



Егоров К. В.
НТУУ «КПИ»



Богушевский В. С.
НТУУ «КПИ»

Исследование электрофизических свойств конвертерных фаз и их связь с технологическим процессом

Проанализированы методы управления процессами обезуглероживания ванны сталеплавильного агрегата. Исследована возможность автоматического контроля и управления скоростью обезуглероживания металла. Изучена информация о процессе обезуглероживания ванны конвертера. Ил. 1. Библиогр.: 10 назв.

Ключевые слова: конвертер, скорость, система, процесс, метод, параметр, углерод, результат, температура, ванна, термодинамика, эксперимент, газ

Methods for control of decarburization of steelmaking vessel pool are analyzed. The possibility of automatic monitor and control of decarburization rate of metal is investigated. Information concerning decarburization process of converter pool is studied.

Keywords: converter, rate, system, process, method, parameter, carbon, result, temperature, pool, thermodynamics, experiment, gas

Ванна кислородного конвертера, как многосвязный объект управления, является трехфазной, многокомпонентной термодинамической системой, в которой на фоне турбулентного переноса проходят взаимосвязанные тепло-массообменные, гидродинамические, химические и другие необратимые явления. Современный уровень развития измерительной техники не позволяет в агрессивной высокотемпературной среде проводить прямой контроль скорости прохождения физико-химических процессов, которые определяют управляемые координаты объекта – температуру и содержание углерода в металле [1].

Известно большое количество методов контроля параметров ванны. Методы основаны на законах термодинамики [2], кинетики [3], использовании статистических зависимостей [4]. Как правило, известные методы являются достаточно сложными, характеризуются отсутствием обратной связи от хода процесса, приводят к удовлетворительным результатам только в узком диапазоне изменения начальных и конеч-

ных параметров процесса. Часто эти методы позволяют контролировать только один выходной параметр – содержание углерода в ванне [5] или ее температуру [6].

Таким образом, использование известных методов приводит к ошибкам в результатах измерения и, как следствие, к неоптимальному управлению конвертерной плавкой.

Важнейшими элементами АСУТП являются прогнозирующие фильтры, позволяющие получать информацию об управляемых параметрах процесса без прямого измерения последних. Основные требования к прогнозирующим фильтрам – надежность, отсутствие случайного дрейфа, простота в эксплуатации. Среди косвенных измерений наиболее исследованы носители информации о ходе продувки – параметры отходящего газа.

Приведенные в статье исследования проводились в Национальном техническом университете Украины «КПИ» по теме «Управление конвертерной плавкой в условиях неполной информации о начальных и конечных условиях

продувки», Государственный регистрационный номер 0114U005002.

Постановка задачи

Целью исследований является непрерывное получение информации о ходе конвертерного процесса по электрофизическим параметрам продуктов плавки.

Результаты исследований

Электрофизические параметры факела исследовались нами на 160-тонном конвертере с помощью двойного водоохлаждаемого зонда, установленного в верхней зоне кессона. Конструктивно чувствительный элемент датчика выполнен в виде двух параллельных цилиндрических электродов, которые входили в ядро факела. Линейная плотность электрической проводимости пламени χ , См/м, находилась из соотношения

$$\chi = [R(d + \pi l / \operatorname{arch} D / d)]^{-1}, \quad (1)$$

где R – электрическое сопротивление межэлектродного промежутка, Ом; $d = 0,05$; $l = 0,8$; $D = 0,15$ – соответственно диаметр и длина электродов, расстояние между последними, м.

Статистической обработкой данных экспериментального массива получена зависимость скорости обезуглероживания ванны от линейной плотности электрической проводимости пламени (коэффициент корреляционного отношения $\eta = 0,59$, среднеквадратическое отклонение $\sigma = 0,009$ %/мин, достоверность коэффициента корреляции $P > 0,950$)

$$v_c = \alpha_1 + \alpha_2 \ln[\alpha_3(\chi - \alpha_4)], \quad (2)$$

где v_c – скорость обезуглероживания конвертерной ванны, %/мин; α_i – коэффициенты, для рассматриваемого объекта, равные $\alpha_1 = 0,612$ %/мин, $\alpha_2 = 0,063$ %/мин, $\alpha_3 = 1$ м/См, $\alpha_4 = 0,214$ См/м.

