

РОЗДІЛ «МЕТАЛУРГІЯ. ЗВАРЮВАННЯ»

УДК 669.162

КРЯЧКО Г.Ю., к.т.н., доцент
МАСТЕРОВЕНКО Е.Л., к.т.н., доцент
РАК М.Н.*, магистр

Днепродзержинский государственный технический университет
ПАО «Интерпайп Сталь»*

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОСТИ ДОМЕННОГО ПРОЦЕССА, ОБУСЛОВЛЕННОЙ ПЕРИОДИЧНОСТЬЮ ВЫПУСКОВ ПРОДУКТОВ ПЛАВКИ

Введение. Известно [1], что периодичность выпусков расплавов из доменной печи вызывает нестационарность температурных полей по высоте рабочего пространства агрегата. Поскольку штатной ситуацией является осуществление выпуска чугуна поочередно через разные чугунные летки, ранее не возникало вопросов, связанных с необходимостью оценить нестационарность температурных полей по окружности печи. Современная практика эксплуатации печей и оборудования литейного двора, связанная с относительно низкой стойкостью желобных масс, предусматривает работу леток в режиме чередования через определенный промежуток времени, чаще всего через сутки. Такой режим отработки продуктов плавки, очевидно, должен сопровождаться значительной деформацией температурных полей по окружности печи, поскольку меняется характер накопления и дренажа расплавов.

Постановка задачи. Задачей настоящего исследования является изучение нестационарности доменного процесса, обусловленной вынужденным режимом отработки продуктов плавки, более конкретно, оценка деформации температурных полей и работы воздушных фурм по окружности печи. Задача является актуальной, так как неравномерность работы фурм и газораспределения по окружности печи оказывает влияние на конечные результаты плавки – производительность и удельный расход топлива.

Результаты работы. Объекты и методика исследования. Исследование проводили на доменных печах ОАО «ДМКД» полезным объемом 1500 м³ (ДП №1М) и 1754 м³ (ДП №8), отличием которых является наличие диаметрально расположенных двух чугунных леток. От типовых печей ДП № 1М отличается большими на 800 мм высотой горна и на 250 мм глубиной зумпфа, число воздушных фурм доведено до 20 против 18. На ДП №8 на 100 мм увеличен диаметр горна и на 400 мм его высота по сравнению с типовой печью объемом 1719 м³. На печи установлено 20 фурм.

Методика исследования состоит в изучении изменения температуры кладки секторов верхней части шахты, расположенных над отдельными чугунными летками при варьировании режима отработки продуктов плавки. В каждом секторе было установлено 3-4 термопары, измерения которых усреднялись. Усреднение за периоды исследований производили также по нагреву чугуна и основности шлака.

Оценку влияния уровня зеркала шлака на состояние фурменных очагов производили с помощью кинофотосъемки через гляделку подвижного колена устройств для ввода дутья в доменную печь.

На рис.1 приведены результаты исследования распределения температур кладки шахты в секторах, расположенных над чугунными летками ДП №1М. Первый период 02.02.-06.02.2011г. (рис.1, а) характеризуется чрезмерной окружной неравномерностью (перепад температур между «горячим» и «холодным» секторами шахты составил от 40 до 110°С).

Через летки №1 (ЧЛ1) и №2 (ЧЛ2) в указанный период было выпущено одинаковое количество шлака, однако через летку №1, расположенную под «горячим» сектором было выдано на 3,4% больше металла. Представляет интерес тот факт, что этот чугун имел меньшее содержание кремния (0,70%) и температуру $t_{ч}$ (1484°С), чем металл

из летки под «холодным» сектором Si – 0,78 т_ч = 1496°C (табл.1). Основность сопутствующего шлака (CaO + MgO/SiO₂), выпущенного из летки № 2, расположенной под «холодным» сектором, была выше: 1,38 против 1,36.

