

УДК 669.162.21:005

В.И.Большаков, И.Г.Муравьева, Н.А.Гладков, Е.А. Белошапка

АНАЛИЗ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФОРМЫ И ПОЛОЖЕНИЯ ПЛАСТИЧНОЙ ЗОНЫ В ДОМЕННОЙ ПЕЧИ

Целью исследования является анализ известных методов контроля, оценки формы и положения пластичной зоны в доменной печи. Рассмотрены методы определения положения пластичной зоны в доменной печи с помощью непосредственного контроля и математических моделей.

доменная печь, пластичная зона, метод контроля, математическая модель.

Постановка задачи. Системные представления о пластичной зоне в доменной печи сформировались в 80–х годах 20 столетия и были основаны на результатах анализа материалов охлажденных доменных печей, физического и математического моделирования [1]. В связи с применением на доменных печах бесконусных загрузочных устройств, которые обеспечивают существенное расширение возможностей управления распределением шихты в печах и формирование рациональной пластичной зоны, актуальность подобных исследований увеличилась [2].

Форма и положение пластичной зоны при данном составе шихтовых материалов определяют характер распределения газового потока и эффективность преобразования энергии и массообмен в доменной печи [3], оказывая существенное влияние на производительность, экономические показатели работы и длительность кампании печей. Поэтому разработка способов управления формированием пластичной зоны с целью достижения ее рациональных параметров является одним из основных направлений совершенствования технологии доменной плавки [4]. Для выбора управляющих воздействий на ход плавки необходимым является определение положения пластичной зоны в печи, что в настоящее время осуществляется непосредственным измерением технологических параметров, характеризующих положение и форму пластичной зоны, либо для этих целей используют математические модели.

Методы контроля положения пластичной зоны.

Наибольший объем исследований по определению положения пластичной зоны в доменной печи выполнен на зарубежных доменных печах с использованием следующих методов: с применением индикаторов (радиоактивных или инертных газов, или радиоактивных изотопов металла), вертикальное или горизонтального зондирования, рефлектометрии, с помощью оценки вертикального распределения тепловой нагрузки на футеровку печи, по интенсивности движения кокса в фурменной зоне, с использованием акустических методов [3].

Наибольшее распространение на японских и других зарубежных доменных печах большого объема получили способы определения параметров зоны плавления с помощью зондирования. Схема установки горизонтальных зондов была аналогична предложенной ранее ИЧМ и реализованной в проектах доменных печей объемом 2000, 2700 и 5000 м³ меткомбината «Криворожсталь» и предусматривала установку на уровне фурм в средней и верхней части шахты печей специальных горизонтальных зондов для отбора проб материалов и газов [2,5]. Позднее был разработан способ определения усилия, развиваемого приводом зондов, для определения плотности материалов в столбе шихты на разных уровнях шахты [6]. Под руководством академика З.И. Некрасова и профессора А.В. Праздника сотрудниками ИЧМ были выполнены исследования состава газов, твердых и жидких материалов в шахте и распаре доменных печей [2,5].

Методы контроля профиля пластичной зоны с помощью зондов обеспечивают лишь точечные измерения и характеризуются недостаточной надежностью и низкой метрологической представительностью. Эти методы требуют наличия специальных средств контроля, которые используются только на некоторых доменных печах дальнего зарубежья и полностью отсутствуют на отечественных объектах. Следует отметить, что определение положения пластичной зоны в доменной печи с помощью зондирования является лишь кратковременным действием, характерным для момента непосредственного измерения, и не позволяет получать информацию об изменении параметров пластичной зоны в процессе плавки.

Согласно другому способу – с использованием индикаторов профиль пластичной зоны определяется по величине промежутка времени от момента загрузки индикатора в печь до момента регистрации радиоактивности газа в газоотводах или в каплях расплава. Недостатком данного метода является неточное определение времени пребывания радиоактивного расплава в горне.