Для получения более точных результатов нами разработан метод, основанный на измерении поверхностной плотности силы электрического тока. Испытание проводили на конвертере, работающем в режиме без дожигания отходящего газа. В газоходе устанавливали две пары электродов, одну из которых соединяли с измерителем силы тока, а другую – с измерителем электрической проводимости газа. Ниже электродов помещали электромагнит.

При движении ионизированного газа в магнитном поле возникает ЭДС, вызывающая в рабочем теле силу тока

$$i = \chi(wB - E), \quad (3)$$

где i – поверхностная плотность силы тока, текущего в газе, А/м²; w – скорость газа, м/с; B – поверхностная плотность магнитного потока, Тл; E – линейная плотность напряженности внеш-

него электрического поля, зависящая от конструкции зонда и электрического сопротивления нагрузки, В/м.

Для электродов в форме плоских пластин

$$E = iR_n F / D, \quad (4)$$

где R_n – сопротивление нагрузки, Ом; F – площадь поверхности электродов, м².

Для конвертера без дожигания скорость обезуглероживания ванны связана со скоростью газа соотношением

$$v_c = 0,0536wF_s / m(1 - bt), \quad (5)$$

где F_s – площадь поверхности поперечного сечения газохода, м²; m – масса металла, т; b – коэффициент угара металла, определяемый технологическими особенностями процесса, мин⁻¹; t – текущее время продувки, мин.

Зависимость (5) имеет место и для конвертеров с дожиганием отходящего газа при проведении измерений в ядре факела. Решая совместно уравнения (3-5), получаем

$$v_c = 0,0536iF(1 + \chi R_n F / D) / \chi B m (1 - bt). \quad (6)$$

Реализация зависимости (6) позволила контролировать скорость обезуглероживания ванны конвертера с точностью не ниже 0,01 %/мин. Из-за сложности описанного метода, связанной с созданием мощного магнитного поля в газоходе, нами разработан более простой в аппаратном исполнении способ, основанный на измерении параметров газа в двух точках по ходу потока. В этом случае скорость газа определяется выражением

$$w = L / \Delta t, \quad (7)$$

где L – расстояние между точками контроля, м; Δt – продолжительность времени прохождения газом расстояния L , мин.

Измерительный электрод для реализации метода выполнен в виде цилиндра, имеющего продольно-сквозной, продуваемый воздухом или инертным газом канал, который используется как оптический для вывода излучения газа в поле зрения бесконтактного пирометра.

Анализ газодинамики потока отходящего газа показывает, что ядро факела – самая представительная область замера параметра. Так как поток отходящего газа является турбулентным (критерий Рейнольдса $Re \approx 10^5$), в нем существуют флуктуации физических характеристик с частотами $f = 50-80$ Гц. Следовательно, характерный масштаб неоднородности при средних скоростях потока $w = 10-20$ м/с составляет $\Delta l = w/f = 0,2-0,3$ м.

Последовательная регистрация движущейся неоднородности электропроводимости в двух точках потока, расположенных

СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЕ ПРОИЗВОДСТВО

на расстоянии L , позволяет определить скорость газа в ядре $w_n = L/\Delta t$, где продолжительность времени Δt находится из условия максимума взаимно-корреляционной функции $\max(1/\tau_*) \int \chi_1(\tau)\chi_2(\tau - \Delta t)d\tau$, где τ_* – время усред-

нения, мин; χ_1, χ_2 – линейная плотность проводимости пламени между электродами в соответствующих точках контроля См/м. Как показал эксперимент, достоверное определение величины Δt корреляционным методом возможно при $L = (2...3)\Delta l = 0,4...0,9$ м.

Разница значений силы тока насыщения при отрицательном и положительном напряжении на электроде относительно ванны обусловлена различием площади поверхности электрода и ванны и вкладом термоэлектронной силы тока в режиме насыщения при положительном напряжении на электроде.

При отрицательном относительно ванны напряжении на электроде, установленном в ядре факела, сила тока насыщения равна

$$J_{n1} = 2F_y i_{Uy} \quad (8)$$

где J_{n1} – сила электрического тока насыщения при отрицательном напряжении на электроде, А; F_y – площадь эмиттирующей поверхности электрода, определяемая его геометрией, м²; i_{Uy} – поверхностная плотность ионной силы тока из плазмы, А/м².

