зміну температурного поля футерування ковша в ході його нагрівання на УСВР відкритим факелом протягом 6-ти годин, що відповідає чинній технології. Аналіз отриманої в результаті моделювання динаміки температурного поля футерування ковша свідчить про те, що при його нагріванні відкритим факелом на установці сушіння та високотемпературного розігріву не виникають термічні напруги, небезпечні з точки зору утворення тріщин у шарах вогнетривких матеріалів. Максимальний градієнт температури у стінці становить 10 °С/мм, а в днищі – 6 °С/мм. Встановлено, що робоча поверхня футерування прогривається достатньо для уникнення термоудару при випуску сталі в ківш. Результати дослідження можуть бути корисними для оптимізації процесу термічної підготовки сталерозливних ковшів.

Ключові слова: сталерозливний ківш, розігрів шарів футерування, відкритий факел, комп'ютерна модель.

Посилання для цитування: Михайловський М. В., Шибакінський В. І., Бейцун С. В. Дослідження термічної підготовки ковшів. *Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії*. 2022. Вип. 36. С. 218-225. DOI: 10.52150/2522-9117-2022-36-218-225.

*"Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії". 2022. Випуск 36
"Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy". 2022. Collection 36*

Вступ. Термічна підготовка сталерозливних ковшів здійснюється на установках сушіння та високотемпературного розігріву (УСВР). Температурні та часові характеристики розігріву встановлюються на основі експериментальних даних для певного типу футерування залежно від його фізичних властивостей. Витрата палива, в якості якого, як правило, використовується природний газ, залежить від конструкції установки та зовнішніх умов [1]. Розігрів робочого шару сталерозливних ковшів ведеться відкритим факелом [2].

Завдання управління процесом розігріву ковша полягає у виборі та підтримці такого режиму роботи установки, який забезпечує отримання заданого температурного профілю шарів футерування при мінімальній витраті палива. Для обґрунтованого вибору режимів термічної підготовки ковшів потрібна релевантна інформація про тепловий стан ковша. Однак сучасні технічні засоби контролю не дозволяють забезпечити моніторинг температурних полів шарів футерування стінок і днища ковшів під час їхнього розігріву на УСВР. Тому є потреба у створенні прогнозуючої моделі розігріву сталерозливного ковша відкритим факелом.

Постановка задачі. Розробити комп'ютерну модель нагрівання ковша відкритим факелом на установці сушіння та високотемпературного розігріву для управління процесом термічної підготовки.

Вихідні дані для моделювання. В якості об'єкта дослідження обрано 68-тонний набивний сталерозливний ківш КС-68. Для розрахунків процесу нестационарного теплообміну під час нагрівання ковша використано такі вихідні дані: геометричні розміри ковша: верхній внутрішній діаметр 2,475 м, висота 3,37 м, конусність 0,166; товщина шарів та теплофізичні властивості матеріалів футерування (з урахуванням їх залежності від температури); температура внутрішньої поверхні футерування, а також параметри променистого та конвективного теплообміну.

Стінки та днище набивного ковша складаються з декількох шарів різних матеріалів. Стінки ковша виготовлені з формувальної суміші, що містить пісок з глинистою складовою 10...12 %, шамотної цегли і сталевого кожуха. Днище ковша складається із шамотної цегли, жароміцного бетону та сталевого кожуха. Товщина всіх шарів матеріалів, крім бетону, у перерізі постійна. Через опуклість днища ковша товщина шару бетону по його осі становить 0,225 м, а до країв сходять нанівець. Структура футерування ковша, а також теплофізичні властивості її компонентів у залежності від температури [3] наведені в таблиці 1.

У ході розігріву на УСВР ківш накривається теплоізоляційною кришкою зовнішнім діаметром 3,19 м і товщиною 0,18 м, яка теж бере участь у теплообміні. Кришка складається з жароміцного бетону завтовшки 0,05 м, муліто-корундової вати завтовшки 0,09 м і сталевому корпусу завтовшки 0,03 м. Шари бетону та вати розділені сталевими ґратами товщиною 0,01 м. Теплофізичні властивості муліто-корундової вати: щільність 130 кг/м³,

теплоємність 1036 Дж/(кг·К), теплопровідність 0,16 Вт/(м·К).