Фирма «Ниппон кокан» на доменной печи № 2 объемом 4052 м³ завода в Огисиме (Япония) применила автоматизированную систему непрерывного измерения уровня зоны плавления, разработанную на базе рефлектометрического метода (Time Domain Reflectometer — TDR). Согласно этому методу один или несколько коаксиальных или многожильных кабелей вводят в печь через трубы на колошнике и опускают вместе с шихтой до пластичной зоны. Результаты замеров с помощью этой системы показали хорошую сходимость с данными, полученными другими методами (например, по измерению температуры и потери напора газового потока). При калибровке системы учитывали траектории опускания шихты, уменьшение толщины слоев руды и изменения электрических свойств кабеля при высоких температурах. С помощью устройства TDR исследовали динамику зоны плавления, а также влияние ее положения на показатели работы доменной печи. В развитие рефлектометрического метода

фирма «Кавасаки сэйтэцу» предложила вместо кабелей использовать гибкие световоды. При этом координату верхней границы зоны плавления можно определять по времени прохождения не только электрического, но и светового импульса.

Фирмой «Син ниппон сэйтэцу» разработан и испытан на доменной печи № 4 объемом 2950 м³ в Хирохате (Япония) способ, согласно которому положение пластичной зоны определяли с помощью термодатчиков, размещенных в вертикальных трубках из огнеупорного и износостойкого материала, которые закреплены на горизонтальной балке и опускаются в печь [7]. Информация от термодатчиков обрабатывается в ЭВМ и представляется на дисплее. При определении границ пластичной зоны исходили из предположения, что сверху она ограничена изотермой 1000⁰С, а снизу – 1400⁰С.

Аналогично зондированию предложен способ определения конфигурации пластичной зоны с помощью штанги, которую вводят в печь горизонтально через направляющую трубу, оборудованную отсекающими клапанами [8]. Скорость движения штанги, которая резко замедляется на границе пластичной зоны. Координаты точек измерения относительно оси печи являются основой для вычисления формы и размеров зоны. Измерения проводят в разных точках по вертикали шахты печи. Профиль пластичной зоны определяют по данным о вертикальном распределении температур плитовых холодильников. Так, фирмой «Кобэ сэйкосё» в исследованиях на доменной печи установлена зависимость между характером распределения температуры плитовых холодильников по высоте и положением и формой пластичной зоны.

Фирма «Син ниппон сэйтэцу» разработала способ определения положения корневой части зоны плавления путем измерения температуры стенки в нескольких точках по высоте печи. Положение корня пластичной зоны определяют по границе резкого изменения тепловой нагрузки на футеровку. Для определения положения пластичной зоны фирма «Nippon Steel Corp.» использует два и более микроволновых измерительных устройства, расположенных на различных уровнях в заплечиках печи [9].

Пластичную зону оценивают также по интенсивности движения кусков кокса перед фурмами в зоне циркуляции [8]. Для этого в фурменный прибор через гляделку вводят горизонтальную трубку с оптическим волноком или системой линз. По фотографиям подсчитывают число темных и светлых кусков кокса, прошедших через зону горения за определенный промежуток времени. Способ основан на зависимости между интенсивностью движения кокса в фурменной зоне и объемом пластичной зоны. Свидетельством нормального объема зоны плавления является доля темных кусков кокса, составляющая порядка 25—50 %. Увеличение или уменьшение количества темных кусков кокса является результатом роста или сокращения объема пластичной зоны и сигнализирует о необходимости коррекции теплового состояния печи и режима загрузки.

Представляют интерес способы контроля положения зоны плавления, базирующиеся на измерении акустических колебаний, возникающих в доменной печи. Известен способ контроля положения пластичной зоны, предусматривающий измерение уровня шума газового потока, который обусловлен мгновенными локальными изменениями скорости и давления газа, фильтрующегося через слой кусковых материалов, и находится в линейной зависимости от скорости газового потока [8]. Положение пластичной зоны определяют в точке, уровень шума в которой более, чем в 2 раза ниже заданного среднего уровня, измеренного в шахте и в заплечиках, т. е. выше и ниже границ пластичной зоны.

