УДК 669.162

Наука

М. С. Кузнецов, Г. Ю. Крячко /к. т. н./,
Н. Н. Валуева /к. т. н./
Днепродзержинский государственный технический университет

Ю. К. Лебедь
ПАО «Днепровский меткомбинат им. Дзержинского»

Изменение свойств шлака и нагрева чугуна при вдувании природного газа и пылеугольного топлива в горн доменной печи

На примере работы доменной печи в режимах эксплуатации, обусловленных вдуванием разных заменителей кокса, изучены изменения свойств шлака и нагрева чугуна. (Ил. 2. Табл. 3. Библиогр.: 9 назв.)

Ключевые слова: *доменная печь, пылеугольное топливо, вязкость шлака, температура плавления чугуна.*

Changes of slag properties and cast iron heating during blast furnace operation with the injection of various coke substitutes are studied.

Key words: *blast furnace, pulverized coal, slag viscosity, the melting point of iron.*

Введение

Компенсирующим ресурсом, способствующим увеличению расхода пылеугольного топлива (ПУТ), считается снижение основности шлака [1]. Это снижение возможно в двух вариантах реализации.

Реализация первого варианта изменения шлакового режима в сторону уменьшения основности осуществляется при использовании кокса и ПУТ с пониженным содержанием серы по сравнению с базовым уровнем. Понятно, что реализация этого варианта возможна при замещении части украинского угля импортным – малосернистым.

Второй вариант изменения, направленный на улучшение физических свойств шлака при использовании собственных ресурсов сернистого угля, может быть осуществлен при условии наличия средств внедоменной десульфурации чугуна.

Необходимо отметить, что в профессиональной среде существуют противоречивые и слабо обоснованные мнения относительно влияния ПУТ на показатели нагрева чугуна. Так, авторы новейших работ [3; 4], опубликованных в одно и то же время, имеют прямо противоположные взгляды. В. И. Андреев с сотрудниками [3] ошибочно считают, что вдувание угля в фурменную зону резко повышает тепловое излучение за счет светящегося пламени с высокой степенью черноты, в результате чего возникает перегрев продуктов плавки в горне. В. В. Климанчук и С. Л. Ярошевский [4], напротив, пишут об уменьшении нагрева чугуна на выпуске, обусловленном вдуванием ПУТ. Это утверждение тоже не верно, поскольку нагрев чугуна определяется в основном тепловым балансом нижней ступени теплообмена, а не температурами в фурменном очаге.

Постановка задачи

Целью исследования является определение направления совершенствования шлакового режима при освоении технологии вдувания ПУТ в доменные печи.

Результаты исследований

Для определения в конкретных производственных условиях результатов изменения основности шлака при режимах плавки с вдуванием природного газа и пылеугольного топлива сравнили три периода работы доменной печи «В» Днепровского металлургического комбината (табл. 1).

Доменная печь «В» с диаметром горна 8,2 м имеет отличия от типового проекта, в частности высота горна составляет 3400 мм против 3200 мм, высота зумпфа – 1100 мм против 450 мм. Количество воздушных фурм увеличено с 16 до 18. Печь оснащена двумя чугунными летками и типовым двухконусным засыпным аппаратом. В зависимости от конъюнктурных и сырьевых условий производительность печи колебалась от 38 до 54 т/м^2 / сут. В первом исследуемом периоде шихта состояла из 73 % местного агломерата и 27 % криворожских окатышей. Во втором и третьем периодах печь работала на местном агломерате. Подавляющее количество кокса поставлялось с Алчевского металлургического комбината.

© М. С. Кузнецов, Г. Ю. Крячко /к. т. н./, Н. Н. Валуева /к. т. н./, Ю. К. Лебедь, 2016 г.

