

УДК 622.788.3:669.162.1

Ю.В. Мосейко ⁽¹⁾, доцент, к.п.н.

Ю.В. Куріс ⁽¹⁾, доцент, к.т.н.

С.О. Гаврилко ⁽¹⁾, професор, к.т.н.

Л.В. Воденнікова ⁽¹⁾, асистент

Ю.С. Гаврилко ⁽²⁾, інженер I-ої категорії

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ПЕРВИННИХ ДОМЕННИХ ШЛАКІВ

⁽¹⁾ Запорізька державна інженерна академія,

⁽²⁾ ВАТ «Металургійний комбінат «Запоріжсталь»

Представлены результаты исследований теплофизических характеристик первичных шлаков доменной плавки методом бесконтактного дифференциального термического анализа. Определены температура, теплосодержание и удельная теплоемкость первичных шлаков с содержанием FeO от 1,90 до 19,85 %.

Ключевые слова: доменная плавка, первичный шлак, температура, теплосодержание, удельная теплоемкость

Подано результати досліджень теплофізичних характеристик первинних шлаків доменного плавлення методом безконтактного диференційного термічного аналізу. Визначено температуру, тепломісткість і питому теплоємність первинних шлаків із вмістом FeO від 1,90 до 19,85 %.

Ключові слова: доменне плавлення, первинний шлак, температура, тепломісткість, питома теплоємність

Results of researchs of thermophysical descriptions for primary slags of the blast-furnace melting by method of noncontact differential thermoanalysis are brought. A temperature of melting, total heat and specific heat capacity of primary slags with content of FeO from 1,90 to 19,85 % is certain.

Keywords: blast-furnace melting, primary slag, temperature, total heat, specific heat capacity

Вступ. Первинний шлак доменної печі характеризується низькою температурою плавлення та підвищеним вмістом FeO . Кількість первинних шлаків та їх склад суттєво впливають на хід доменного процесу та витрату теплоти у зоні первинного шлакоутворення доменної печі.

Аналіз досягнень. Відомо, що деякі властивості шлаку (температуру плавлення, в'язкість) можна визначити за діаграмами стану багатоконпонентних систем. У роботі [1] для визначення складу шлаків, що утворюються на різних температурних горизонтах доменної печі, використовували систему $CaO-FeO-SiO_2$. Результати проведених досліджень підтверджують можливість застосування такої діаграми для визначення змінювання складу первинних шлаків. Так, на діаграмі $CaO-FeO-SiO_2$ (рис. 1) подано області, які характеризують змінювання складу первинних шлаків [1], при цьому область змінювання складу первинних шлаків передільного чавуну залежно від температури розташовується по лінії OB , а область змінювання складу первинних шлаків ливарного чавуну – по лінії OA .

У роботі [2] Ю.М. Потебня, вивчаючи процеси первинного шлакоутворення за

роботи доменної печі з використанням офлюсованого агломерату, встановив, що під час завантаження до печі «сирої» руди область змінювання складу первинних шлаків розташовується не по лінії *OB* (рис. 1), а по лінії *OA*. Це пов'язано з підвищенням основності зазначених шлаків. Для зіставлення синтетичних шлаків з реальними первинними шлаками на діаграмі *CaO-FeO-SiO₂* [2] (рис. 1, чорні точки) було нанесено дані, одержані за синтетичними шлаками (кружалки з цифрами). Як видно, спостерігається добре збігання складу синтетичних шлаків із реальними первинними, що дозволяє з незначною погрішністю використовувати для реальних первинних шлаків дані, які одержано під час вивчення синтетичних шлаків.

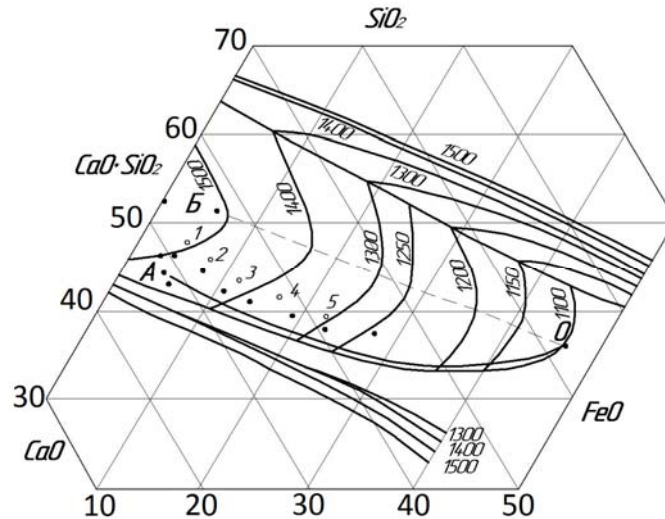


Рисунок 1 – Положення первинних шлаків розпару (чорні точки) та синтетичних шлаків (кружалки з цифрами) на діаграмі системи *CaO-FeO-SiO₂*

