

зы (вниз) для увеличения тока дуги (сокращения длины дуги).

При  $\sigma(\tau) = 0$  электрод останавливается в зоне оптимального значения тока на заданное время выдержки  $\tau_B = 5 \div 10 T_{II}$  для накопления заметного отклонения текущего режима от оптимального.

При  $\sigma(\tau) = -1$  электрод перемещается вверх для уменьшения величины рабочего тока  $I_p(\tau)$  (увеличения длины дуги).

Если статическая характеристика энергетического режима ДСП  $P_\partial(\tau) = f[I_p(\tau)]$  при выбранной ступени напряжения питания в окрестности экстремума может быть аппроксимирована параболой (обычно погрешность при этом не превышает 4–5%), то справедливо следующее соотношение:

$$\begin{aligned} J &= K_{II} (I_{опт} - I_{p0}) = \Delta I \cdot K_{II} = \\ &= K_{II} \cdot \sigma(\tau) \cdot K_{II} \cdot \Delta \tau_p, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $K_{II}$  – коэффициент пропорциональности, определяемый экспериментально или расчетным путем, являющийся динамическим параметром настройки

оптимизирующего алгоритма, программно реализуемого системой автоматической оптимизации (САО) управления энергетическим режимом.

При известном значении  $J$  и постоянной скорости перемещения электрода  $K_{II}$  можно определить ориентировочно продолжительность рабочего цикла направленного перемещения электрода для достижения оптимального режима  $\Delta \tau_p$ :

$$\Delta \tau_p = \frac{J}{K_{II} \sigma(\tau) K_{II}}. \quad (5)$$

Расчетные траектории изменения  $P_\partial(\tau)$  и  $I_p(\tau)$  в процессе оптимизирующего поискового режима при функционировании рассматриваемого метода представлены на рис. 3 и 4.

Рассмотренный алгоритм позволяет обеспечить выход с момента зажигания дуги на оптимальный режим за один рабочий цикл.

В зависимости от используемого критерия управления САО способна увеличить производительность печи на 5÷9% при сокращении расхода электродов на 1,4% и при одновременном снижении расхода электроэнергии на 1% [7].

#### Библиографический список

1. Марков Н.А. Электрические цепи и режимы дуговых электропечей. М.: Энергия, 1975. 130 с.
2. Ефроймович Ю.Е. Оптимальные электрические режимы дуговых сталеплавильных печей. М.: Metallurgizdat, 1956. 98 с.
3. Энерготехнологические особенности процесса электроплавки стали и инновационный характер его развития / Смоляренко В.Д., Девитайкин А.Г., Попов А.Н., Бесчаснова М.А. // Электрометаллургия. 2003. № 12. С. 12–19.
4. Глинков Г.М., Косырев Д.Н., Шевцов Е.К. Контроль и автоматизация металлургических процессов: Учебник для вузов. М.: Metallurgiya, 1989. 352 с.
5. Информационные системы в металлургии: Учебник для вузов / Спирин Н.А., Ипатов Ю.В., Лобанов В.Н. и др. Екатеринбург: УПИ, 2001. 617 с.
6. Андреев С.М., Ахметов У.Б., Бушманова М.В. Непрерывное измерение температуры жидкого металла в промышленных агрегатах и установках внепечной обработки стали // Энергосбережение, теплоэнергетика и металлургическая тепло-техника: Межвуз. сб. науч. тр. Магнитогорск: МГТУ, 2003. С. 53–57.
7. Исследование целесообразности использования системы автоматической оптимизации управления энергетическим режимом ДСП / Парсункин Б.Н., Андреев С.М., Ишметьев Е.Н., Писаревский Д.А. // Автоматизация технологических и производственных процессов в металлургии: Межвуз. сб. науч. тр. Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2006. С. 87–96.

УДК 669.054.83

Сibaгатуллин С.К., Майорова Т.В., Полинов А.А.

## О ВЛИЯНИИ ИЗМЕНЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ СОСТОЯНИЯ ГАЗА НА ВЕЛИЧИНУ ЕГО РАБОТЫ В ДОМЕННОЙ ПЕЧИ

В июле 2007 г. в доменном цехе ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» осуществлялся переход с офлюсованных окатышей ССППО на неофлюсованные. Это происходило при изменении других условий в работе цеха.