При положительном напряжении на электроде происходит кажущееся увеличение ионной силы тока на величину термоэмиссии с поверхности металла

$$J_{n2} = 2[(F_m + F_x)i_U + F_m i_{ms}], \quad (9)$$

где J_{n2} – сила тока насыщения при положительном напряжении на электроде, А; F_m – площадь эмиттирующей поверхности металла (определяется геометрией ванны), м²; F_x – площадь холодной (неэмиттирующей) поверхности, электрически контактирующей с эмиттирующей поверхностью металла (определяется конструкцией конвертера и местом расположения электрода), м²; i_{ms} – поверхностная плотность силы термоэмиссионного тока насыщения, А/м².

Поверхностная плотность силы термоэмиссионного тока насыщения определяется температурой металла и работой выхода эмиттера из соотношения Ричардсона-Дешмана

$$I_{ms} = \alpha_0 T^2 \exp[-A/(kT)], \quad (10)$$

где $\alpha_0 = 120,4 \cdot 10^4$ – универсальная термоэлектрическая постоянная Ричардсона для металлов, А/(м² · К²); T – температура металла, К; $A = e\psi$ – работа выхода электрона из металла, отсчитанная от уровня Ферми, Дж; $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ – абсолют-

ная величина электрического заряда электрона, Кл; ψ – электрический потенциал выхода электрона с поверхности металла, В; $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ – постоянная Больцмана, Дж/К.

Согласно эффекту Шоттки, внешнее электрическое поле уменьшает работу эмиттирования. Так как поверхность расплава – это смесь металла и шлака, то величина ψ для такой поверхности лежит в пределах 3,8-5,3 В, что для характерных температур дает значение силы термоэмиссионного тока $\approx 10^{-2}$ А. Изменение ψ за счет колебания химического состава поверхности расплава во время продувки контролируется по значению контактной разности потенциалов между электродом и ванной по методу Томсона-Зисмана

$$\psi = U_k + \psi_y, \quad (11)$$

где U_k – контактная разность потенциалов, определяемая по сдвигу вольт-амперной характеристики при минимальном значении силы тока проводимости, В; ψ_y – напряжение выхода электрона с поверхности электрода, В.

С учетом соотношений (8-11) получаем выражение для нахождения температуры металла:

$$\alpha_0 T^2 \exp[-1,08 \cdot 10^4 (U_k + \psi_y)/T] = \alpha_1 J_{m2} - \alpha_2 J_{m1}, \quad (12)$$

где $\alpha_1 = 1/(2F_m)$ и $\alpha_2 = 1/(2F_m) - F_x/(2F_m F_y)$, м⁻².

Из выражения (12) следует, что

$$\ln(\alpha_1 J_{m2} - \alpha_2 J_{m1}) T = -1,08 \cdot 10^4 (U_k + \psi_y) + 2T \ln(\alpha_0^{0,5} T). \quad (13)$$

На рисунке приведен пример итерационного вычисления согласно формулы (13) температуры конвертерной ванны $T = 1800$ К при следующих значениях параметров: $U_k = 0,8$ В; $J_{m1} = 1,064$ А; $J_{m2} = 2,721$ А; $\psi_y = 4,1$ В; $\alpha_1 = 3,8 \cdot 10^{-2}$ м⁻²; $\alpha_2 = 0,167$ м⁻². Численные значения последовательной четырехкратной итерации составляют, К: 1600,00–1813,52–1799,15–1800,05. Дальнейшие вычисления проводить нецелесообразно, т. к. искомая величина находится между последними вычисленными значениями, отличающимися менее чем на 1 К.

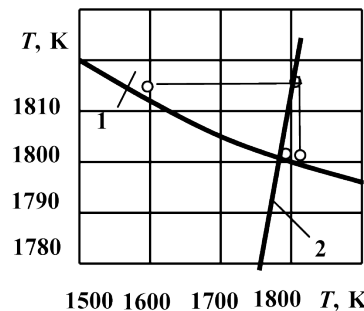


Рисунок. Графическая интерпретация итерационного решения уравнения (13) относительно T :

1, 2 – графики, соответствующие левой и правой части (13)

Оценим погрешность метода вследствие влияния температуры эмиттера на работу выхода электрона. Представим температурную зависимость электрического потенциала выхода электрона выражением

$$\psi(T) = \psi(T_*) + \alpha(T - T_*), \quad (14)$$

где T_* – базовая температура металла, К; $\alpha = d\psi/dT$ – температурный коэффициент потенциала выхода электрона, равный 10^{-5} В/К.