Японские исследователи определяют форму пластичной зоны тремя способами [5]:

1. По температуре и составу газа, определяемым в нескольких точках с помощью зонда, который вводят в печь радиально в области колошника. Предположительно пластичная зона находится в том месте, где температура газа составляет 1000°C , а содержание углекислого газа приближается к нулю.

2. По статическому давлению, измеряемому в вертикальном направлении, и потере напора между областью стекания жидких продуктов плавки и областью кусковых материалов.

3. По температуре газа, измеряемой зондами в радиальном направлении в шахте печи. При этом исходят из того, что пластичная зона находится там, где температура газа составляет 1000°C .

Ряд исследователей определяют положение пластичной зоны [10,11,12] по результатам измерений потерь напора по высоте печи. На **рис.1** приведено изменение потерь напора у стенки по высоте печи для трех значений отношения χ_l/χ_d . (χ_l – сопротивление газовому потоку в области кусковых материалов; χ_d – сопротивление газовому потоку в области стекания жидких продуктов плавки).

Никитиным Г.М. показана возможность определения конфигурации пластичной зоны по величине промежутка времени от момента загрузки в печь измененного слоя шихты до момента соответствующего изменения нижнего перепада давления газа в печи [13].

Математические модели определения формы и положения пластичной зоны.

Кроме непосредственных измерений, для определения положения пластичной зоны в доменной печи используются математические модели. В таких моделях используются контролируемые на печи технологические параметры – температура и давление газового потока, перепад давления по высоте и др.

Фирма «Кобэ сэйкосе» (Япония) разработала модель тепло- и массопереноса, которая базируется на данных измерений толщины слоев кокса и рудной части шихты, их крупности и порозности, распределения температур и состава газа над и под уровнем засыпи [14]. При условном разде-

лении печи на пять вертикальных concentрических зон с примерно одинаковыми скоростями газовых потоков с помощью модели последовательно рассчитывали температуру шихты каждой подачи в направлении сверху вниз и определяли положение пластичной зоны (по верхней границе – изотерме 1200°C). Известна также разработанная этой фирмой тепловая модель печи, основанная на данных вертикального зондирования [15]. Оценка формы пластичной зоны производится по рассчитываемым с помощью модели тепловым нагрузкам на футеровку печи. Математическая модель зоны вязкопластического состояния разработана для условий ОАО ЗСМК и построена на основе уравнений теплового баланса [16].

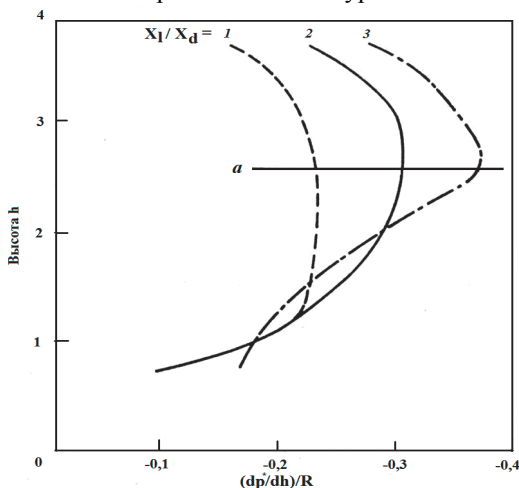


Рис. 1. Потери напора у стенки печи в функции отношения сопротивлений газовому потоку в области кусковой шихты (*a*–самый верхний пластичный слой).

Известна также модель для определения положения пластичной зоны, которая положена в основу управления доменным процессом на печах завода фирмы «Italsider» (Таранто, Италия), исходными данными для которой являются

температура газов по радиусу колошника, параметры загрузки, характеристики шихтовых материалов и технологические параметры работы печи [17].

Достаточно эффективно используют математическую модель пластичной зоны на доменной печи фирмы «Тиссен» в Швельгерне [18]. Модель базируется на данных контроля химического состава и технологических параметров шихтовых материалов, температуры и состава газов над и под уровнем засыпи, а также на результатах вертикального зондирования. Модель позволяет рассчитать процессы, протекающие над пластичной зоной, т.е. определить границы сухой зоны, а также границы зоны плавления.

