



Закономерности износа сталеплавильной футеровки

Составлена модель износа сталеплавильной футеровки, в том числе из периклазо-углеродистых огнеупоров. Расчеты по модели и экспериментальные данные находятся в хорошем соответствии. Табл. 8. Библиогр.: 19 назв.

Ключевые слова: сталеплавильный, агрегат, футеровка, износ

The model of steelmaking lining wear, including of periclase-carbon refractories. Model calculations and experimental data are in good agreement.

Keywords: steel-making, assembly, lining wear

1. История и состояние вопроса

Футеровка первых бессемеровых конвертеров выкладывалась из ганистера (рушистый песчаник). Позже для нее стали использовать крупнозернистый кварц в смеси с огнеупорной (каолиновой) глиной и, наконец, остановились на динасе.

Первоначально футеровка томасовских конвертеров изготавливалась из известняка на жидком стекле, позже – из хорошо обожженного глинисто-магнезического известняка или доломита с добавкой глины, доломита с магнезитом в отдельных элементах кладки.

Первый кислородный конвертер (КК), исследованный в 1948 г. в Gerlafingen (Швейцария) под руководством R. Durrer был с кислой футеровкой, а в дальнейшем – из смолодолomite. Развитие КК процесса шло в условиях совершенствования производства огнеупоров для футеровки и её стойкости, но радикальные изменения произошли с появлением периклазо-углеродистых огнеупоров (ПУО) (1977, Япония; 1979, США). Уже в 1984 г. в футеровке КК Японии ПУО составляли 80 %, Канады и США – 50-60 %, Франции, В.Британии, Германии, Австрии – 10-40 %, несмотря на в 3-4 раза большую стоимость.

2. Механизм износа

Эти успехи были подготовлены исследованиями механизма износа футеровки. Установили, что при легкоплавкой матрице зерна периклаза переходят в шлак и в нем растворяются [1]; углеродистая связка огнеупора газифицируется и скорость реакции лимитирует разрушение [2]; взаимодействие $C + MgO \rightarrow CO + Mg$ и образование паров магния вызывает осаждение образующихся MgO на поверхности огнеупора в виде плотного, пассивирующего растворение, слоя [3].

Лабораторные эксперименты показали [4], что существует определенная основность шлака V , при которой эрозия огнеупора максимизируется, что требует минимизации продолжительности пребывания системы металл – шлак в этих условиях. Статистические исследования зависимости продолжительности кампании КК при переработке передельных [5]

и фосфористых [6] чугунов показали определяющую (77 %) роль содержания в них кремния. Для ПУО найдена зависимость его износа от технологии шихтовки и продувки плавки [7].

3. Методика анализа

Фиксировались контролируемые параметры КК плавки, для состава используемых материалов, содержащих оксид магния, принималась его средняя величина за период экспериментов. Из баланса оксида магния находилась масса износа футеровки m_{MgO} , кг/т.

В исследуемых условиях имели место плавки, на которых мер по защите футеровки конвертера не принималось (знак -), использовалось ошлакование (О), торкретирование (Т), подварка (П), раздувка шлака с набрызгиванием (Н) его на футеровку, присадка в конвертер на продувку доломитизированной извести (ДИ), доломита (Д), магнезита (М), боя отработавшего кирпича (БК) или их смеси.

В табл. 1 приведены данные о трех этапах опробования различных методов защиты футеровки. Здесь и далее в числителе указан диапазон изменения m_{ϕ} , а в знаменателе ее средняя величина/количество проанализированных случаев. На 1-ом этапе используемые технологии были недостаточно эффективны, о чем свидетельствует рост m_{ϕ} с увеличением массы MgO , вносимой присаженными материалами, хотя и с некоторым отставанием от последней в ряде случаев.

На 2-ом этапе использование набрызгивания было целесообразным лишь в определенном диапазоне $m_{MgO} = 6-8$ кг/т.