Постановка завдання. Метою виконаного дослідження є визначення значень температури та теплоти плавлення, а також питомої теплоємності первинних доменних шлаків, що є необхідними для складання зональних теплових балансів, які дозволяють оцінювати споживання теплоти у зоні первинного шлакоутворення доменних печей.

У зв'язку з тим, що вивчення реальних первинних шлаків доменної плавки не представляється можливим виконували експерименти щодо визначення теплофізичних характеристик синтетичних шлаків із різним вмістом *FeO*. Шлаки одержували шляхом сплавлення хімічно чистих сполук: *CaO*, *SiO₂*, *Al₂O₃* та *MgO*. Заданий вміст *FeO* в шлаку забезпечували шляхом сплавлення фаяліту (*2FeO·SiO₂*) та наступних додавань його необхідної кількості до розплаву. Було приготовано п'ять складів шлаку із вмістом *FeO* від 1,90 до 19,85 % (табл. 1).

Аналіз термограм нагрівання досліджених шлаків (рис. 2) вказує на наявність у них екзотермічного ефекту, що зміщується з підвищенням концентрації *FeO* на ділянку низьких температур. Так, для шлаку № 1 (1,90 % *FeO*) його початок зафіксовано за температури 935 °C, а для шлаку № 5 (19,85 % *FeO*) - за температури 765 °C. Для визначення можливості оборотності цих процесів шлаки № 2 і 3 піддавали триразовому нагріванню та охолодженню. Спостерігається зникнення екзотермічного ефекту за другим нагріванням кожного шлаку, що свідчить про необоротність досліджуваного процесу. Процеси, що протікають з виділенням теплоти під час нагрівання речовини, характеризуються віддачею надлишкової енергії за переходом із нерівноважного ста-

ну на рівноважний стан [3]. Одним з таких переходів служить кристалізація склоподібною маси. Так, силікати та борати характеризуються різко вираженою спроможністю до утворення скла із розплавів.

Таблиця 1 – Хімічний склад і результати дослідження синтетичних шлаків

Номер шлаку	Вміст, %							Температура плавлення, °С		Теплота плавлення шлаку $L_{пл}$, Дж/г
	CaO	SiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃	MnO	FeO	(CaO+MgO)/SiO ₂	початок	кінець	
1	47,20	38,70	1,20	9,70	1,94	1,90	1,25	1225	1300	366,35
2	45,00	38,06	2,00	8,75	2,03	5,00	1,23	1205	1300	360,6
3	42,40	34,64	2,70	8,50	2,08	10,00	1,30	1180	1290	339,8
4	39,30	33,00	2,30	8,35	2,13	14,25	1,26	1175	1265	349,2
5	36,50	30,96	2,00	8,65	2,12	19,85	1,24	1160	1250	347,85

Шлаки для дослідження сплавляли у печі та виливали у виливницю, при цьому частина шлаку під час швидкого охолодження не встигала переходити на кристалічний стан. При нагріванні скло, що знаходиться у масі шлаку, доводили до порогу стійкості, після чого перехід на кристалічну фазу завершувався швидко з виділенням теплоти, що відображується на термограмі у вигляді «піку», спрямованого вгору. При подальшому нагріванні на термограмах спостерігався ендотермічний ефект, спричинений плавленням шлаку. Встановлено, що температура плавлення шлаку знижується від 1225 до 1160 °С за підвищенням в ній вмісту FeO від 1,90 до 19,85 %.

