

УДК 621

**Канд. техн. наук Ю. О. Герасимов, С. Є. Чижов,
канд. техн. наук С. В. Башлій, Р. Р. Матказіна**

Запорізька державна інженерна академія, м. Запоріжжя

ДОСЛІДЖЕННЯ І РОЗРОБКА МЕТОДИКИ ТЕПЛООВОГО РОЗРАХУНКУ СУШКИ РОЗЛИВНИХ КОВШІВ

Сформульовано і вирішено методом математичного моделювання зовнішню і внутрішню задачі теплообміну процесу сушки ковшів ємкістю 3 м³. Встановлено адекватність моделі фізичному процесу.

Ключові слова: сушка ковшів, методика термічного аналізу, температурний режим, організація процесу сушки.

Вступ

Процеси перенесення теплоти і маси речовини є одним з найважливіших розділів сучасної науки і мають велике практичне значення при розробці технологічних процесів в металургії.

Виготовлення ковшів для розливання феросплавів є основною ланкою технологічного процесу виробництва феросплавів.

Сушка ковшів, після їх виготовлення, найбільш тривалий процес і час її істотно залежить від тиску природного газу, що поступає на ділянку. Крім того, якість сушки визначає безпеку при використанні ковшів в подальших технологічних операціях.

У зв'язку з цим, важливим питанням є розробка методики теплового розрахунку сушки розливних ковшів з досягненням потрібної за технологією якості сушки.

Зважаючи на неможливість використання методів термічного аналізу в процесі сушки ковшів, основним методом при рішенні поставленої задачі є метод математичного моделювання, який включає зв'язок тиску природного газу, що поступає на сушку, утворення продуктів згорання, диференціальні рівняння перенесення теплоти і маси в стінках ковша.

Проведені дослідження дозволяють визначити час сушки залежно від тиску природного газу з урахуванням впливу технологічних параметрів сушки.

Розроблена математична модель може бути використана для прогнозування часу сушки залежно від тиску природного газу.

Характеристика об'єкту дослідження

Ковш, призначений для розливання феросплавів, є конструкцією: металевий каркас конусоподібної форми, з кутом конусності β , покритий обмазкою, що складається з водного розчину рідкого скла з наповнювачем.

Склад обмазки:

Мертель-ЗКМ-97 по ТУ14-8-92-79	2800–3000 кг
Рідке скло (Na_2SiO_2)	280–285 кг
Щільність $\rho = 1,12–1,15$ кг/м ³	
Шлак ферохрому	90–100 кг

Товщина обмазки складає δ_1 і δ_2 , відповідно. З огляду на те, що теплофізичні властивості обмазки в літературі не наводяться, рішення задачі проведимо в узагальнених координатах (у безрозмірній формі).

Розробка узагальненої розрахункової схеми

Усічений конус, з кутом конусності χ , що складається з металевої обшивки (ст. 3), завтовшки (10–14 мм) і залитий вогнетривкою сумішшю з теплофізичними властивостями λ_1 ; ρ_1 ; $c_{p1} = \text{const}$ і днища, виконаного, аналогічно, висотою H , піддається дії продуктів згорання природного газу, з теплофізичними властивостями λ_3 ; ρ_3 ; $c_{p3} = \text{const}$, з температурою $T_{\text{сер}1} = \text{const}$. Рух газового середовища вимушений і організований. Початкова температура вогнетривкої обмазки дорівнює $T_0 = \text{const}$. Початковий вологовміст $U_0 = \text{const}$. Параметри продуктів згорання відповідають тиску і температурі довкілля. Процеси теплообміну і перенесення маси мають осьову симетрію. Необхідно визначити кінцевий час сушки шару вогнетривкої обмазки. Згідно з формулюванням задачі прийнято узагальнену розрахункову схему. Виходячи з формулювання задачі і узагальненої розрахункової схеми, поставлену задачу можна розбити на ряд підзадач, внутрішньо зв'язаних між собою. Перша задача це прихід природного газу, з тиском $P = \text{const}$, і витратою $B = \text{const}$, до місця його спалювання (утворення продуктів згорання) з температурою $T_1 = \text{const}$ і організацією їх з коефіцієнтом теплообміну $\alpha_1 = \text{const}$.