Таблица 1 – Усредненные данные о нагреве продуктов плавки при поочередной работе чугунных леток и различной неравномерности окружного газораспределения на доменной печи №1М ПАО «Днепропетровский металлургический комбинат»

Опытный период	Время работы летки	Номер летки	Температура чугуна, °С	Содержание Si в чугуне, %	(CaO+MgO)/SiO ₂ шлака
02.02.2011-06.02.2011	с 13 ⁰⁰ по 15 ⁰⁰ 02.02.11 03.02.11	2	1508	0,95	1,42
	с 17 ¹⁰ по 17 ⁰⁰ 03.02.11 04.02.11	1	1486	0,75	1,36
	с 19 ¹⁰ по 17 ¹⁵ 04.02.11 05.02.11	2	1485	0,62	1,35
	с 19 ²⁵ по 19 ¹⁵ 05.02.11 06.02.11	1	1483	0,64	1,36
	В среднем по леткам за период				
		1	1484	0,70	1,36
	2	1496	0,78	1,38	
01.04.2011-05.04.2011	с 12 ⁰⁰ по 9 ⁰⁰ 01.04.11 02.04.11	2	1517	0,84	1,35
	с 12 ⁰⁰ по 9 ⁰⁰ 02.04.11 03.04.11	1	1507	0,76	1,35
	с 12 ⁰⁰ по 9 ⁰⁰ 03.04.11 04.04.11	2	1502	0,57	1,35
	с 12 ⁰⁰ по 21 ⁰⁰ 04.04.11 05.04.11	1	1497	0,61	1,36
	В среднем по леткам за период				
		1	1502	0,68	1,36
	2	1509	0,70	1,35	

Второй период исследований на ДП №1М (01.04.-05.04.2011) отличается незначительной окружной неравномерностью распределения температур верха шахты (рис.1, б) – разница средних температур между «холодным» и «горячим» секторами не превышает 20°C. В таких условиях разница масс продуктов плавки, выданных через отдельные чугунные летки, увеличилась. Через летку №1 под «горячим» сектором было выпущено шлака на 5,7%, а чугуна на 18,2% больше, чем через летку №2, расположенную под «холодным» сектором. Вероятно, это произошло по причине лучшей дренажной способности коксовой насадки в центральной и промежуточной зонах «горячего» сектора. Как и в ранее рассмотренном периоде работы печи чугун, выпущенный под «горячим» сектором, содержит немного меньше кремния – 0,68% против 0,70% и имеет пониженную температуру 1502°C против 1509°C. Основность шлака из обеих леток отличается мало (~1,35-1,36).

На ДП №8 в период с 02.02. по 06.02.2011 г. также заметно отличается температура секторов шахты над чугунными летками (рис.2, а). В отличие от ДП №1М переход отработки продуктов плавки через очередную летку сопровождается характерным падением и возрастанием температуры, главным образом в «горячем» секторе. Неравномерность газораспределения по окружности верха шахты значительная – разница температур между опытными секторами достигает 170°C.

Нетрудно видеть, что переход отработки продуктов плавки на очередную летку сопровождается характерными изменениями в нагреве секторов верха шахты – темпе-

ратура в «горячем» секторе, расположенном над леткой №2, снижается и весьма значительно, особенно 2.02. и 3.02.2011. Обнаруженная нестационарность доменного процесса требует дальнейшего изучения.

Шлака из чугуна из летки №2, расположенной под «горячим» сектором, выдано на 5% больше, а чугуна на 1% меньше, чем через летку №1. Если размах колебаний температуры ограждения шахты в «холодном» секторе составил примерно 100°C, то в «горячем» – 240°C.

Апрельский период работы ДП №8 характеризуется уменьшением окружной неравномерности газораспределения (рис.2, б). Несколько уменьшился размах колебаний в «горячем» секторе (до 215°C) и «холодном» (до 65°C). В условиях пониженной окружной неравномерности температурного поля через летку №2 выпущено шлака на 7,9% больше, а чугуна на 0,4% меньше, чем через летку №1 под «холодным» сектором.

В период работы с развитой окружной неравномерностью температурного поля (февраль 2011 г.) чугун из летки №2 химически и физически менее прогретый, чем из летки №1. Среднее содержание Si в нем составило 0,74% против 0,81, а средняя температура – 1465°C против 1472°C (табл.2). При этом шлак из второй летки имеет более высокоосновность (CaO + MgO/SiO₂) – 1,40 против 1,37 для шлака первой летки.

При снижении окружной неравномерности распределения температур в шахте (апрель 2011 г.) шлак ЧЛ2 имеет меньшую основность(1,36 против 1,38), а чугун – большее содержание Si (0,67% против 0,62%). Температура металла, выпущенного через обе летки, практически одинаковая: 1474 и 1476°C.