Благодаря совершенствованию технологии защиты футеровки, на 3-ем этапе с ростом m_{MgO} при использовании ДИ наблюдается устойчивый спад m_{ϕ} , для М – очевидно, до нуля, для БК – минимизация m_{ϕ} при $m_{MgO} = 8-10$ кг/т, для Д – устойчивый спад, правда, в ограниченных пределах m_{MgO} .

4. Оценка значимости факторов

Как и в других исследованиях, наиболее значимым для износа футеровки КК является содержание кремния в перерабатываемом чугуне $Si_{\text{чуг}}$ (табл. 2). В

Таблица 1. Износ футеровки КК, кг/т (1-й этап защиты)

Технология	Масса MgO, внесенная материалами, кг/т					
	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	>8
-	-	-	<u>4,8-7,8</u> 5,6/7	<u>2,0-10</u> 6,6/9	<u>4,0-10</u> 6,8/8	=
0	<u>1,6-5,2</u> 3,4/2	<u>2,0-5,6</u> 4,2/12	<u>2,8-8,4</u> 5,2/12	<u>3,6-8,8</u> 5,8/19	<u>5,2-10</u> 7,7/11	<u>5,2-9,2</u> 7,1/4
T	<u>3,6</u> 3,6/1	<u>4,8-6,0</u> 5,4/2	<u>6,0-7,2</u> 6,6/2	<u>4,4-9,6</u> 6,8/3	<u>8,4-9,6</u> 9,0/2	<u>8,0-11,2</u> 9,6/2
П	-	-	<u>2,4-6,8</u> 4,6/2	<u>3,2-9,6</u> 6,8/3	<u>7,6</u> 7,6/1	-

(2-й этап защиты)

Технология	Масса MgO, внесенная материалами, кг/т					
	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16
-	<u>2,0-7,2</u> 3,6/3	<u>0,8-8,8</u> 4,4/5	<u>-2,4-2,4</u> -0,4/3	<u>-3,2</u> -3,2/1	-	<u>-(4,4-5,0)</u> -4,8/2
H	<u>2,8-4,4</u> 3,6/6	<u>-0,4-7,2</u> 2,8/19	<u>-2,4-7,2</u> 2,0/24	<u>-2,4-4,0</u> 1,6/9	<u>-5,6-1,2</u> -2,8/4	<u>-(4,4-5,6)</u> -5,0/2

(3-й этап защиты)

Материал	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16
ДИ	<u>2,4-3,6</u> 3,2/6	<u>0-3,6</u> 2,8/9	<u>-2,0-3,6</u> 1,7/14	<u>0,8</u> 0,8/1	-	-
M	<u>4,4</u> 4,4/1	<u>2,4-6,8</u> 4,5/3	<u>-2,4-7,2</u> 4,6/15	<u>-3,6-0,8</u> -2,7/6	<u>0-(-6)</u> -2,7/5	<u>-(4,4-5,6)</u> -5,0/2
БК	<u>2,8</u> 2,8/2	<u>0,4-5,2</u> 2,1/11	<u>-0,4-2,4</u> 1,0/2	<u>0-4,0</u> 2,0/2	-	-
Д	$m_{\phi} = 7 - 0,85$		$m_{MgO} (m_{MgO} = 0-4 \text{ кг/т})$			

отсутствие присадки материалов, содержащих оксид магния, величина m_{ϕ} минимизируется при 0,5-0,6 % Si. При добавке доломита оптимум составляет 0,6-0,7 % Si. Действие доломитизированной извести следует считать наиболее приемлемым, так как наблюдается уменьшение m_{ϕ} во всем исследованном диапазоне содержания кремния в чугуне, что связано с её устойчивым растворением в шлаке. Добавки к ней магнезита и боя кирпича целесообразно при повышенных содержаниях кремния в чугуне.