Таблиця 1 – Структура футерування сталерозливного ковша та теплофізичні властивості її матеріалів (t – температура матеріалу).

Матеріал	Товщина, м		Щільність кг/м ³	Теплоємність, Дж/(кг·К)	Теплопровідність, Вт/(м·К)
	стінка	днище			
Формовочна суміш	0,16	–	1650	840 + 0,053 t	0,35 + 1,94·10 ⁻⁴ t
Шамот	0,065	0,12	2000	880 + 0,23 t	0,69 + 3,14·10 ⁻⁴ t
Жароміцний бетон	–	0,225	1400	840 + 0,20 t	0,48 + 1,40·10 ⁻⁴ t
Сталь	0,02	0,02	7800	462 + 0,17 t	52,0 – 0,020 t

Оцінка форми та розмірів відкритого факелу проводилася за даними промислового експерименту на УСВР сталерозливних ковшів киснево-конвертерного цеху ПАТ «Євраз – Дніпровський металургійний завод». Цифровою фотокамерою фіксувався факел на виході пальника при витраті природного газу 50 м³/год, що відповідає застосовуваному режиму сушіння і розігріву ковша. З урахуванням масштабу знімка та кута зйомки отримані такі розміри факелу: діаметр 0,41 м, довжина 1,46 мм. Для моделювання форма факела апроксимована двома конусами об'ємом $V_1 = 0,1$ м³ та загальною випромінюючою поверхнею $F_1 = 1,30$ м².

Факел із випромінюючою поверхнею F_1 бере участь у теплообміні з трьома внутрішніми поверхнями: стінки ковша F_2 , його днища F_3 та теплоізолюючої кришки F_4 .

Променистий тепловий потік від i -поверхні до j -поверхні визначається формулою [3]:

$$q_r = \varphi_{i,j} \cdot \varepsilon_{i,j} \cdot c_0 (T_i^4 - T_j^4), \text{ Вт/м}^2 \quad (1)$$

де $\varphi_{i,j}$ – коефіцієнт опроміненості; $\varepsilon_{i,j}$ – наведений ступінь чорноти, $\varepsilon_{i,j} = (1/\varepsilon_i + 1/\varepsilon_j - 1)^{-1}$; $c_0 = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴) – $\varepsilon_{1,2} = (1/\varepsilon_1 + 1/\varepsilon_2 - 1)^{-1}$ коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла, T_i, T_j – абсолютна температура відповідних поверхонь.

Відповідно до властивості замикання променистих теплових потоків [3], коефіцієнти опроміненості визначаються як:

$$\varphi_{1,2} = \frac{F_1 + F_2}{F_2 + F_3 + F_4}; \quad \varphi_{1,3} = \frac{F_1 + F_3}{F_2 + F_3 + F_4}; \quad \varphi_{1,4} = \frac{F_1 + F_4}{F_2 + F_3 + F_4}. \quad (2)$$

З урахуванням величини площ поверхонь, що приймають участь у променистому теплообміні – $F_1 = 1,3$ м²; $F_2 = 21,09$ м²; $F_3 = 3,07$ м²; $F_4 = 4,78$ м², і наведеного в [4] ступеня чорноти факела 0,5 отримані усереднені по відповідних поверхнях променисті теплові потоки при температурі факела $T_1 = 1400$ °С (таблиця 2).

Таблиця 2. Характеристики променистої тепловіддачі від факела.

Поверхня (матеріал)	Коефіцієнт опроміненості поверхні	Ступінь чорноти	Променистий тепловий потік, кВт/м ²	
			на початку нагріву	у кінці нагріву
Стінка (формовочна суміш)	0,774	0,80	150	122
Днище (шамот)	0,151	0,75	28	23
Кришка (жароміцний бетон)	0,210	0,90	43	34

Властивості продуктів згоряння при визначальній температурі $t_{PC} = 1200$ °C [5]: $\lambda_{PC} = 0,1262$ Вт/(м·К); коефіцієнт об'ємного розширення $\beta_{PC} = 0,679 \cdot 10^{-3}$ К⁻¹; кінематична в'язкість $\nu_{PC} = 2,210 \cdot 10^{-4}$ м²/с; коефіцієнт температуропровідності $a_{PC} = 3,924 \cdot 10^{-4}$ м²/с. В результаті розрахунку за методикою [6] отримано величину коефіцієнта конвективної тепловіддачі від продуктів згоряння до внутрішньої поверхні футерування ковша $\alpha_{PC} = 7,16$ Вт/(м²·К).