Друга задача, власне сушка ковша.

Математичне формулювання внутрішньої задачі

Математичне формулювання задачі теплообміну і сушки здійснюватимемо при наступних допущеннях:

1. Процес сушки здійснюється лише у вогнетривкій обмазці.
2. Шар висушеного матеріалу можна розбити на дві зони:
 - парову;
 - вологу.
3. Теплофізичні властивості висушеного матеріалу не залежать від температури.
4. Процес сушки відбувається при $P = \text{const}$.
5. Процеси теплообміну і сушки мають осьову симетрію.

Тоді, згідно з узагальненою розрахунковою схемою і вищевикладеними допущеннями, задачу теплообміну і сушки можна описати наступними рівняннями [2]:

для дна і торця:

$$\frac{\partial \Theta}{\partial F_o} = \frac{1}{\xi} \cdot \frac{\partial \Theta}{\partial \xi} + \frac{\partial^2 \Theta}{\partial \xi^2} + \frac{\partial^2 \Theta}{\partial \eta^2} \quad (1)$$

Початкова умова:

$$\Theta(\xi, \eta, 0) = 0 \quad (2)$$

Граничні умови:

$$\left. \frac{\partial \Theta}{\partial \xi} \right|_{\xi=a} = \frac{1}{\xi} \cdot \frac{\partial \Theta}{\partial \xi} + \frac{\partial^2 \Theta}{\partial \xi^2} + \frac{\partial^2 \Theta}{\partial \eta^2},$$

$$\left. \frac{\partial \Theta}{\partial \xi} \right|_{\xi=a} - Bi_1 \cdot [\Theta_{cp1} - \Theta(a, \eta, F_o)] = K_o \cdot \frac{\partial E}{\partial F_o}, \quad (3)$$

$$\left. \frac{\partial \Theta}{\partial \eta} \right|_{\eta=b} - Bi_2 \cdot [\Theta_{cp2} - \Theta(\xi, b, F_o)] = K_o \cdot \frac{\partial E}{\partial F_o}, \quad (4)$$

$$\left. \frac{\partial \Theta}{\partial \xi} \right|_{\xi=0} = 0 \quad \Theta \neq \infty, \quad (5)$$

для бічної поверхні:

$$\frac{\partial \Theta}{\partial F_o} = \cos^2 \beta \left(\frac{1}{\xi} \cdot \frac{\partial \Theta}{\partial \xi} + \frac{\partial^2 \Theta}{\partial \xi^2} + \frac{\partial^2 \Theta}{\partial \eta^2} \right). \quad (6)$$

Початкова умова:

$$\Theta(\xi, \eta, 0) = 0 \quad (7)$$

Граничні умови:

$$\left. \frac{\partial \Theta}{\partial \eta} \right|_{\eta=0} - Bi_1 \cdot [\Theta_{cp1} - \Theta(\xi, c, F_o)] = K_o \cdot \frac{\partial E}{\partial F_o}, \quad (8)$$

$$\left. \frac{\partial \Theta}{\partial \xi} \right|_{\xi=0} = 0, \quad (9)$$

$$\left. \frac{\partial \Theta}{\partial \eta} \right|_{\eta=c} = 0. \quad (10)$$

Рішення сформульованої задачі здійснювалося за явною кінцево-різницевою схемою, згідно з [3]. Теплофізичні властивості вогнетривкої обмазки приймалися рівними для бетонів [4].