Таблица 2. Влияние Si_{чуг} на износ футеровки, кг/т

Si _{чуг} %	Материал защиты			
	-	Д	ДИ	ДИ+М+БК
0,4-0,5	<u>5,6</u> 5,6/1	-	<u>-7,2-2</u> -5,2/2	<u>-6,4-1,2</u> -3,2/3
0,5-0,6	<u>4,8-5,2</u> 4,9/3	<u>2,8-6,4</u> 4,3/4	<u>-2,8-0,4</u> 1,1/5	<u>0,8-3,2</u> 1,8/4
0,6-0,7	<u>4,0-9,2</u> 7,3/5	<u>1,5-8,0</u> 3,9/11	<u>-1,6-3,2</u> 1,8/5	<u>-3,2-6,4</u> 2,4/17
0,7-0,8	<u>4,4-8,8</u> 6,5/5	<u>1,6-8,8</u> 4,9/16	<u>-1,2-7,2</u> 2,5/15	<u>-2,4-7,2</u> 1,7/18
0,8-0,9	<u>3,6-10</u> 6,9/14	<u>3,6-6,4</u> 4,6/10	<u>-0,8-4,4</u> 2,1/4	<u>-7,6-7,2</u> 0/8
0,9-1,0	<u>5,2-8,8</u> 7,0/3	<u>5,1-9,2</u> 7,1/6	-	-
1,0-1,1	<u>6,8-11,2</u> 8,4/3	<u>2,0-5,6</u> 4,1/3	-	-
1,1-1,2	-	<u>8,4-10,8</u> 9,6/2	-	-

Доломитизированная известь сама по себе и в смеси с магнезитом устойчиво уменьшает износ футеровки для конечных шлаков широкого диапазона окисленности и основности (табл. 3). В исследуемых условиях оптимальна основность $B = 3,2-3,6$ по данным экспресс-анализа.

Таблица 3. Анализ влияния состава шлака на m_{ϕ} , кг/т

Таблица 3. Анализ влияния состава шлака на m_{ϕ} , кг/т

Материал	FeO, %					
	10-14	14-18	18-22	22-26	26-30	> 30
-	5,6	7,4	7,0	6,8	5,6	-
Д	6,4	5,0	5,5	6,0	4,6	-
ДИ	1,2	2,4	1,2	1,6	-	-
ДИ+М	0,6	2,6	0,8	1,0	-	-
	B = CaO/SiO ₂					
	2,0-2,4	2,4-2,8	2,8-3,2	3,2-3,6	3,6-4,0	>4,0
-	6,4	6,4	5,4	7,0	5,4	-
Д	4,4	4,5	4,9	4,9	4,4	5,6
ДИ	3,2	1,8	2,0	0,2	-	-
ДИ+М	1,5	2,4	3,4	0,2	1,4	-

Увеличение удельной интенсивности продувки i , м³O₂/т·мин хотя и сокращает продолжительность износа футеровки, но увеличивает его интенсивность. Очевидно, последнее превалирует (табл. 4).

Таблица 4. Износ футеровки при изменении i , м³/т·мин

i , м ³ /т·мин	Добавки, кг/т			
	-	Д	ДИ	ДИ+М
2,6	5,5	6,2	-	0,2
3,0	6,4	5,0	0,2	2,2
3,4	6,8	5,0	1,9	1,6

Результаты набрызгивания шлака в нашем случае сопоставлены с приведенными в [8]. Они совпадают при 6-7 % MgO в шлаке, а дальнейшее увеличение содержания оксида магния вызывает гетерогенизацию шлака и принятие мер, вызывающих дополнительный износ футеровки (табл. 5).

Таблица 5. Результаты набрызгивания шлака

Технология	MgO, %							
	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10	10-11
-	<u>3,4</u> 3	<u>4,6</u> 13	<u>5,2</u> 16	<u>6,1</u> 29	<u>7,3</u> 14	<u>6,7</u> 8	<u>6,8</u> 1	-
H	-	-	-	<u>0</u> 3	<u>1,5</u> 16	<u>1,8</u> 16	<u>2,0</u> 12	<u>3,9</u> 6
H [8]	1,7	1,1	0,5	0	-	-	-	-

5. Динамика износа

В ходе кампании сталеплавильного агрегата в результате износа или зарастания футеровки происходит изменение размеров ванны, что оказывает влияние на ход процесса и его результаты.