Теоретическая ошибка контроля температуры металла в диапазоне изменения последней ± 50 К (охватывает практически всю гамму выплавляемых марок стали) составляет 0,2 К. Для всего диапазона изменения температуры ванны по ходу продувки ошибка не превышает 1 К.

Промышленные испытания метода осуществлены на Енакиевском металлургическом заводе (ЕМЗ). Установка содержала измерительный водоохлаждаемый электрод, чувствительный элемент которого установлен в ядре факела. Для осуществления надежного контакта с расплавом в футеровку конвертера вставлялся металлический электрод, электрически изолированный от металлоконструкций. Измерительный и контактный электроды электрически соединены через внешнюю цепь и плазму, образуя замкнутую цепь: измерительный электрод – плазма факела – ванна – контактный электрод – преобразователь – измерительный электрод. Сила тока в этой цепи в прямом и обратном направлениях отличается на величину тока термомиссии с поверхности ванны, экспериментально подтверждая кажущееся увеличение силы тока насыщения. В преобразователе снимается вольт-амперная характеристика за время, меньшее периода флуктуаций в плазме. Отрицательная ветвь вольт-амперной характеристики дает значение $J_{н1}$ положительная – $J_{н2}$. По сдвигу вольт-амперной характеристики, относительно начала координат, определяется значение U_{ν} по электрическому потенциалу выхода измерительного электрода ψ_* – находится величина ψ .

Промышленные испытания метода показали, что среднеквадратичное отклонение искомого параметра составляет 12,3 К. Исследования, проведенные нами, корреспондируются с работой [9] по созданию датчика температуры эмиттера в диапазоне контроля 1700 К.

Наряду с электрофизическими свойствами нами изучались оптико-спектральные свойства пламени над горловиной конвертера. Спектр снимался при помощи призмного спектрографа с кварцевой оптикой ИСП-30 с расстояния 30 м.

В процессе продувки спектр пламени имеет сплошной фон, на котором отдельные линии

почти неразличимы, а излучение пламени мало отличается от испускания черного излучателя. Установлено, что сплошной фон создается частицами пыли, доля которых в факеле к концу продувки резко падает.

К моменту прекращения продувки из горловины конвертера вырывается пламя, имеющее четко выраженный линейчатый спектр, который связан с химическим составом чугуна, технологией продувки и массовой долей углерода в ванне. Так, для условий ЕМЗ (перерабатывался передельный чугун, продувка велась через четырехсопловую фурму с углом наклона сопел к вертикали 13 град, при расходе кислорода $450 \text{ м}^3/\text{мин}$) характерны линии в синей части спектра с длиной волны 4520, 4550, 4700, 4800 Å, которые начинают исчезать при доле углерода, равной 0,5 %, и исчезают полностью при 0,25 %. Линейчатый спектр пламени в момент прекращения продувки, вероятно, обусловлен отсутствием в нем пыли, что является следствием исчезновения реакционной зоны. Проведенные исследования позволили использовать характеристики спектра пламени для автоматической корректировки анализа металла после повалки. При наличии синих линий железа в спектре додувка рассчитывается по объему кислорода.

По существующей в конвертерных цехах технологии продувку ванны осуществляют до значения доли углерода не ниже, чем в заданной марке стали, берут пробу металла на анализ и, в случае необходимости, додувку до требуемой доли углерода. Операции по отбору пробы и проведению анализа металла, которые занимают 5-7 мин, не всегда оправданы, особенно, если доля углерода заведомо выше заданной.

Проводимый многими исследователями контроль электропроводности цепи «фурмы-ванны» позволяет точно определить моменты интенсивного вспенивания ванны, затопления кислородной фурмы и оседания ванны ниже среза фурменного наконечника. Кроме того, измерение электропроводности позволяет устанавливать фурму перед продувкой на заданное расстояние от поверхности спокойного металла, что очень важно для нормального ведения процесса, и без запаздывания определять момент зажигания плавки.