Таблица 1

Показатели работы доменной печи «В» Днепровского металлургического комбината в исследуемые периоды эксплуатации

Показатель	Период		
	I июнь 06–30.06.2004	II январь 01–31.01.2014	III май 01–31.05.2015
Производительность, %	100,0	108,9	124,9
Расход восстановителей, кг ($м^3$) / т чугуна:			
кокс	501	559	400
антрацит	0	17,2	0
природный газ	73,2	12,1	0,8
ПУТ	0	0	156
Дутье:			
температура, °С	1094	744	962
концентрация кислорода, %	21,7	20,8	24,6
Избыточное давление колошникового газа, кПа	130	128	126
Общий перепад давления, кПа	120	111	116
Основность шлака:			
CaO/SiO_2	1,20	1,21	1,12
$CaO+MgO/SiO_2$	1,32	1,33	1,27
Содержание Al_2O_3 в шлаке, %	5,0	6,49	6,31
Коэффициент распределения серы Ls	69,1	59,8	58,9
Чугун:			
температура, °С	Н. д.*	1479	1450
состав, %:			
Si	0,79	0,74	0,63
Mn	0,20	0,24	0,11
S	0,023	0,026	0,019

*Нет данных.

Основу реальных доменных шлаков составляют три основных компонента – CaO, SiO_2 и Al_2O_3, которые существенно определяют свойства расплавов. С целью использования классических трехосных диаграмм состояния системы $CaO-SiO_2-Al_2O_3$ [5] для оценки изменений шлакового режима осуществили перерасчет состава исследуемых шлаков на 100 % указанных оксидов.

На фрагмент трехосной диаграммы температур плавления шлаков системы $CaO-SiO_2-Al_2O_3$ нанесли точки расчетных составов шлака исследуемых периодов I и III (рис. 1), которые отличались между собой, прежде всего, составом шихты, видом дутьевой добавки и шлаковым режимом (табл. 1).

Из диаграммы видно следующее. Если при работе печи с вдуванием природного газа и формированием шлака со средней основностью $CaO/SiO_2 = 1,20$ подавляющее большинство шлаков имело температуру плавления в диапазоне 1455–1475 °С, то переход на работу с использованием ПУТ и с уменьшенной до 1,12 основностью шлака вызвал «сдвиг» шлаков в область температур между изотермами 1300 и 1455 °С.

Следует отметить, что снижение температур плавления шлаков, обусловленное снижением основности, является, безусловно, положительным фактором. В результате улучшается подвижность расплавов в коксовой насадке, что важно в условиях попадания в шлак несгоревших частиц ПУТ.

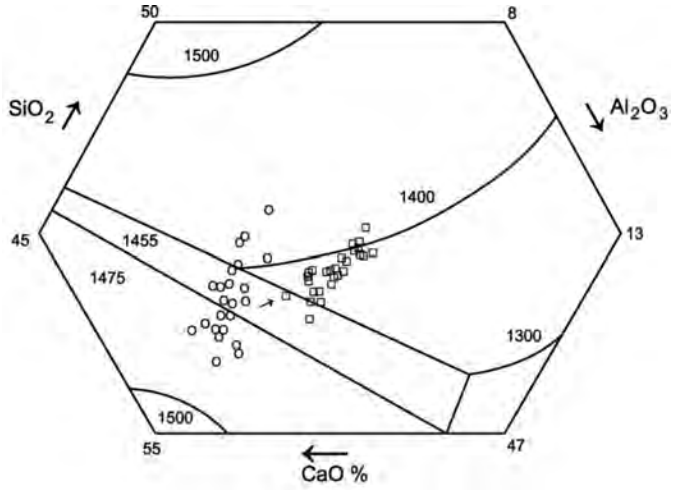


Рис. 1. Участок диаграммы температур плавления шлаков системы $CaO-SiO_2-Al_2O_3$:
о – шлаки основностью 1,20, период работы 06.06–30.06.2014
□ – шлаки основностью 1,12, период работы 01.05–31.05.2015
→ – направление изменения температур плавления