В бессемеровском конвертере Б с увеличением

Таблица 6. Динамика износа футеровки

Агрегат (садка, т)	Пара- метр	Период кампании \bar{N}					
		0-0,2	0,2-0,4	0,4-0,6	0,6-0,8	0,8-1,0	
Т (30)	\bar{V}	$\frac{0,72-0,87}{0,8/2}$	-	0	0,07	$\frac{0-1,0}{0,5/2}$	[9]
МБ (2)	\bar{V}	1,0	0,2	-	0,13	0,27	[10]
МПО (220)	\bar{V}	$\frac{0,15-1,0}{0,47/4}$	$\frac{0,55-0,67}{0,61/2}$	$\frac{0,20-1,0}{0,61/4}$	$\frac{0,20-0,64}{0,43/4}$	$\frac{0,12-0,21}{0,18/3}$	[11]
МПО (380)	$\frac{\bar{V}}{V}$	1,0 1,0	0,55 0,70	0,40 0,55	0,28 0,42	0,19 0,31	[15]
К-Д (30)	\bar{V}	0,35	0,33	0,52	0,47	$\frac{0,22-1,0}{0,61/2}$	[1]
КК (160)	\bar{V}	$\frac{0,6-1,0}{0,8/2}$	$\frac{0,1-0,28}{0,19/2}$	-	-	-	[8]
КК (380)	$\frac{\bar{V}}{V}$	0,33 1,0	0,54 0,84	1,0 0,87	0,43 0,80	0,14 0,50	[12]
КК (160)	\overline{MgO}	1,0	0,88	0,88	0,83	$\frac{0,89-0,92}{0,9/2}$	[13]
КК (300)	\overline{MgO}	0,45	0,35	0,30	0,32	1,0	[14]
КК (30)	\bar{V}	-	1,0	0,99	-	0,34	
КК (350)	\overline{MgO}	0,52	0,82	1,0	0,90	0,50	

содержания в шлаке кремнезема он густеет, налипает на футеровку, образуя настлы, что уменьшает внутренний объем и вызывает выбросы. С ростом содержания марганца в чугуна и оксида марганца в шлаке последний разжижается и разъедает футеровку.

В томасовском процессе Т содержание кремния в чугуна ограничивают 0,2-0,4 % и шлаки во время передувки жидкоподвижны и разъедают футеровку, что вызывает уменьшение глубины ванны в конце кампании в 1,3-2 раза и пробой слоя металла дутьевыми струями с выносом капель металла из конвертера.

В начале использования кислородных конвертеров КК с продувкой через одноканальные фурмы в 1950-1960-х гг. опережающий износ футеровки в районе ванны компенсировался её утолщением в этом месте на заводах Австрии, Германии, Японии, что влияло на ход продувки. Для процесса LD-AC КК имел тьюлпановидную форму.

Своя специфика динамики износа в ходе кампании футеровки была у малобесемероных конвертеров (МБ), мартеновских печей с продувкой ванны кислородом (МПО), процесса в агрегате KALDO (К-Д).

Литературные данные о динамике износа футеровки сталеплавильных агрегатов в ходе кампании приведены в табл. 6. Число плавов в кампании N принято за 1, а её соответствующий период определен как доля \bar{N} . Если фиксировалось изменение толщины футеровки t во времени, то рассчитывалась скорость износа V, её максимальная величина принималась за 1, а другие – в долях от 1 (\bar{V}). В двух исследованиях] оценивалось изменение содержания в конечном шлаке содержание оксида магния, как $MgO = MgO / MgO_{max}$.

В случаях Т [9], МБ [10], КК и, возможно, [8]

минимальная скорость износа футеровки \bar{V} или MgO приходится на середину кампании. В процессе МПО (плотный и обычный кирпич) и, примерно, [] величина \bar{V} уменьшается в ходе кампании, как и в 380-т КК с футеровкой из ПУО отечественного производства (второй случай). Тогда как при использовании ПУО фирмы РХИ (первый случай) (Австрия) \bar{V} максимизируется в середине кампании. В конвертере К-Д [1] величина \bar{V} склонна увеличиваться в ходе кампании.