Властивості навколишнього середовища (повітря) при визначальній температурі $t_B = 30$ °C [5]: теплопровідність $\lambda_B = 0,0267$ Вт/(м·К); коефіцієнт об'ємного розширення $\beta_B = 3,30 \cdot 10^{-3}$ К⁻¹; кінематична в'язкість $\nu_B = 0,160 \cdot 10^{-4}$ м²/с; коефіцієнт температуропровідності $a_B = 0,229 \cdot 10^{-4}$ м²/с. В результаті розрахунку за методикою [6] отримано величину коефіцієнта конвективної тепловіддачі від кожуха ковша в навколишнє середовище $\alpha_B = 1,17$ Вт/(м²·К).

Послідовність моделювання. Для моделювання процесу розігріву сталерозливних ковшів було використано метод кінцевих елементів, що дозволяє чисельно вирішувати широкий спектр фізичних завдань. Математична модель містить рівняння у часткових похідних, теплофізичні властивості матеріалів, початкові та граничні умови. Комп'ютерна модель реалізована у пакеті ANSYS (рис. 1).

Результати моделювання. В результаті моделювання отримано розподіл температури за товщиною футерування ковша при його нагріванні на УСВР відкритим факелом протягом 6-ти годин, що відповідає застосовуваній технології.

Розподіл температури по товщині футерування стінки (1) і днища (2) ковша представлено на рис. 2. Розподіл температури на внутрішній поверхні футерування по висоті стінки ковша після закінчення його нагрівання представлено на рис. 3. Розподіл температури на внутрішній поверхні футерування по радіусу днища ковша після закінчення його нагрівання представлено на рис. 4.

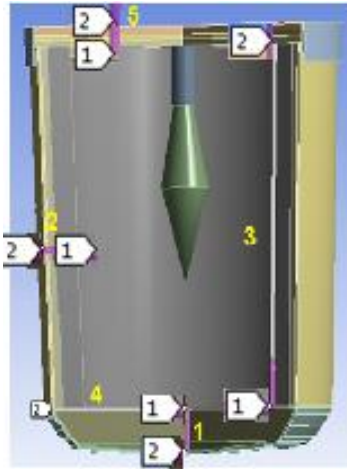


Рисунок 1 – Тривимірна модель нагрівання ковша факелом на УСВР.
 Профіль температури футерування: 1 – по осі днища; 2 – по товщині стінки; 3 – по висоті робочого шару стінки; 4 – по радіусу робочого шару днища; 5 – по товщині кришки
 (1 – початок; 2 – закінчення).

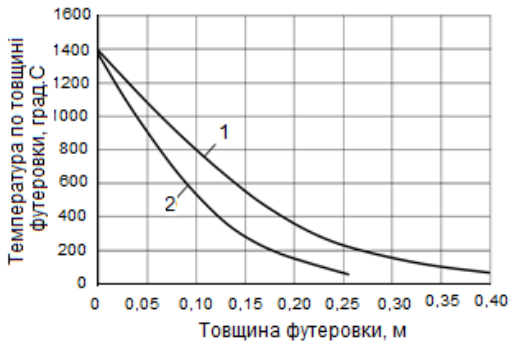


Рисунок 2 – Розподіл температури по товщині футерування ковша при його нагріванні на УСВР відкритим факелом.