Так, при работе исследуемой печи в период с 01.01. по 31.07.2008 г. при среднем значении основности 1,23 средняя за указанный период температура чугуна составила 1489 °С при варьировании в пределах 1444–1517 °С и изменении основности в интервале 1,17–1,29 [2]. Для условий работы той же печи с вдуванием ПУТ (период III, табл. 1) и основностью шлака 1,12 расчет с использованием статистических зависимостей из работы [2] дает расчетную температуру чугуна 1468–1475 °С, что на 18–25 °С выше средней фактической температуры. Причиной более существенного снижения температуры чугуна является «охлаждающий» эффект подачи холодного ПУТ с газом-носителем, по сравнению с существенно меньшим массовым расходом природного газа (156 кг ПУТ/т чугуна против 55 кг газа/т).

Важно отметить, что во втором периоде без вдувания ПУТ, когда проводились регулярные измерения температуры чугуна, фактическая (1479 °С) и расчетная (1481 °С) температуры чугуна практически совпали.

Последствия увеличения расхода ПУТ с одновременным уменьшением основности шлака наблюдались (табл. 2) также на доменной печи № 5 ОАО «ММК им. Ильича» в 2012–2013 гг. [4].

Обращает на себя тот факт, что содержание кремния в чугуне не может быть надежным показателем нагрева чугуна при вдувании ПУТ. Сравнивая показатели плавки ДП № 5 ММК в периодах 02–03.2013 и 06.2013, видим, что уменьшение физического нагрева чугуна с 1464 до 1454 °С сопровождалось повышением содержания кремния в металле с 0,68 до 0,70 %. Причину этого явления следует объяснить.

Уменьшение основности шлака при увеличении расхода ПУТ положительно влияет на процесс восстановления кремния. С одной стороны, снижение окислительного потенциала фурменной зоны из-за отвлечения части кислорода дутья на газификацию ПУТ сопровождается уменьшением окисления восстановленного в надфурменом пространстве кремния. С другой стороны, уменьшение основности шлака способствует облегчению восстановления кремнезема, в частности из золы от горения частиц ПУТ.

Сравнение вязкости шлаков исследуемых периодов I и III при температурах 1400 и 1500 °С показывает существенное увеличение подвижности шлаков пониженной основности, особенно при температуре 1400 °С (рис. 2).

Если при средней основности 1,20 и температуре 1400 °С большинство шлаков имело вязкость в пределах 1–6 Па ·с, то при средней основности 1,12 вязкость была в 2–12 раз меньше. Такие шлаки позволяли вести доменную плавку на пониженном нагреве.

Решая проблему снижения основности шлака при работе печи на сернистом коксе, следует обратиться к практическому опыту, приобретенному в странах с наиболее массовым использованием ПУТ за последние два десятилетия [6–8].