В целом по доменному цеху изменения ос-

новных показателей в связи с переходом от офлюсованных окатышей (ОФ) к неофлюсованным (НФ) были следующими (табл. 1).

С учётом сокращения содержания кислорода в дуге прирост удельной производительности по цеху, обусловленный переходом от ОФ к НФ, со-

Таблица 1

Основные показатели по доменному цеху

Показатель	ОФ	НФ	Изменение
Удельная производительность, т/м <sup>3</sup>	2,261	2,288	+ 1,19%
Расход кокса, кг/т чугуна	449,9	443,3	- 6,6
Расход природного газа, м <sup>3</sup> /т чугуна	100,8	100,8	0
Всего расход топлива-восстановителя, кг/т чугуна	523,5	516,9	- 6,6
Содержание кислорода в дутье, %	26,4	25,9	-0,5% абс

Таблица 2

Основные показатели работы доменной печи № 1 по периодам

Наименование показателя	Периоды	
	ОФ	НФ
Производительность, т/сут	3526	3478
Удельный расход кокса (сухого, скипового), кг/т чугуна	439,5	429,4
Удельный расход всего топлива, кг/т чугуна	507,4	499,6
в том числе природного газа, м <sup>3</sup> /т чугуна	93,0	96,1
Рудная нагрузка, т/т	3,775	3,789
Простои, % к номинальному времени	1,04	0,29

период	температура, °С
ОФ	566
НФ	620

ставляет 2,24%, а с учётом действия стабилизированного агломерата он оказался равным 1,43%, несмотря на значительное ухудшение качества кокса.

Снижение удельного расхода кокса с учётом влияния стабилизированного агломерата равно 4,8 кг/т чугуна.

В целом по коксохимическому производству показатель М10 при применении офлюсованных окатышей ССГПО составлял 8,81, а неофлюсованных – 8,90%; показатель М25 равнялся 85,46 и 84,71% соответственно. Основность агломерата по CaO/SiO<sub>2</sub> была повышена в среднем с 1,65 до 1,9.

Основные показатели работы доменной печи №1 в режиме перехода к реализации технологии доменной плавки на неофлюсованных окатышах ССГПО представлены в табл. 2.

Удельный расход кокса после полной замены офлюсованных окатышей ССГПО на неофлюсованные уменьшился на 10,1 кг/т чугуна, а всего топлива-восстановителя – на 7,8 кг/т чугуна (см. табл. 2).

Фактическое снижение производительности по сравнению с периодом работы на офлюсованных окатышах составило 1,36%, в то время как ухудшение качества кокса уменьшало её на 2,18%. За счёт применения неофлюсованных окатышей было обеспечено приращение производства чугуна на 0,82%.

Средняя за 30 сут температура колошниково-го газа, замеренная по газоотводам, уменьшилась на 4 град, а уровень максимальной температуры в них снизился на 3 град. Различия в температурах по газоотводам сократилось с 90 до 79 град:

номер газоотвода	температура по периодам, °С	
	ОФ	НФ
1	311	229
2	310	308
3	225	248
4	221	256

Изменения в температурах колошниково-го газа свидетельствуют об улучшении тепловой работы печи на неофлюсованных окатышах.

Температура периферийных газов по точкамверху шахты по периодам составила:

номер сектора по окружности	температура по периодам, °С	
	ОФ	НФ
1	747	733
2	617	596
3	684	735
4	510	574
5	367	525
6	467	556

Средняя температура периферийных газов по периодам составила:

Температуры в точках 1 и 2 с высокими значениями уменьшились, а в точках 4, 5, 6 с низкими значениями возросли. Интервал изменения температур по окружности снизился с 380 до 210 град, то есть в 1,8 раза.

Более ровная работа печи по окружности на неофлюсованных окатышах способствовала улучшению результатов плавки. Кроме того, интервал температур 525–735°С на неофлюсованных окатышах более благоприятен для службы футеровки, чем 367–747°С на офлюсованных.