6. Модель износа ПУО

При взаимодействии оксидов железа в продуктах испарения, содержанием первичной и вторичной зон взаимодействия или шлаке с углеродом огнеупора по реакции $CO + FeO \rightarrow CO_2 + Fe$ удельная интенсивность окисления углерода может быть определена по уравнению (6,64). С учетом динамики окисления углерода и изменения температуры первичной и вторичной зон взаимодействия при продувке сталеплавильной ванны кислородом получим, что скорость обезуглероживания огнеупора составляет $10^{-1}-10^{-2}$ мм/плавку,

что отвечает фактической скорости износа ПУО.

В определена скорость износа MgO-C огнеупора в сталеплавильных шлаках. Для КК верхнего дутья энергия активации процесса составила около $2 \cdot 10^5$ Дж/моль, а донного – $1,2 \cdot 10^6$ Дж/моль при $1,5 \cdot 10^5$ и $3,6 \cdot 10^6$ Дж/моль энергии активации диффузии Fe и O. По-видимому, разница связана не с видом диффундирующих частиц, а с разницей в окисленности сталеплавильного шлака.

7. Сами с усами ?

В настоящее время большинство ККЦ мира используют футеровку из ПУО. Сравнение результатов её эксплуатации в разных условиях показывает заметную разницу, что требует анализа. В табл. 7 приведены данные о стойкости футеровки, выполненной

Таблица 7. Сотрудничество украинских предприятий и зарубежных фирм

Год	Плавов на футеровках			Соглашения
	А	Б	В	
2004	$\frac{526-3350}{1093/5}$	$\frac{1050-3746}{1932/12}$	$\frac{914-3350}{1494/40}$	1/2/-
2005	$\frac{1200-2924}{2106/5}$	$\frac{505-2810}{2302/14}$	$\frac{901-4037}{1364/52}$	5/8/2
2006	$\frac{780-3047}{1782/24}$	$\frac{1246-1528}{1366/6}$	$\frac{989-3006}{1775/26}$	2/4/2
2007	$\frac{1172-2829}{2184/12}$	$\frac{908}{908/1}$	$\frac{847-3944}{2648/35}$	1/3/1
2008	$\frac{732-2589}{2300/10}$	$\frac{732-4790}{3273/7}$	$\frac{1397-3644}{2443/29}$	3/8/2
2009	-	$\frac{860-3923}{2040/8}$	$\frac{1432-4187}{2926/28}$	5/15/4
2011	-	$\frac{2601-3484}{3208/8}$	$\frac{1948-5396}{3281/22}$	7/21/7
2012	-	$\frac{3224-3611}{3405/7}$	$\frac{1730-5035}{3234/33}$	7/24/7

Таблица 8. Неравномерность стойкости ПУФ

Год	ЗОЗ	РФ	Tu	Ch	Ger	ММК	ЕМЗ	Orind	РФ+Dalmond	Melt (Tu)	PUY-ANG	Dalmond	RHI	ММК + Tu+Ch	KU-MAS	PUY-ANG+Dalmond
2004	1,24	1,31	1,43	2,43	1,26											
2005	1,06	1,34 1,43	1,24	1,83	1,40 1,26											
2006	1,14	1,16	1,31	1,72 1,30	1,07	1,54	1,58	1,04								
2007	1,26	1,41 1,27		2,41 1,57 1,10		1,23	1,05	1,56	1,05							
2008			1,01	2,10 1,51 1,16		1,44			1,40	1,35						
2009		1,03		2,26 1,09					1,12	1,46						
2011			1,56	1,57 1,05							1,06	1,56 1,50	1,08	1,33		
2012				2,21					1,21		1,02	1,26 1,18		1,12	1,24	1,80

украинскими предприятиями самостоятельно (А), в сотрудничестве с зарубежными фирмами (Б) и поставленной последними на украинские заводы (В) (числитель – диапазон стойкости в плавках; знаменатель – средняя стойкость/количество случаев).

