

I. M. Maksimchuk, A. O. Khripliviy, V. G. Tkachenko, V. V. Frizel

Effect of the electro–hydro-pulse melt treatment on crystallization process and properties of Mg – Al – Ca – Mn – Ti magnesium alloy

Summary

By using the methods of thermal and DSC analyses it is established a homogeneous mechanism of crystallization of  $\alpha$ -Mg solid solution for Mg – Al – Ca – Mn – Ti magnesium alloy melt, subjected to hydro-electric-pulse treatment is established. The change of phase composition of the alloy correlates with changes in its hardness. The observed effect is the most likely to explain by a 7 times decrease in the volume fraction of  $Mg_{17}Al_{12}$  phase and 13 times decrease in the eutectic of components alloy as a result of  $\alpha$ -Mg solid solution supersaturation with the aluminium atoms.

УДК 669.162.21.001.573

*Температура чавуну та шлаку на випуску при роботі доменної печі на різному паливі*

І. В. Мішин,  
Ю. Л. Курбатов, кандидат технічних наук  
С. Л. Ярошевський, доктор технічних наук

Донецький національний технічний університет, Донецьк

*Запропоновано методику розрахунку температури чавуну і шлаку з урахуванням ступеня чорноти фурменної зони при роботі доменної печі на різному паливі.*

Відомо, що в доменних печах з різними технологічними параметрами (витрати коксу, режим дуття, видом сировини тощо) температура чавуну на випуску знаходиться в межах 1450 – 1500 °С, а шлаку – на 50 °С вище. Температура чавуну залежить від вмісту в ньому кремнію, основності шлаку (b), ступеня прямого відновлення заліза ( $r_d$ ) та інших параметрів.

Взаємозв'язок температури чавуну з технологічними параметрами печі вперше обґрунтував професор Б. І. Кітаєв, використовуючи рівняння теплообміну у нижній зоні доменної печі [1]:

$$t = \frac{W_g}{W_{ш}} \cdot (t_2 - t_0) + t_0 - \Delta t - \frac{Q_c + Q_u \cdot G_{шл} + a \cdot r_d \cdot \sum_{i=1}^n b_i \cdot X_i}{W_{ш}} \quad (1)$$

де  $W_g$  і  $W_{ш}$  – водяні еквіваленти потоку газу та чавуну і шлаку відповідно, Дж/(°С · кг);  $t_r$  – теоретична температура горіння коксу, °С;  $t_o$  – температура

газу на межі розділу резервної зони і нижньої ступені теплообміну, °С;  $\Delta t$  – різниця температури газу і матеріалу на межі розділу резервної зони і нижньої ступені теплообміну, °С;  $Q_c$  і  $Q_u$  – теплота плавлення чавуну і шлаку, Дж/кг чавуну;  $G_{шл}$  – вихід шлаку, кг/кг чавуну;  $a$  – добуток теплового ефекту реакції прямого відновлення заліза, Дж/кг чавуну;  $b_i$  – теплові ефекти реакцій відновлення кремнію, марганцю та інших елементів, Дж/кг;  $X_i$  – вміст у чавуні елементів, відновлюваних прямим шляхом, %.

У рівнянні (1) не враховано теплообмін випромінюванням в фурменій зоні при горінні коксу, пиловугільного палива (ПВП) і природного газу (ПГ). Незважаючи на те, що фурмена високотемпературна зона займає тільки 1 % об'єму доменної печі, через неї проходить до 40 – 50 % рідких чавуну і шлаку, а інші 50 – 60 % – фільтруються через коксову насадку [2]. Тому на температуру нагріву чавуну може впливати випромінювання в фурменій зоні печі.

Температура чавуну і шлаку на випуску  $T_{\text{випуска}}$  складається з частки продуктів плавки  $\alpha$ , що надходять з фурменої зони з температурою  $T_2$  і частки продуктів плавки  $1 - \alpha$ , що стікають по коксовій насадці з температурою  $T_{\text{к. н.}}$ . Температура коксової насадки на рівні фурм в центрі печі постійна і дорівнює температурі  $T_1$  рідкого чавуну на вході в фурмену зону.