Температура по показаниям радиальной балки в периферийной точке 12 по периодам составила: 307 (ОФ) и 231°С. Эти данные свидетельствуют о самопроизвольном повышении загрузки периферии железорудным сырьём с переходом на неофлюсованные окатыши, что также обеспечивает улучшение результатов плавки.

Основные показатели газодинамического режима работы печи по периодам видны из табл. 3.

На неофлюсованных окатышах печь работала достаточно ровно при более высоком общем перепаде давления газа, при более высокой степени уравновешивания шихты подъёмной силой газового потока и при повышенном коэффициенте сопротивления шихты движению газов в нижней части печи.

Увеличение общего перепада давления газов составило 6 кПа, степени уравнивания шихты – 1,6% абс. при следующем изменении общего коэффициента сопротивления шихты движению газов, %:

- на колошнике – снижение на 0,4;
- в распаре – рост на 4,3;
- в горне – рост на 1,6.

Верхний перепад давления газов снизился на 2,7% благодаря улучшению газопроницаемости, чему способствовало меньшее разрушение неофлюсованных окатышей при восстановлении. Нижний перепад давления газов увеличился на 5,9% вследствие смещения процессов восстановления к низу печи и в область более высоких температур. Такое смещение является общей закономерностью для развития технологии доменной плавки с улучшением качества железорудного сырья.

Рассмотрели изменение внутренней энергии доменной печи в условиях применения офлюсованных и неофлюсованных окатышей.

Внутренняя энергия системы включает в себя кинетическую энергию поступательного движения частиц, потенциальную энергию вращательного движения частиц, кинетическую и потенциальную энергию колебательного движения атомов в молекулах.

Молекулы идеального газа можно рассматривать как абсолютно упругие шары исчезающего малого размера, поэтому внутренняя энергия иде-

ального газа есть кинетическая энергия беспорядочного движения молекул.

Внутренняя энергия системы является функцией состояния и полностью определяется параметрами состояния системы (в частности, температурой) и не зависит от пути процесса перехода системы из начального состояния в конечное.

Энергия дутья и подводимое тепло обеспечивают протекание процессов в доменной печи, вызывают изменение внутренней энергии системы и совершение работы.

В зависимости от характера процесса изменения внутренней энергии системы может быть разное соотношение между теплом и работой, которые в отличие от внутренней энергии не являются функциями состояния системы и зависят от пути процесса.

Действительно, движущиеся газы совершают работу, преодолевая сопротивление столба шихты, и чем больше сопротивление, тем больше величина работы, совершаемой системой.

Считая, что газы в доменной печи подчиняются закону для идеального газа [1], на основании первого начала термодинамики для бесконечно малого количества тепла запишем:

$$dq = dU + dA,$$

где  $dq$  – бесконечно малое количество тепла;  $dU$  – бесконечно малое изменение внутренней энергии;  $dA$  – бесконечно малая работа.

Учитывая, что система совершает работу только против внешнего давления, запишем [2]

$$dA = PdV, \text{ тогда} \\ dq = dU + PdV. \tag{1}$$

Работа равновесного изобарического расширения или сжатия идеального газа при изменении объема от  $V_1$  до  $V_2$  равна

$$A = \int_{V_1}^{V_2} PdV,$$

где  $P$  – внешнее давление.

В этом случае поступающее тепло полностью расходуется на совершение работы.

С помощью уравнения состояния идеального газа выразим давление через объем и температуру

$$A = \int_{V_1}^{V_2} PdV = \int_{V_1}^{V_2} \frac{nRT}{V} dV = nRT \ln \frac{V_2}{V_1},$$

с учетом того, что

$$P_1V_1 = P_2V_2,$$

Таблица 3

Показатели газодинамического режима печи по периодам

Наименование показателя	Периоды		
	ОФ	НФ	
Общий перепад давления газа, кПа	116	122	
Степень уравнивания шихты подъемной силой газового потока, %	45,9	47,5	
Скорость газа на пустое сечение печи в рабочих условиях по температуре и давлению, м <sup>3</sup> /с:	на колошнике	1,76	1,85
	в распаре	1,54	1,57
	в горне	2,40	2,43
Динамический напор газа на пустое сечение печи в рабочих условиях по температуре и давлению, н/м <sup>2</sup> :	на колошнике	2,33	2,49
	в распаре	0,96	0,97
	в горне	1,24	1,30
Коэффициент сопротивления шихты движению газа:	на колошнике	1113	1108
	в распаре	11730	12237
	в горне	6640	6745

Таблица 4

**Работа изменения параметров состояния газов в доменной печи**

окончательно работу идеального газа без химических и иных превращений, сопровождающихся изменением внутренней энергии, определим по формуле

$$A = nRT \ln \frac{P_1}{P_2}, \quad (2)$$

где  $n$  – количество молей;  $R$  – газовая постоянная.