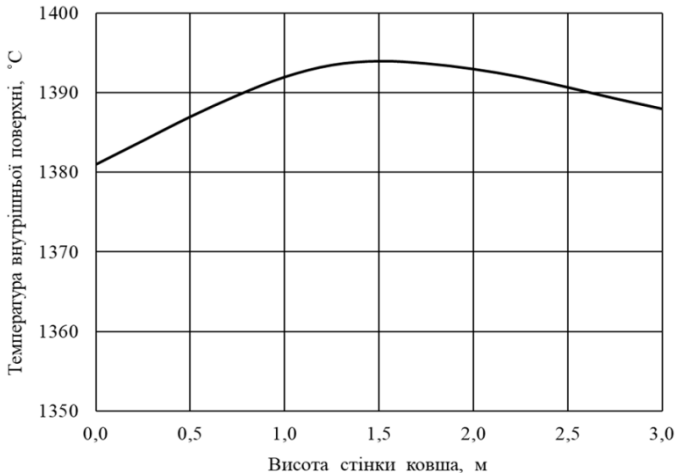


Рисунок 3 – Розподіл температури на внутрішній поверхні футерування по висоті стінки ковша після закінчення його нагрівання.

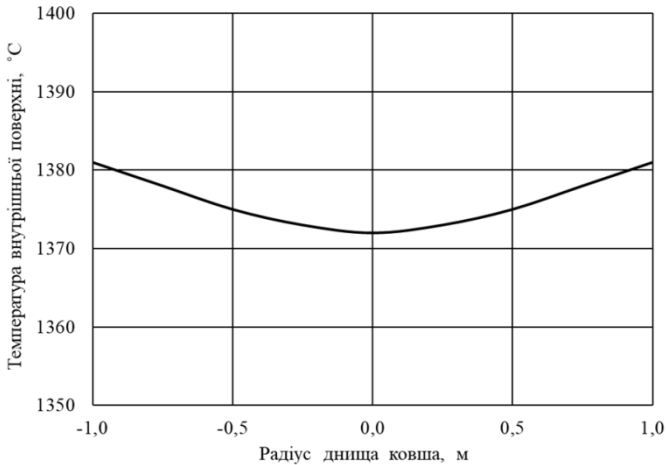


Рисунок 4 – Розподіл температури на внутрішній поверхні футерування по радіусу днища ковша після закінчення його нагрівання.

Результати моделювання свідчать, що внутрішня поверхня футерування стінки за вказаний час прогривається до 1382 °C...1394 °C, а днища – до 1373 °C...1382 °C, що цілком достатньо для запобігання термоудару при випуску сталі в ківш. При цьому максимальна температура кожуха ковша сягає всього 65 °C.

Висновки

На підставі моделювання отримано зміну температурного поля футерування ковша під час його нагрівання на УСВР. Встановлено, що робоча поверхня футерування прогривається достатньо для уникнення термоудару при випуску сталі в ківш. Результати дослідження можуть бути корисними для оптимізації процесу термічної підготовки сталеразливних ковшів.

Перелік посилань

1. Огурцов А. П. Производство стали от старта до финиша. Сталеразливочный ковш и выпечные технологии. Том 2. Днепродзержинск : ДГТУ, 2011. 275 с.
2. Казачков Е. А., Исайчикова С. Г. Исследование тепловых потерь в 350-т сталеразливочном ковше. *Вестник ПГТУ*. Мариуполь : ПГТУ, 2000. № 9. С. 27-33.
3. Исаченко В. П., Осипова В. А., Сукомел А. С. Теплопередача. М. : Энергоиздат, 1981. 417 с.
4. Губинский В. И. Металлургические печи : учеб. пособие. Днепропетровск : НМетАУ, 2006. 85 с.
5. Михеев М. А., Михеева И. М. Основы теплопередачи : учебник для вузов. М. : Энергия, 1977. 344 с.

6. Цаплин А. И. Теплофизика в металлургии: учеб. пособие. А. И. Цаплин. Пермь : ПГТУ, 2008. 230 с.
7. Ошовская Е. В., Салмаш И. Н., Фоменко Д. А. Моделирование работы футеровки сталеразливочного ковша с переменной тепловой нагрузкой. *Наукові праці ДонНТУ : Металургія*. 2011. Вип. 13 (194). С. 198-210.