Розробка методики термічного аналізу процесу

Для встановлення адекватності математичної моделі фізичному процесу сушки було розроблено методику термічного аналізу. Як об'єкт дослідження було вибрано два ковші. Один був встановлений на стенді, а другий на відкритому майданчику. Виміри температур робилися стандартними термометрами градування ХА, а реєстрація — приладом КСП-4. Окрім температур стінки ковша вимірювалася температура факелу продуктів згорання в трьох точках по висоті ковша. Виміри проводилися при тиску газу на ділянці $P = 0,38 \text{ кг/см}^2$, температурі зовнішнього повітря $18 \text{ }^\circ\text{C}$, тиску повітря 758 мм рт. ст. , відотною вологістю $\phi = 87\%$. Результати вимірів приведені в табл. 1.

Обробка результатів спостережень

З приведених даних у таблиці 1, слід зазначити, що свідчення термометри №8, істотно відрізняються від всіх інших. Обстеження місця установки показало, що термометр реєструвала температуру димових газів поблизу стінки ковша (наскрізний отвір у футеруванні). Свідчення термометри №9, можна трактувати як період нагріву футерування з двох сторін, з торця і бічної поверхні, що свідчить про складність процесу тепло- і масообміну на кутах ковша. При досягненні часу нагріву $\tau = 0,6 \text{ год.}$ показання термометри №8 досягають значення температури мокрого термометра за даних умов. Це свідчить про те, що відбувається конденсація пари води і доставка нової вологи з шарів футерування, що лежать нижче. У подальшому процесі нагріву ця температура починає зростати у зв'язку з видаленням частини вологи в довкілля.

Таблиця 1 – Результати виміру температур

τ , год	Термопары								
	1	2	3	4	7	8	9	10	
0,1	26	28	26	410 в факелі	26	91	26	910 на подині ковша	
0,2	26	28	26		26	93	84		
0,3	26	28	26		26	93	65		
0,4	26	28	26		26	93	65		
0,5	26	28	26		26	93	65		
0,6	26	28	26		26	130	26		
0,7	26	28	26		26	132	39		
0,8	26	28	26		26	182	39		
0,9	26	28	26		26	208	39		
1,0	26	28	26		26	208	42		
1,1	26	28	26	520 посередині ковша	26	220	42		
1,2	26	28	26		26	234	42		
1,3	26	32	26		26	240	42		
1,4	26	32	32		35	260	65		
1,5	26	36	32		35	260	65		
1,6	26	41	32		35	260	65		
1,7	26	42	39		35	260	65		
1,8	26	43	39		35	260	70		
1,9	26	44	39		35	260	70		
2,0	39	45	39		35	260	70		520 верх ковша

Таким чином, можна вважати, що процес сушки ковша №2 почався через 0,6 год. Показання термопар №№1, 7 свідчать про великі теплові втрати через подину ковша, тобто про слабку інтенсивність процесу сушки. Для ковша №1 процес сушки почався через 1,3 год. Відставання процесу сушки в ковші №1 можна пояснити наступним: температура продуктів згорання у факелі складає 410 °С; відстань від факела до подини складає приблизно 1 м, тобто подина нагрівається за рахунок променистого теплообміну, що для продуктів згорання природного газу є дуже малою величиною. Діаметр труби пальника в ковші №1 удвічі більше діаметру труби, що підводиться до ковша №2, отже, швидкість руху продуктів згорання мала, для організації нормального процесу сушки. Якщо за одиницю порівняння узяти витрату природного газу на ковш №2, то для досягнення часу сушки для ковша №1 необхідно витратити природного газу в 1,7 рази більше.

Установка адекватності математичної моделі фізичному процесу

Аналіз математичного формулювання задачі дозволив виділити параметри, які управляють процесом, але невідомі. Це коефіцієнт Шезі A_0 , коефіцієнт використання теплоти в ковші η , критерій теплообміну Bi_2 , еквівалентний діаметр d_e і т.д. Пошук цих коефіцієнтів здійснювався за допомогою математичної моделі. Критерієм адекватності були дані термічного аналізу і технологічний час сушки ковша. В результаті чисельного аналізу процесу тепло- і масообміну вдалося визначити найбільш вірогідні значення невідомих величин. Набуті значення приведені в табл. 2.