В работе [10] электрическая проводимость конвертерной ванны измерялась в цепях электрод-электрод и фурма-электрод. В первом случае электрический контакт осуществлялся через железные электроды, заложенные в футеровку конвертера на разной высоте. При этом удалось проследить лишь за проводимостью поверхностного слоя огнеупора, которая определяется его температурой и химическим составом. Мож-

но предположить, что этот метод окажется полезным при изучении физико-химических процессов, протекающих на поверхностном слое футеровки, особенно при ее разогреве. Во втором случае вторым электродом служила электрически изолированная фурма. Наблюдение за проводимостью конвертерной ванны на участке фурма-электрод позволяет определить моменты интенсивного вспенивания металлошлако-газовой эмульсии и затопления кислородной фурмы.

Основные трудности, возникающие при измерении проводимости металлической ванны, связаны с необходимостью обеспечения электрической изоляции фурмы или специального зонда-электрода от металлических конструкций цеха. Это обстоятельство значительно усложняет систему контроля, снижает надежность и точность измерений, т. к. поддерживать электрическое сопротивление изоляции на необходимом уровне в условиях большой запыленности конвертерного цеха довольно трудно. Кроме того, сигнал проводимости искажается влиянием газовой и химической ЭДС конвертерной ванны. Поэтому возможность промышленного использования электропроводимости цепи фурма-ванна требует дополнительного изучения.

Выводы

Проведенные исследования электрофизических характеристик продуктов плавки показывают, что эти параметры тесно связаны с процессами, происходящими в ванне, и могут быть использованы в качестве прогнозирующих фильтров при построении математической модели управления объектом.

Библиографический список

1. Основи металургійного виробництва металів і сплавів / Д. Ф. Чернега, В. С. Богушевський, Ю. Я. Готвянський та ін.; За ред. Д. Ф. Чернеги, Ю. Я. Готвянського. – К.: Вища школа, 2006. – 503 с.
2. Богушевский В. С. Модель переноса массы и теплоты в квазигомогенном приближении / В. С. Богушевский, Е. А. Сергеева, С. В. Жук //

MANTRIFLY VI MIĘDZYKRAJOWEJ NAUKOWI-PRAKTYCZNEJ KONFERENCJI «NAUKOWA PRZESTRZEC EUROPY-2010». – 2010. – Vol. 19. – P. 27-32.

3. Бойченко Б. М. Конвертерне виробництво сталі (теорія, технологія, якість сталі, конструкція агрегатів, рециркуляція матеріалів і екологія) / Б. М. Бойченко, В. Б. Охотський, П. С. Харлашин. – Дніпропетровськ: РВА «Дніпро-ВАЛ», 2004. – 454 с.

4. Богушевский В. С. Реализация модели управления конвертерной плавкой в системе принятия решений / В. С. Богушевский, В. Ю. Сухенко, Е. А. Сергеева, С. В. Жук // Автоматика. Автоматизация. Электричні комплекси та системи. – 2010. – № 1 (25). – С. 101-105.

5. Богушевский В. С. Математическая модель управления дутьевым режимом конвертерной плавки / В. С. Богушевский, В. Ю. Сухенко, Е. А. Сергеева // Известия вузов. Черная металлургия. – 2011. – № 8. – С. 24-25.

6. Богушевський В. С. Контроль температурного режиму конвертерної плавки / В. С. Богушевський, К. О. Сергеева // Наукові вісті НТУУ «КПІ». – 2009. – № 6. – С. 75-80.

7. Шерстов Б. И. Исследование электропроводности факела кислородного конвертера / Б. И. Шерстов, Г. Н. Гончаренко // Металлургия и коксохимия. – К.: Техніка, 1973. – Вып. 36. – С. 89-91.

8. Контроль металлургических процессов на основе ионизационных явлений, возникающих при горении / Б. С. Фиалков, Б. И. Беседин, Э. И. Гамалей и др. // Известия вузов. Черная металлургия. – 1986. – № 4. – С. 130-132.

9. Лингарт Ю. К. Термоэмиссионный датчик контроля температур / Ю. К. Лингарт, Д. Л. Шур // Теплофизика высоких температур. – 1991. – Т. 29. – Вып. 5. – С. 1009-1012.

10. Изучение электрической проводимости кислородно-конвертерной ванны / В. Б. Охотский, Е. Е. Гаврилов, Ю. П. Кислый и др. // Металлургия и коксохимия. – К.: Техніка, 1973. – Вып. 35. – С. 43-47.

Поступила 29.01.2014