References

1. Ogurtsov A. P. Proizvodstvo stali ot starta do finisha. Stalerazlivochnyi kovsh i vnepechnye tekhnologii. Tom 2. Dneprodzerzhinsk : DGTU, 2011. 275 p.
2. Kazachkov E. A., Isaichikova S. G. Issledovanie teplovykh poter v 350-t stalerazlivochnom kovshe. *Vestnik PGTU*. Mariupol : PGTU, 2000. No. 9. P. 27-33.
3. Isachenko V. P., Osipova V. A., Sukomel A. S. *Teploperedacha*. M. : Energoizdat, 1981. 417 p.
4. Gubinskii V. I. *Metallurgicheskie pechi* : ucheb. posobie. Dnepropetrovsk : NMetAU, 2006. 85 p.
5. Mikheev M. A., Mikheeva I. M. *Osnovy teploperedachi* : uchebnik dlia vuzov. M. : Energiia, 1977. 344 p.
6. Tsaplin A. I. *Teplofizika v metallurgii*: ucheb. posobie. A. I. Tsaplin. Perm : PGTU, 2008. 230 p.
7. Oshovskaia E. V., Salmash I. N., Fomenko D. A. Modelirovanie raboty futerovki stalerazlivochnogo kovsha s peremennoi teplovoi nagruzkoj. *Naukovi pratsi DonNTU : Metalurhiia*. 2011. Vol. 13 (194). P. 198-210.

N. V. Mikhailovskiy, Ph. D. (Tech.), Associate Professor, ORCID 0000-0002-9960-6189

V. I. Shibakinskiy, Ph. D. (Tech.), Associate Professor, ORCID 0000-0002-9961-3457

S. V. Beitsun, Ph. D. (Tech.), Associate Professor

Ukrainian State University of Science and Technologies

STUDY OF THERMAL PREPARATION OF LADES

Summary. The purpose of the work is to develop a computer model of ladle heating with an open torch on a drying and high-temperature heating installation to control the thermal preparation process. The task of managing ladle drying and high-temperature heating installations (USVR) is to implement their operating modes, which ensure obtaining the specified temperature profile of the lining layers of steel castings with minimal fuel consumption. The task of controlling by drying and high-temperature heating unit (SHHS) is to implement their operating modes that provide a given temperature profile of steel pouring ladle lining layers with minimal fuel consumption. Since modern technical means of control do not allow obtaining relevant information about the temperature field of the lining of the walls and bottom of the ladle, it is necessary to create a predictive model of its heating by an open torch at the SHHS. A 68-ton rammed steel-pouring ladle KC-68 was chosen as the object of study. According to the research data, the shape and dimensions of the open torch were evaluated at OCC PrJSC "Evraz- Dnipro Metallurgical Plant". A digital camera recorded the torch at the burner outlet at a natural gas flow rate of 50 m³/h, which corresponds to the standard mode of drying and warming up the ladle. For modeling purposes, the resulting torch shape was approximated by two truncated cones. Determination of the parameters of

convective-radiant heat transfer in the “torch – cover – wall – ladle bottom” system was carried out taking into account the temperature of the torch, the thermophysical properties of the lining materials, as well as the irradiance coefficients and the emissivity of the surfaces. The calculation of the temperature field in the lining of the wall and bottom of the ladle was carried out by the finite element method implemented in the ANSYS package. Based on the simulation, a change in the temperature field of the ladle lining was obtained during its heating at the SHHS with an open torch for 6 hours, which corresponds to the current technology. An analysis of the dynamics of the temperature field of the ladle lining obtained as a result of modeling indicates that when it is heated by an open torch at a drying and high-temperature heating unit, thermal stresses do not occur, which are dangerous from the point of view of cracking in the layers of refractory materials. The maximum temperature gradient in the wall is 10 °C/mm, and at the bottom – 6 °C/mm. It has been established that the working surface of the lining warms up sufficiently to avoid thermal shock when steel is poured into the ladle. The results of the research can be useful for optimizing the process of thermal preparing steel pouring ladles.

Key words: steel pouring ladle, heating of lining layers, open torch, computer model.

For citation: Mikhailovskiy N.V., Shibakinskiy V.I., Beitsun S. V. Doslidzhennia termichnoi pidgotovky kovshiv [Study of thermal preparation of lades]. *Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy*. Collection 36. 2022. P. 218-225. [In Ukrainian]. DOI: 10.52150/2522-9117-2022-36-218-225.

*Стаття надійшла до редакції збірника 22.11.2022 р.
Рекомендовано до друку редколегією збірника (Протокол № 5 від 20.12.2022 р.)*