Аналіз отриманих результатів і розробка рекомендацій

Чисельний аналіз задачі тепло- і масообміну і результати термічного аналізу дозволили встановити адекватність математичної моделі фізичному процесу сушки.

За результатами чисельного аналізу процесу тепло- і масообміну отримані наступні дані (табл. 3).

Аналіз теплової роботи існуючого стенду показав незадовільну організацію процесу горіння, а звідси і найбільшу тривалість процесу сушки. Сушка ковшів на відкритому стенді йде інтенсивніше, але при цьому спостерігаються великі втрати теплоти з газами, що відходять.

При існуючій технології процес горіння і обтікання поверхонь ковша є неорганізованим і не піддається розрахунку. В результаті цього можуть спостерігатися місця з підвищеною вологістю.

Розрахунок теплообміну ковша, що стоїть в стенді з організованим горінням, дозволяє прогнозувати скорочення часу сушки ковша приблизно на 20%.

Висновки

1. Запропоновано методику теплового розрахунку процесу сушки наливного ковша, яка зв'язує тиск природного газу, що поступає на стенд, з його витратою на робочі місця і часом сушки.

2. Запропоновано організацію процесу сушки, що використовує існуюче устаткування.

3. Рекомендується створити пристрій пальника, що дозволить організувати теплообмін, що наближається до розрахункового.

4. Ввести в технологічну інструкцію контроль стінки ковша за допомогою переносної термопары і мілівольметра.

Таблица 2 – Вірогідні значення невідомих величин

K_o	Bi_2	A_o	$d_e, м$	η
0,95	5,0	10,0	0,5	0,5
			1,3	0,8

Таблица 3 – Результати чисельного аналізу

Тип ковша	$d_e, м$	A_o	Bi_1	Bi_2	$T_{сепл}, ^\circ C$	η	$\tau_f, ч$
Відкритий, з горінням, що організоване	0,5	10,0	18,3	5,0	900 520	0,5	48,1
Існуючий стенд	2,0	10,0	4,43	5,0	400 400	0,8	55,6
Пропонований стенд	0,5	10,0	23,2	5,0	900/900	0,8	44,3

Список літератури

1. Мхитарян А. М. Гидравлика и гидромеханика / Мхитарян А. М. – К. : ГИТТЛ УССР, 1958. – 352 с. с ил.
2. Лыков А. В. Теория тепло- и массопереноса / Лыков А. В., Михайлов Ю. А. – М.-Л. : Энергоиздат, 1963. – 536 с. с ил.
3. Крылов В. И. Вычислительные методы, в 2-х томах / Крылов В. И., Бобков В. В., Монастырный П. И. – М. : ФИЗМАТГиз, 1976. – 624 с. с ил.
4. Теплофизические свойства веществ. Справочник под ред. Н. Б. Варгафтика. – М. : Энергоиздат, 1956.

Поступила в редакцию 10.03.2017

Герасимов Ю.О., Чижов С.Е., Башлий С.В., Матказина Р.Р. Исследования и разработка методики теплового расчета сушки разливочных ковшей

Сформулирована и решена методом математического моделирования внешняя и внутренняя задачи теплообмена процесса сушки ковшей емкостью 3 м³. Установлена адекватность модели физическому процессу.

Ключевые слова: сушка ковшей, методика термического анализа, температурный режим, организация процесса сушки.

Gerasimov Yu., Chizhov S., Bashlyy S. Matkazyna R. Research-and-developments methodology of thermal calculation of drying of casting scoops

The external and internal tasks of heat exchange of process drying scoops content 3 м³ are formulated and decided by the method of mathematical design. The model adequacy is install to physical process.

Key words: drying of scoops, method of thermoanalysis, temperature condition, organization of process of drying.