Таблица 2 – Усредненные данные о нагреве продуктов плавки при поочередной работе чугунных леток и различной неравномерности окружного газораспределения на доменной печи № 8 ПАО «Днепропетровский металлургический комбинат»

Опытный период	Время работы летки	Номер летки	Температура чугуна, °C	Содержание Si в чугуне, %	(CaO+MgO) SiO ₂ шлака
02.02.2011- 06.02.2011	с 9 ⁴⁵ по 8 ³⁰ 02.02.11 03.02.11	1	1478	1,03	1,36
	с 13 ⁴⁵ по 8 ¹⁵ 03.02.11 04.02.11	2	1469	0,64	1,45
	с 10 ³⁰ по 9 ¹⁵ 04.02.11 05.02.11	1	1467	0,59	1,38
	с 12 ³⁰ по 8 ¹⁰ 05.02.11 06.02.11	2	1461	0,83	1,34
	В среднем по леткам за период				
			1	1472	0,81
		2	1465	0,74	1,40
01.04.2011- 05.04.2011	с 8 ³⁰ по 7 ¹⁰ 01.04.11 02.04.11	1	1489	0,72	1,38
	с 10 ⁰⁰ по 11 ³⁰ 02.04.11 03.04.11	2	1496	0,91	1,37
	с 14 ²⁰ по 7 ²⁰ 03.04.11 04.04.11	1	1464	0,51	1,37
	с 10 ¹⁰ по 8 ⁵⁰ 04.04.11 05.04.11	2	1453	0,43	1,35
	В среднем по леткам за период				
			1	1476	0,62
		2	1474	0,67	1,36

Результаты наших исследований подтверждают ранее обнаруженное [2] явление вертикальной нестационарности доменного процесса, заключающееся в обратной зави-

симости между нагревом горна и температурой в шахте. Причина кажущегося противоречия объясняется особенностями протекания окислительно-восстановительных процессов в горне: температура в шахте повышается в результате окисления элементов чугуна на фурмах и выносе выделенного при окислении тепла с фурменным газом: в то же время горн охлаждается в результате прямого эндотермического восстановления продуктов окисления.

В настоящем исследовании активная работа воздушных фурм под «горячим» сектором шахты сопровождалась интенсивным окислением элементов чугуна, охлаждением горна и локальным разогревом материалов в шахте. В секторе горна, где фурмы принимают дутья больше, продуктов плавки образуется также больше, особенно на ДП №1М. Однако нагрев выпущенных расплавов ниже из-за эндотермического довосстановления оксидов. Под «холодным» сектором шахты, где вынос тепла вверх меньше из-за уменьшенного приема дутья фурмами, тепла на довосстановление оксидов элементов, требуется меньше, благодаря чему продукты плавки имеют повышенный нагрев.

Таким образом, установлено, что по выданному объёму расплавов «горячий» сектор доменной печи превалирует над «холодным», однако вид расплава, по которому доминирует «горячий сектор», на исследованных печах оказался разным. Так, если на ДП 1М этим расплавом является чугун, то на ДП 8 – шлак.

Для выяснения причин указанного различия проанализировали конструктивные элементы доменных печей, влияющие на состояние коксовой насадки и расплавов в горне (табл.3), откуда видно, что ДП1М, построенная по современному проекту, обладает конструктивными преимуществами по сравнению с ДП 8.

Таблица 3 – Характеристики профиля доменных печей №1М и №8 Днепровского металлургического комбината

Размер, показатель	Номера доменных печей	
	1М	8
Горн, м: диаметр d_r	8,6	9,2
высота h_r	4,0	3,6
Относительная высота горна $h_{гв}^*$, %	17	15
Количество воздушных фурм	20	20
Расстояние между осями воздушных фурм по окружности горна, м	1,35	1,44
Площадь горна, приходящаяся на одну воздушную фурму, m^2	2,91	3,32

* $h_{гв} = h_r / h_{пр} \cdot 100$, где $h_{пр}$ – высота противоточной области печи;

$h_{пр} = h_3 + h_{ш} + 1/2h_k$, где h_3 , $h_{ш}$, h_k –высоты заплечиков шахты и колошника.