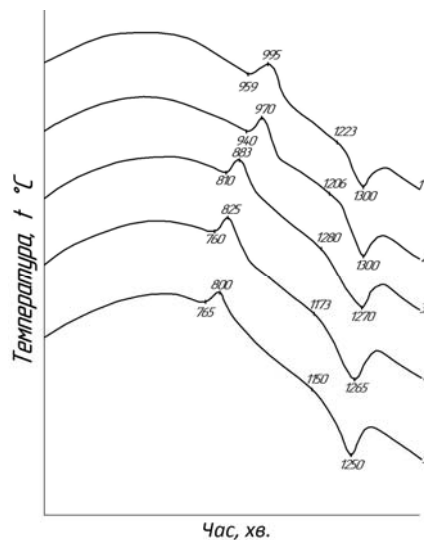


Рисунок 2 – Термограми нагрівання синтетичних шлаків цифри біля термограм (1-5) номера шлаків

Для визначення теплоти плавлення синтетичних шлаків використовували методику, викладену в роботах [3]. З аналізу даних табл. 1 походить, що з підвищенням вмісту FeO в шлаку теплота його плавлення зменшується від 366,35 Дж/г для шлаку № 1 (1,90 % FeO) до 347,85 Дж/г для шлаку № 5 (19,85 % FeO). З використанням термограм нагрівання (рис. 1) та формули, наведеної у роботі [4]:

$$C_p = \frac{\Delta q_s \cdot \Delta S}{m}, \quad (1)$$

Таблиця 2 – Питома теплоємність (C_p) і тепловміст (H) синтетичних шлаків за різної температури (t)

Вміст FeO в шлаці, %														
1,90			5,00			10,00			14,25			19,85		
$t, ^\circ\text{C}$	$C_p,$ Дж/г·град	$H,$ Дж/г	$t, ^\circ\text{C}$	$C_p,$ Дж/г·град	$H,$ Дж/г	$t, ^\circ\text{C}$	$C_p,$ Дж/г·град	$H,$ Дж/г	$t, ^\circ\text{C}$	$C_p,$ Дж/г·град	$H,$ Дж/г	$t, ^\circ\text{C}$	$C_p,$ Дж/г·град	$H,$ Дж/г
100	0,494	47,930	100	0,544	49,186	100	0,427	40,395	100	0,327	31,186	100	0,293	27,209
150	0,544	73,883	245	0,594	131,733	150	0,456	62,455	175	0,343	56,302	150	0,327	42,697
220	0,586	113,441	315	0,628	174,514	200	0,502	86,441	250	0,452	86,148	200	0,364	59,985
270	0,632	143,915	385	0,653	219,346	250	0,519	111,976	355	0,523	137,343	240	0,402	75,306
335	0,674	186,319	450	0,695	263,174	310	0,553	144,124	430	0,557	177,821	300	0,452	100,924
405	0,703	234,542	515	0,720	309,136	365	0,582	175,310	520	0,599	229,811	360	0,519	130,059
470	0,712	280,546	575	0,745	353,089	440	0,632	220,853	585	0,636	269,955	425	0,557	165,012
535	0,758	328,266	645	0,787	406,712	500	0,666	259,783	650	0,657	311,983	490	0,569	201,598
595	0,779	374,354	700	0,816	450,790	570	0,707	307,838	705	0,691	349,071	560	0,582	241,909
645	0,816	422,200	755	0,854	496,711	625	0,728	347,312	760	0,716	387,749	620	0,594	277,197
705	0,846	472,013	815	0,883	548,826	690	0,753	395,493	810	0,758	424,586	675	0,615	310,434
755	0,871	514,920	870	0,917	598,347	745	0,791	437,981	870	0,787	470,925	730	0,649	345,219
815	0,921	568,668	925	0,933	649,249	800	0,820	482,269	925	0,820	515,129	785	0,670	381,470
870	0,959	620,365	975	0,980	697,053	850	0,846	523,920	980	0,879	561,845	845	0,712	422,912
925	0,980	673,653	1020	1,034	742,345	915	0,892	580,389	1030	0,933	607,179	890	0,737	455,521
980	1,042	729,243	1070	1,122	796,261	965	0,925	625,807	1080	0,992	655,318	950	0,787	501,232
1030	1,113	783,159	1115	1,189	848,251	1020	0,988	678,425	1140	1,076	717,355	1000	0,837	541,794
1080	1,189	840,716	1160	1,268	903,548	1075	1,072	735,062	1175	1,147	756,243	1060	0,896	593,826
1130	1,293	902,795	1205	1,377	963,073	1130	1,168	796,638	1265	1,465	1222,940	1105	0,950	635,351
1175	1,386	963,073	1300	1,683	1469,035	1180	1,252	857,125	1325	1,520	1312,478	1160	1,026	689,685
1225	1,461	1130,513	1345	1,720	1545,597	1290	1,578	1352,622	1390	1,574	1413,026	1250	1,394	1146,420
1300	1,792	1618,852	1375	1,758	1597,796	1345	1,637	1441,031	1430	1,603	1476,570	1300	1,444	1217,373
1335	1,833	1682,270	1420	1,792	1677,665	1395	1,704	1524,541	1465	1,616	1532,913	1335	1,469	1268,358
1380	1,846	1765,069	1455	1,813	1740,748	1435	1,737	1593,359	-	-	-	1390	1,507	1350,194
1415	1,867	1830,035	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1420	1,520	1395,612
1455	1,900	1905,383	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1465	1,540	1464,430
1465	1,909	1924,430	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