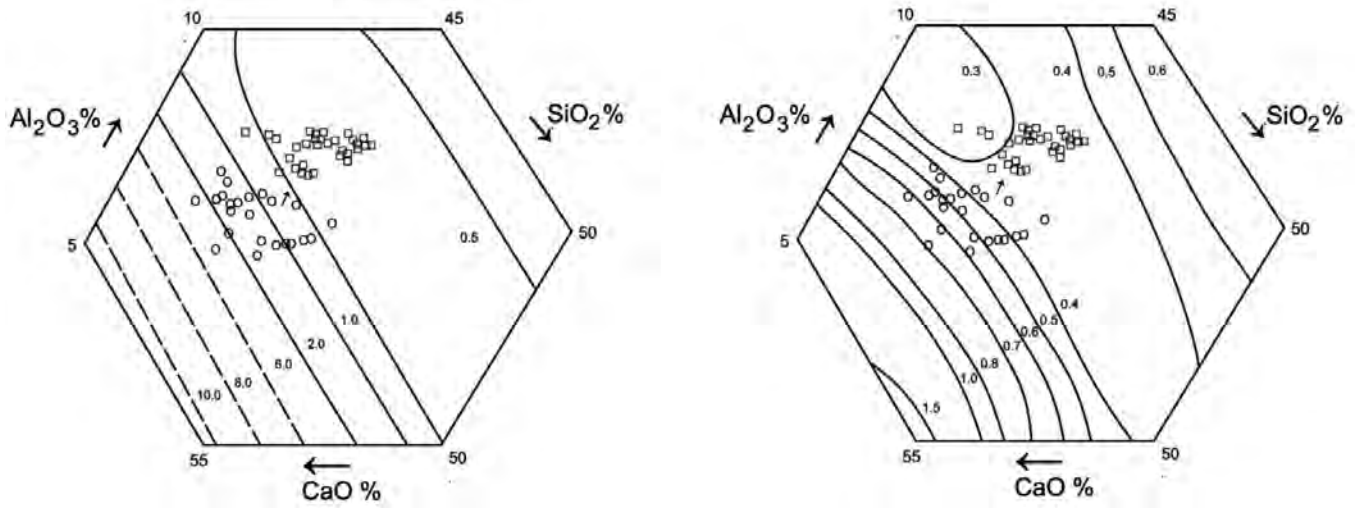
На доменных печах завода «Корус» в Эймейдене при затратах ПУТ в пределах 134–258 кг/т чугуна температура чугуна колебалась в пределах 1488–1520 °С при содержании кремния в металле 0,36–0,46 % [6–7]. В табл. 3 приведены данные об основности агломерата, шлаковом режиме и нагреве чугуна доменных печей различных регионов мира [8]. Анализируя приведенную информацию, можно прийти к выводу, что при низком выходе шлака в пределах 199–309 кг/т чугуна снижение основности шлака в качестве компенсирующего ресурса не используется. Печи работают на основных шлаках (CaO/SiO_2 – до 1,28) с повышенным содержанием глинозема (Al_2O_3 – до 18,1 %). Это позволяет иметь достаточную энтальпию продуктов плавки в горне и на выпуске. Если принять во внимание, что температура шлака примерно на

Таблица 2

Данные об изменении расхода дутьевых добавок, содержания кремния в чугуне и основности шлака на ДП № 5 ОАО «ММК им. Ильича»

Параметры	Июль – август 2012 г.	Февраль – март 2013 г.	Апрель – май 2013 г.	Июнь 2013 г.
Расход ПУТ, кг/т чугуна	9	120	150	171,3
Расход природного газа, $м^3$/т чугуна	37	0	1	0
Содержание Si в чугуне, %	0,77	0,68	0,65	0,70
Основность шлака :				
CaO/SiO_2	1,22	1,19	1,18	1,16
$(CaO+MgO)/SiO_2$	1,36	1,33	1,31	1,28
Температура чугуна, °С	1473	1464	1466	1454

Приведенные данные свидетельствуют о возможном влиянии на температуру чугуна изменений шлакового режима.



а) б)

Рис. 2. Участки диаграммы вязкости шлаков системы $CaO-Al_2O_3-SiO_2$ при температурах 1400 (а) и 1500 °С (б) с нанесением точек, отвечающих периодам и обозначениям рис. 1

Таблица 3

Показатели доменных печей при работе с высоким расходом ПУТ по данным работы [8]

Показатель	Доменные печи					
	№ 1 (Какогава, Япония)	№ 3 (Фукуяма, Япония)	№ 2 (Мурoран, Япония)	№ 4 (фирмы Ijmuiden, Нидерланды)	№ 1 (фирмы Baosteel, Китай)	№ 3 (Пхохан, Республика Корея)
Полезный объем, $м^3$	4550	3223	2296	4500	4063	3795
Расход, кг/т чугуна: кокса ПУТ	 291 254,4	 289 265,5	 314 191,4	 307 216	 250 260,6	 271 222,3
Доля агломерата в шихте, %	43	76,7	87,6	44,1	72,8	83,1
Основность агломерата CaO/SiO_2	2,11	2,07	1,77	2,65	1,83	н.д.*
Основность шлака CaO/SiO_2(Al_2O_3) в шлаке %	1,25 (15,2)	1,28 (13,8)	1,26 (15,9)	1,15 (18,1)	1,21 (14,3)	1,25 (14,3)
Температура чугуна, °С	1496	1501	1514	Н. д.*	1501	1516

*Нет данных.