Так, имея меньшее расстояние между осями фурм по окружности горна и удельную площадь горна, приходящуюся на одну фурму, ДП 1М обладает лучшими условиями для прогрева коксовой насадки и дренажа расплавов в ней. При одинаковых сырьевых условиях и основности шлака чугун на ДП 1М более прогрет, чем на ДП 8 (табл.1, 2). Более глубокий горн ДП 1М позволяет уменьшить влияние остаточного шлака на выпуск продуктов плавки.

Изучение состояния фурменных очагов в характерные периоды, связанные с циклом «накопление продуктов плавки – выпуск», проводили на ДП №1М. Для оценки влияния наполнения горна расплавами на развитие очагов горения кино- и фотосъемку проводили перед выпуском, в середине выпуска и после закрытия чугунной летки.

В качестве контрольных воздушных фурм (ВФ) выбрали «активные» ВФ №11 и 17, через которые вследствие конструктивных особенностей оборудования доменной печи поступало наибольшее количество дутья. Наименее активной работой в период

исследований отличалась «пассивная» фурма №3, которую также выбрали в качестве контрольной.

Для анализа выбрали характерные выпуски, отличавшиеся степенью наполнения горна расплавами. При выпуске по графику значительного ухудшения состояния фурменных очагов не наблюдалось, несмотря на повышенный уровень зеркала шлака, на что указывала особенность работы «пассивной» ВФ №3. Эта фурма работала достаточно активно, однако подпор мелочи кокса снизу расплавом шлака привел к активному «выметанию» мелочи из так называемого «птичьего гнезда».

В середине выпуска в фурменный очаг «пассивной» фурмы из неустойчивого свода прифурменной полости интенсивно поступал кокс. После закрытия летки работа ВФ №3 активизировалась, однако кокс, поступающий в прифурменную полость перед ней, был прогрет менее, чем перед «активной» ВФ №7, и был заметно мельче.

Выпуск чугуна с нарушением графика отличается от планового выпуска снижением активности всех воздушных фурм, обусловленным переполнением горна расплавами. Перед «пассивной» ВФ №3 перед открытием летки наблюдалось в основном слоевое горение кокса. В середине выпуска ВФ №3 работала достаточно активно, однако после закрытия летки в прифурменную полость поступил неподготовленный железорудный материал.

«Активная» ВФ №11 при всех режимах движения коксовой насадки работала с образованием прифурменной полости. Было обращено внимание на попадание в полость мелкого, хорошо прогретого кокса после закрытия летки. Также следует отметить то, что кроме этого случая, кокс, приходящий в фурменные очаги «активных» фурм, был более крупным. Возможно, это связано с более интенсивной газификацией коксовой мелочи в развитых зонах горения. Результаты наблюдений показали, что периодическое вертикальное перемещение продуктов плавки и коксовой насадки, вызванное накоплением и выпуском расплавов, оказывает большое влияние на работу «пассивных» воздушных фурм и, соответственно, создает предпосылки для увеличения окружной неравномерности движения материалов и газов.

Выводы. Подтверждено существование вертикальной нестационарности доменного процесса, заключающееся в обратной зависимости между нагревом горна и температурой в шихте – «горячему» сектору верха шахты соответствуют продукты плавки пониженного нагрева.

Обнаружена разновидность нестационарности доменного процесса, обусловленная вынужденным режимом поочередной работы диаметрально размещенных чугунных леток с интервалом перехода, равным суткам.

Показано, что увеличение числа воздушных фурм и углубление горна являются факторами, способствующими лучшему прогреву коксовой насадки и продуктов плавки.

Установлено, что периодическое движение продуктов плавки и коксовой насадки в горне, вызванное выпуском расплавов, оказывает большее влияние на работу малоактивных воздушных фурм, чем создает предпосылки для увеличения окружной неравномерности движения материалов и газов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Нестационарные процессы и повышение эффективности доменной плавки / [Овчинников Ю.Н., Мойкин В.Н., Спиринов Н.А., Боковиков Б.А.]. – Челябинск: Металлургия. Челябинское отделение, 1989. – С.120.
2. Исследование взаимосвязи между температурой в шахте доменной печи и параметрами процесса/ Б.П.Довгалюк, А.И.Парфенов, Н.М.Ярошенко, И.Л.Колесник // Сталь. – 1975. – №12. – С.1073-1075.

Поступила в редакцию 05.06.2012.