В массиве А наблюдается спад средней стойкости в 2006 г., когда значительное количество ККЦ попытались «взять игру на себя». Наиболее последовательным и удачливым «игроком» был ММК им. Ильича, но и он в 2009 г. вынужден был войти в соглашение с зарубежными фирмами.

В группе Б стабильность N наименьшая в связи с поисками выгодного зарубежного партнера «без опоры на собственные силы». Кризис 2008 г. прекратил эти «метания» и ряд предприятий, «сдавшись на милость победителя», показали устойчивый рост средней стойкости футеровки в 2009-2012 гг.

Все эти годы зарубежные фирмы (группа В) работали над совершенствованием производства ПУФ и добились стабильного роста ее стойкости с значительным спадом в кризисном 2008. Количество поставленных партий снизилось в связи с ростом N и ограниченностью украинского производства и, соответственно, рынка огнеупоров.

В графе «соглашения» табл. 7 показано их количество /число участников/ в том числе украинских предприятий, участвующих в подготовке футеровки, а не только ее использовании. Последние извлекли уроки из 2008 г. и перешли от тезиса «сами с усами» к тезису «гуртом и батька бити легше». Т.7

Стабильность работы ККЦ зависит, в том числе, от равномерности продолжительности кампаний конвертеров, которую можно охарактеризовать отношением N_{\max} к $(\bar{N} = N_{\max}/N_{\min})$ на протяжении года эксплуатации огнеупоров одного поставщика в конвертерном ККЦ.

В табл. 8 величина \bar{N} приведена для Запорожского ОЗ, РФ, Турции (TU), Китая (Ch), Германии (Ger), отечественных цехов, работавших на самообеспечение (ММК, ЕМЗ), а также зарубежных фирм в разном сочетании.

По-видимому, под рубрикой Ch идут государственные предприятия, поставляющие три вида огнеупора одинаковой стойкости каждый, несмотря на разные условия эксплуатации. Низкая неравномерность \bar{N} у PUYANG (КНР) и RHI (Австрия). Стабильна \bar{N} у ЗОЗ. Возможно, Dalmond (КНР) строит свою работу по принципу Ch.

Очевидно, не будет особенно оригинальным, если предположить, что steeplechase за украинские заказы выигрывает групп Ch. По крайней мере, сегодня.

Выводы

Составлены модели износа сталеплавильной футеровки и проанализирован процесс её износа в динамике при различных условиях.

Библиографический список

- Sandbrg H., Bergh S., Bengtsson E. // J. Metals. - 1969. - № 11. - P. 33-39.
- Старов Р.М., Ермак Н.Н., Буравицкий Н.И. и др. // Металлург. и горноруд. пром-сть. - 1971. - № 2. - С. 13-14.
- Kim S.-M., Lu W. – K. // Met. Trans. - 1979. - V. 9. - В. № 3. - P. 353-364.
- Iyengar R.K., Petrilli F.C. // J. Metals. – 1973. - № 7. - P. 21-28.
- Штец К.А., Чесак В.Н. // Изв. вузов. Черная металлургия. - 1963. - № 6. - С. 172-176.
- Messin G. // CIT CDS. - 1964. - № 2. - P. 479-482.
- Ивко В.В., Ивко мл. В.В., Охотский В.Б. // МЛУ. - 2005. - № 3-4. - С. 73; Металлург. и горнорудн. пром-сть. - 2006. - № 7. - С. 149-150.
- Nashiwa H., Mizuno T., Ohi J., Katohgi K. // Ironmaking & Steelmaking. - 1978. - № 3. - P. 95-106.
- Postinett H. // St. u. Eisen. - 1932. - № 16. - P. 405-409.
- Андреев Б.А. Малое бессемерование: Москва – Свердловск: МАШГИЗ, 1948. - 174 с.

Поступила 07.11.2013