У виробничих умовах усереднена температура чавуну і шлаку на випуску може бути визначена за такою формулою:

$$T_{\text{випуска}} = \alpha \cdot T_2 + (1 - \alpha) \cdot T_{\text{к. н.}} \quad (2)$$

Температура продуктів плавки  $T_2$  складається з температури чавуну і шлаку  $T_1$  і температури перегріву їх випромінюванням  $\Delta T$  при проходженні зони фурм.

$$T_2 = \Delta T + T_1 \quad (3)$$

Температура  $T_1$  визначається з теплового балансу нижньої зони, межами якої є початок резервної зони і температура  $T_1$ . Температури шихти і газу в резервній зоні рівні і становлять  $\approx 900$  °С. Для знаходження температури  $T_1$  необхідно визначити температуру газів на виході з фурменої зони  $T_r$  і кількість тепла, що передається випромінюванням.

Температура  $T_r$  визначається з теплового балансу фурменої зони:

$$c_1 \cdot T_r = \frac{c_0 T \cdot V_{gr} \cdot (1 - Z_1) - Q_{\text{випромінювання}}}{V_{gr}} \quad (4)$$

де  $c_0$  – теплоємність горнових газів при температурі їх горіння  $T$ , кДж/м<sup>3</sup>;  $Z_1$  – теплові витрати в фурменій зоні;  $V_{gr}$  – вихід горнових газів, м<sup>3</sup>/т чавуну,  $Q_{\text{випромінювання}}$  – витрати тепла на випромінювання, кДж/т чавуну;  $c_1$  – теплоємність газів при температурі  $T_r$ , кДж · кг/°С.

Величина випромінювання в фурменій зоні визначається за законом Стефана-Больцмана [3]:

$$Q_{\text{випромінювання}} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot F \cdot n \cdot ((T + 273)^4 - (T_\phi + 273)^4) \quad (5)$$

де  $\varepsilon$  – ступінь чорноти фурменої зони;  $\sigma$  – стала Стефана-Больцмана,  $5,67 \cdot 10^{-8}$  Дж/ (с · м<sup>2</sup> · К<sup>4</sup>),  $F$  – площа поверхні фурменої зони, м<sup>2</sup>;  $n$  – кількість

фурм;  $T_{\phi}$  – температура поверхні фурменної зони, °С (приймається як температура коксу, що дійшов до фурм).

Найбільш складним для рішення рівняння (5) є визначення ступіня чорноти у фурменній зоні, через яку проходять рідкий чавун і шлак, відбувається горіння пиловугільного палива, природного газу, циркуляція і горіння коксу.

Ступінь чорноти такого запиленого потоку  $\varepsilon_2$  можна розрахувати за розробленою авторами методикою:

1. Вибирається вид палива, який бере участь у горінні – вугілля (тоще, газове, антрацит) та експериментальний коефіцієнт  $A$  для нього (табл.1).

Таблиця 1.  
Значення коефіцієнта  $A$  для різних видів вугілля [4].

Вид вугілля	Коефіцієнт $A$	
	Золовий пил	Вугільний пил
Тоще	0,12	-
Газове	0,15	0,06
Антрацит	0,1	0,14
Буре	0,15	-
Кокс	0,08	0,08

2. Визначається діаметр частинок золи палива  $d$ , мкм і питома вага пилу  $\gamma$ , г/м<sup>3</sup>.

3. Визначається температура запиленого газового потоку  $T_{\text{поток}}$ , °С.

4. Розраховується ефективний коефіцієнт ослаблення  $k_n$ .

$$k_n = 0,42 \cdot \frac{A}{\gamma} \cdot 273 \cdot \sqrt[3]{\frac{1}{T^2 \cdot d^2}} \quad (6)$$

5. Визначається щільність запиленого газового потоку  $\mu$ , г/м<sup>3</sup>

$$\mu = \frac{A^c \cdot G}{V_{22}} \quad (7)$$

де  $A^c$  – вміст золи у використовуваному паливі,  $G$  – витрата палива, кг/т чавуну.