де Δq_s – зворотна теплова сприйнятливість, Дж/мм²; ΔS – площа, обмежена кривою нагрівання, записаною із зразком і без нього, яка відноситься до підйому температури на один градус, мм²/град; m – маса зразка, г, c – обчислювали питому теплоємність шлаку C_p Дж/(г·град) за різної температури.

Результати розрахунків C_p наведено у табл. 2. Видно, що за підвищенням температури шлаків їх питома теплоємність зростає. Підвищення вмісту FeO в шлаку від 1,90 до 19,85 % супроводжується зниженням питомої теплоємності від 0,494 до 0,293 Дж/(г·град) за температури 100 °С і від 1,909 до 1,540 Дж/(г·град) за температури 1465 °С.

Для складання зональних теплових балансів доменної плавки необхідно є інформація про тепломісткість первинних шлаків. У зв'язку з цим, використовуючи дані щодо питомої теплоємності шлаків, розраховували їх тепломісткість як

$$H = H_{ноч} + \int_{t_1}^{t_{н1}} C_{p1} dt + L_{н1} + \int_{t_{н1}}^{t_2} C_{p2} dt, \quad (2)$$

де $H_{ноч}$ – тепломісткість шлаку за початкової температури, Дж/г; C_{p1} , C_{p2} – відповідно питома теплоємність шлаку в твердій і рідкій фазі, Дж/(кг·град); $L_{н1}$ – теплота плавлення шлаку, Дж/г.

За даних табл. 2 виходить, що підвищення вмісту FeO в шлаку від 1,90 до 19,85 % призводить до зниження його тепломісткості від 47,930 до 27,209 Дж/г за температури 100 °С і від 1924,430 до 1464,430 Дж/г за температури 1465 °С.

Висновки. Виконано дослідження температури плавлення, тепломісткості, а також питомої теплоємності первинних доменних шлаків із вмістом FeO 1,90...19,85 %. Встановлено, що підвищення вмісту FeO в шлаку від 1,90 до 19,85 % дозволяє понизити температуру його плавлення від 1225 до 1160 °С, тепломісткість від 366,35 до 347,85 Дж/г, а також питому теплоємність від 0,494 до 0,293 Дж/(г·град) за температури 100 °С і від 1,909 до 1,540 Дж/(г·град) за температури 1465 °С.

ПЕРЕЛІК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Ефименко, Г. Г.* Определение состава первичных шлаков в доменной печи [Текст] / Г. Г. Ефименко // Научные труды ДМИ : Металлургия чугуна. – М. : Metallurgia, 1952. – Вып. XXIX. – С. 256-262.
2. *Потебня, Ю. М.* Процессы первичного шлакообразования и влияние на них степени восстановления офлюсованных агломератов [Текст] / Ю. М. Потебня // Научные исследования в помощь доменному производству. – Днепропетровск : Днепропетровское книжное издательство, 1960. – С. 197-221.
3. *Берг, Л. Г.* Введение в термографию [Текст] / Л. Г. Берг. – М. : Наука, 1969. – 395 с. – Библиография в конце каждого раздела.
4. Исследование восстановленных агломератов методом дифференциального термического анализа [Текст] / С. А. Гаврилко, В. Г. Аносов, С.И. Кудиевская и др. // *Металургія : наукові праці Запорізької державної інженерної академії.* – Запоріжжя : РВВ ЗДІА, 2005. – Вип. 12. – С. 97-105.
5. Исследования теплофизических свойств доменных шлаков и чугунов [Текст] / С. А. Гаврилко, Ю. В. Моисейко, С. А. Черепанов и др. // *Металургія : наукові праці Запорізької державної інженерної академії.* – Запоріжжя : РВВ ЗДІА, 2006. – Вип. 13. – С. 106-112.

Стаття надійшла до редакції 02.10.2013 р.
Рецензент, проф. М.Ф. Колесник