50 °С выше температуры металла, то температура шлака при вдувании ПУТ на упомянутых печах могла составлять 1540–1560 °С.

Важным фактором, который может не только улучшить сгорание ПУТ, но и уменьшить «охлаждающий» эффект от его вдувания, может быть предварительный нагрев угольной пыли. Специалисты Kuttner – ведущей компании по проектированию и строительству установок вдувания ПУТ – считают, что предварительный нагрев пыли в будущем будет играть заметную роль в совершенствовании технологии[9].

На наш взгляд, опираясь на зарубежный опыт, следует сконцентрировать внимание не на уменьшении основности шлака, а на других, более действенных компенсирующих ресурсах – на повышении металлургических качеств кокса и железорудного сырья, внедрении современных систем отсева мелочи и загрузки шихты в печь.

Выводы

Показано, что в характерных для доменного производства Украины сырьевых условиях переход с технологии использования природного газа на технологию вдувания угольной пыли часто сопровождался снижением нагрева чугуна. Приведенные в работе данные свидетельствуют о том, что одной из предпосылок понижения нагрева чугуна при вдувании ПУТ могло быть недостаточно обоснованное использование в качестве компенсирующего ресурса уменьшение основности шлака.

Зарубежный опыт показывает, что в доменных печах с высоким расходом ПУТ снижение основности шлака в качестве компенсирующе-

го ресурса не используется. Более того принимаются меры по повышению основности агломерата и, соответственно, повышению тугоплавкости первичных шлаков. Поэтому целесообразность использования сниженной основности в качестве компенсирующего ресурса требует дополнительного изучения, а возможно, и пересмотра.

Библиографический список

1. Ярошевский С. Л. Пылеугольное топливо – реальная и эффективная альтернатива природному газу в металлургии / С. Л. Ярошевский // Металл и литье Украины. – 2006. – № 3. – С. 15–20.

2. Влияние шлакового и дутьевого режимов работы доменной печи на температуру выпускаемого чугуна / Г. Ю. Крячко, Ю. В. Беляев, Ю. К. Лебедь, Л. А. Сафина-Валуева // Збірник наукових праць Дніпродзержинського державного технічного університету. – Дніпродзержинськ: ДДТУ, 2012. – Вип. I (18). – С. 3 9.

3. Исследование тепловых потерь в доменной печи при вдувании в горн пылеугольного топлива / В. И. Андреев, А. В. Поздняков, Ю. Л. Курбатов [и др.] // Металл и литье Украины. – 2014. – № 7. – С. 3–9.

4. Климанчук В. В. Технология и эффективность замены природного газа и части кокса пылеугольным топливом в ПАО «ММК им. Ильича» / В. В. Климанчук, С. Л. Ярошевский // Черная металлургия. – 2014. – № 8. – С. 17–25.

5. Атлас шлаков: справ. изд. / пер. с нем. – М.: Металлургия, 1985. – 208 с.

6. Долматов В. А. Вдувание пылеугольного топлива на пороге нового столетия / В. А. Долматов // Новости черной металлургии за рубежом. – 2001. – № 2. – С. 46–47.

7. Интенсификация вдувания пылеугольного топлива в доменные печи завода Корус Эймейден / Б. Параманатан, П. Коол, Х. Токсопеус, Х. ван ден Берг // Сталь. – 2003. – № 2. – С. 30–32.

8. Близнюков А. С. Доменное производство Японии в новом столетии, исследования и технические разработки / А. С. Близнюков // Новости черной металлургии за рубежом. – 2007. – № 4. – С. 22–31.

9. Шоот Р. Оптимизированная технология вдувания пылеугольного топлива в доменную печь / Р. Шоот // Черные металлы. – 2013. – № 6. – С. 33–44.

Поступила 01.03.2016