6. Розраховується ступінь чорноти газового потоку  $\varepsilon_2$

$$\varepsilon_2 = k_n \cdot \mu \quad (8)$$

Ступінь чорноти поверхні в фурменній зоні печі розраховують за рівнянням

$$\varepsilon_{\text{поверхні}} = \frac{\varepsilon_{\text{чавун}} \cdot G_{\text{чавун}} + \varepsilon_{\text{шлак}} \cdot G_{\text{шлак}} + \varepsilon_{\text{кокс}} \cdot G_{\text{кокс}}}{G_{\text{чавун}} + G_{\text{шлак}} + G_{\text{кокс}}} \quad (9)$$

де  $G_{\text{чавун}}$ ,  $G_{\text{шлак}}$ ,  $G_{\text{кокс}}$  – витрати чавуну, шлаку, коксу, кг/т чавуну;  $\varepsilon_{\text{чавун}}$ ,  $\varepsilon_{\text{шлак}}$ ,  $\varepsilon_{\text{кокс}}$  – ступінь їхньої чорноти.

Ступінь чорноти фурменої зони визначають за формулою [5]

$$\varepsilon_{ф.з.} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_z} + \frac{1}{\varepsilon_{поверхні}} - 1} \quad (10)$$

Розрахований ступінь чорноти фурменої зони дозволяє визначити кількість тепла, що передається чавуну і шлаку випромінюванням, а також температуру горнових газів на при зниженні температури газів  $T_1$  на виході з фурменої зони до температури  $T_n$  змінює температуру нагріву шихти  $T_2$  в цій області:

$$Q = \frac{W_z}{W_{ш}} \cdot (T_1 - T_n) + T_n \quad (11)$$

Дане рівняння враховує витрати тепла через кладку печі, пряме відновлення заліза, витрати тепла на плавлення чавуну і шлаку дозволяє визначити рівень температури рідких чавуну, шлаку на вході в фурменну зону через водяні еквіваленти шихти і газу.

Розплавлені чавун і шлак, проходячи через фурменну зону, перегріваються випромінюванням на температуру  $\Delta t$ . При незначному теплообміні конвекцією перегрів продуктів плавки можна визначити за формулою:

$$\Delta t = \frac{Q_{випр}}{W_{шф.з.}} \quad (12)$$

де  $Q_{випр}$  – потужність випромінювання, кВт/с,  $W_{шф.з.}$  – водяний еквівалент шихти в фурменній зоні, який визначають за формулою:

$$W_{шф.з.} = G_{чав} \cdot (c_{чав} + c_{шл} \cdot G_{шл} + c_k \cdot K) \quad (13)$$

де  $G_{чав}$  – секундна витрата чавуну, кг/с,  $K$  – витрата коксу, кг/т чавуну,  $c_{чав}$ ,  $c_{шл}$ ,  $c_k$  – теплоємності чавуну, шлаку і коксу.

За створеною методикою розраховано температуру чавуну та шлаку на випуску для доменної печі об'ємом 1033 м<sup>3</sup>, виплавлених з використанням в шихті обкотишів ЛебГОК (вміст заліза 64 %, основність 0,5) на різному паливі: на коксі без додаткових видів палива (К), з вдуванням ПГ (К+ПГ), з вдуванням ПВП (К+ПГ + ПВП) та (К+ПВП) (табл. 2).

З табл. 2 видно, що ступінь чорноти фурменої зони суттєво змінюється при вдуванні різних видів палива. При роботі печі на коксі і природному газі фурмена зона є оптично прозорою ( $\varepsilon = 0,04 - 0,05$ ), при вдуванні ПВП  $\varepsilon$  збільшується до 0,44, а температура продуктів плавки зростає на 20 – 50 °С, за рахунок підвищеного перегріву їх у фурменній зоні.

Таким чином, розроблено методику визначення ступеня чорноти фурменої зони в доменній печі, за допомогою якої було показано, що найбільший ступінь чорноти і кількість тепла, що передається випромінюванням, досягається при вдуванні ПВП, найменший – при вдуванні природного газу та роботі доменної печі тільки на коксі. Найбільший перегрів 250 – 350 °С продуктів плавки в фурменній зоні відбувається при вдуванні пиловугільного палива, найменший 50 – 100 °С при використанні природного