В результате протекания большинства реакций в доменной печи (горение кокса и природного газа, восстановление железа) происходит изменение количества газообразных веществ.

Работу образующихся газов определим по формуле

$$A = (n_2 - n_1)RdT \approx \Delta nRT_1 + \Delta nR(T_2 - T_1), \quad (3)$$

где  $n_1, n_2$  – число молей газообразных веществ в начале и в конце процесса;  $T_1, T_2$  – соответственно температура твердых и газообразных компонентов.

Оценили работу изменения параметров состояния газов в доменной печи при переходе с офлюсованных окатышей на неофлюсованные. Сравнимые периоды имеют длительность по 30 сут.

Полученные результаты представлены в табл. 4.

Таким образом, основными видами являются: работа, совершаемая в результате образования газов при горении кокса и природного газа; работа всего газового потока при движении через слой шихтовых материалов.

В период работы доменной печи на неофлюсованных окатышах величина работы газов, образующихся при горении кокса и природного

Вид работы в доменной печи	Работа, МДж/т чугуна		%	
	ОФ	НФ	ОФ	НФ
1. Образование СО при горении углерода кокса	194,86	192,58	16,85	16,20
2. Образование СО и Н <sub>2</sub> при горении природного газа	239,61	233,05	20,72	19,60
3. Образование СО при прямом восстановлении железа	70,62	62,34	6,11	5,24
4. Образование СО при восстановлении примесей чугуна	9,35	10,36	0,81	0,87
5. Переход кислорода из шихтовых материалов в газ	134,67	138,60	11,65	11,66
6. Переход летучих кокса в газ	11,62	11,62	1,00	0,97
7. Работа, соответствующая снижению давления природного газа, поступающего в поток дутья	7,35	7,25	0,64	0,61
8. Работа всего газового потока при движении через слой шихтовых материалов	488,21	533,21	42,22	44,85
Всего:	1156,29	1189,01	100	100

газа, уменьшилась на 8,84 МДж/т чугуна (2,03%), что говорит о более эффективном использовании топлива-восстановителя.

Работа газового потока при движении через слой шихтовых материалов в этот период увеличилась на 45 МДж/т чугуна (9,21%), следовательно, более эффективно используется его тепло для процессов восстановления.

**Библиографический список**

1. Цымбал В. П. Математическое моделирование металлургических процессов. М.: Металлургия, 1986. 240 с.
2. Андрущенко А. И. Основы технической термодинамики реальных процессов. М.: Высш. шк., 1975. 264 с.
3. Евстигнеев В. Л., Почвайтис В. С. Учет затрат тепла на газообразование в закрытой системе при составлении теплового баланса доменной плавки // *Сталь*. 2004. № 4. С. 18–19.

УДК 621.746.5.047:669.14.063.8:537.86

Великий А.Б., Казаков А.С., Филиппова В.П., Алексеев А.Г.

**ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПЕРЕМЕШИВАНИЯ НА СТРУКТУРУ И ХИМИЧЕСКУЮ НЕОДНОРОДНОСТЬ СОРТОВОЙ НЕПРЕРЫВНОЛИТОЙ ЗАГОТОВКИ**

В настоящее время электромагнитное перемешивание (ЭМП) жидкого металла на машинах непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) является неотъемлемой частью прогрессивной технологии получения высококачественного металла. Наибо-

лее широко устройства для ЭМП применяются на сортовых МНЛЗ, что объясняется меньшими размерами поперечного сечения отливаемой заготовки. Эти устройства могут размещаться в различных частях машины в зависимости от решаемых