## Плавлення і кристалізація

Таблиця 2

Температура продуктів плавки при роботі доменної печі на різних видах палива

Показники роботи доменної печі		Технологічні режими								
		К	К+ПГ			К+ПГ +ПВП	К+ПВП			
Об'єм печі, м <sup>3</sup>	$V_{печи}$	1033								
Діаметр горна, м	$D$	7,2								
Кількість фурм	$n$	16								
Продуктивність печі, т/добу	$П_{доб}$	1950	2185	2430	2314	2066	2192	2324	2468	2614
Витрата коксу, кг/т чавуну	$K$	609	553	508	501	553	499	447	396	347
Зола в коксі, %	$A^c$	10,5								
Витрата ПВП, кг/т чавуну	$G_{ПВП}$	0	0	0	50	50	100	150	200	250
Зола в ПВП, %	$A^{ПВП}$	10								
Витрата природного газу, м <sup>3</sup> /т чавуну	$G_{ПГ}$	0	50	100	50	0	0	0	0	0
Температура дуття, °С	$T_d$	1000								
Вологість дуття (частка)	$\phi$	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
Вміст кисню в дутті (частка)	$\omega$	0,228	0,228	0,23	0,228	0,23	0,23	0,23	0,23	0,228
Теоретична температура горіння, °С	$T_{теор}$	2197								
Ступінь прямого відновлення (частка)	$r_d$	0,50	0,40	0,32	0,37	0,46	0,42	0,39	0,36	0,33
Вихід горнових газів, м <sup>3</sup> /т чавуну	$V_{ze}$	1963	1776	1620	1688	1863	1764	1673	1582	1500
Ступінь чорноти фурменної зони	$\varepsilon_{ф.з.}$	0,04	0,05	0,05	0,15	0,17	0,21	0,29	0,35	0,44
Перегрів продуктів плавки, °С	$\Delta t$	23	22	20	140	140	224	295	340	378
Температура газів на виході з фурменної зони, °С	$T_2$	2012	2010	2011	1932	1937	1872	1813	1762	1717
Температура чавуну та шлаку на вході в фурмену зону, °С	$T_1$	1461	1460	1458	1416	1419	1382	1348	1316	1288
Температура продуктів плавки на випуску, °С	$T_{випуску}$	1472	1471	1468	1486	1490	1504	1514	1521	1524

газу. Температура чавуну і шлаку на випуску із печі при використанні пиловугільного палива в порівнянні з режимом вдування ПГ збільшується на 30 – 40 °С.

### Література

- Formosa A., Babich O., Gudenau H.W. Heat exchange in the hearth combined blast parameters. // ISIJ International. – 1999. – № 11. – Р. 1134 – 1139.
- Бабарькин Н.Н. Теория и технология доменного процесса. – Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2009. – 257 с.
- Кравцов В.В., Курбатов Ю.Л., Масс Н.С. Теплотехника металлургического производства. – Донецк: «Ноулидж», 2011. – 218 с.
- Боришанский В.М., Кутателадзе С.С. Справочник по теплопередаче. – М.: «Государственное энергетическое издательство», 1958. – 414 с.
- Курбатов Ю.Л., Масс М.С., Кравцов В.В. Гидрогазодинамика у теплотехніці. – Донецьк: «Норд-Пресс», 2009. – 234 с.

Одержано 27.09.12

И. В. Мишин, Ю. Л. Курбатов, С. Л. Ярошевский  
Температура чугуна и шлака на выпуске при работе  
доменной печи на разном топливе

Резюме

Предложена методика расчета температуры чугуна и шлака с учетом степени черноты фурменной зоны при работе доменной печи на разном топливе.

I. V. Mishyn, Yu. L. Kurbatov, S. L. Yaroshevsky  
Pig-iron and slag temperature on exhaustion at blast furnace  
operated with different fuel

Summary

It is offered the calculation procedure of pig-iron and slag temperature taking into account blackness degree of tuyere zone at blast furnace operation with different fuel.



## **КОНКУРС !**

**Шановні колеги !**

*Редакція журналу “Металознавство та обробка металів”*

*повідомляє про проведення*

***Всеукраїнського конкурсу на кращу науково-технічну статтю з металознавчої тематики***

*для опублікування в журналі*

*протягом 2013 – 2014 років.*

**Запрошуємо вас взяти участь у даному проекті.**

Статті повинні бути оформлені згідно вимог до публікацій в журналі.

Свої пропозиції та матеріали для участі в конкурсі просимо надсилати до редакції за адресою: бульвар Вернадського, 34/1, м. Київ-142, 03680, МСП, тел. для довідок: (044) 424-05-71, моб. тел. (050) 2129532, Олена Миколаївна Стоянова.