Фирмой «Ниппон Кокан» (Япония) разработана математическая модель, в которой профиль пластичной зоны рассчитывается с помощью дифференциальных уравнений теплопередачи газ – шихта и материального баланса [19]. В этой модели принято допущение, согласно которому внешняя граница пластичной зоны соответствует кривой нулевого содержания CO_2 в газе. Входными параметрами модели, полученными в результате измерений, являются параметры газа и толщины слоев шихты,

полученные с помощью газоотборных зондов и магнитометров. Этой же фирмой разработана еще одна модель для определения формы пластичной зоны, основанная на информации, получаемой в результате измерений толщин коксовых и железорудных слоев и параметров газа на уровне колошника [20]. Удовлетворительные результаты использования модели в значительной степени зависят от точности входной информации. Адекватность математической модели подтверждалась путем сопоставления расчетных профилей температуры и состава газа с профилями, полученными при измерениях с помощью горизонтального зонда по методу TDR, разработанному фирмой «Ниппон кокан».

На основе оценки газового потока и расчета теплообменных процессов между шихтой и газом фирмой «Син ниппон сэйгэцу» разработана математическая модель пластичной зоны, учитывающая распределение материалов на колошнике и профиль коксовой насадки [21]. С помощью модели рассчитывают распределение давления газа в шахте и по этим данным определяют профиль пластичной зоны.

Фирмой «Кобэ сейкосё» разработана математическая модель состояния кусковой зоны и профиля пластичной зоны, на основе измерений параметров дутья и профиля шахты печи, с помощью которой прогнозировали тепловое состояние печи (по содержанию кремния в чугуне) [22].

Фирмой «British Steel» (Великобритания) разработаны математические модели доменного процесса, основанные на положении Рейхардта о сближении температур потоков газов и шихты при температуре 950°C , которая по горизонтальной изотерме делит противоточную область на верхнюю и нижнюю зоны [23]. Разработаны три модели процесса: термодинамическая, кинетическая и динамическая.

В основу математической модели распределения газового потока в зоне плавления, разработанной австралийской фирмой «Australian Iron and Steel», положены гипотеза о газонепроницаемости слоев размягченных материалов, а также данные об измельчении шихты в доменной печи. Модель позволяет определять влияние расположения и профиля зоны плавления на распределение давления и потока газа по высоте печи.

Японскими исследователями также предложен способ определения расположения пластичной зоны с помощью модели потерь напора газовых потоков в шахте печи [8]. Печь делят на большое число горизонтальных зон, в каждой из которых размещают несколько датчиков давления газа и измеряют перепады давления между парами датчиков. Информация поступает в расчетное устройство, в котором строится общая схема распределения давления газа в шахте, позволяющая определять границы пластичной зоны и прогнозировать содержание кремния в чугуне по леткам.

В результате выполненных в последние годы в ИЧМ исследований в рамках моделирования структуры столба шихты разработан аналитический метод определения формы и положения пластичной зоны в доменной печи, согласно которому нижняя граница зоны плавления представля-

ется ломаной линией с точкой излома, соответствующей центру тяжести рудных нагрузок на колошнике, опущенных до уровня распара, а углы наклона образующих лучей определяются по площади поверхности плавления железосодержащих слоев шихты [24].

Заслуживает внимания разработанная в ИЧМ многозонная математическая модель процессов доменной плавки, которая включает методику оценки параметров пластичной зоны с учетом влияния степени восстановления железа и прихода щелочных оксидов, что способствует повышению системности анализа процессов и позволяет количественно оценить влияние параметров пластичной зоны на конечные показатели плавки [25,26].

Несмотря на расширение возможностей определения положения пластичной зоны в доменной печи с помощью математического моделирования, актуальными остаются вопросы создания методов оперативного контроля ее положения и оценки изменения в процессе плавки. В последние годы по результатам освоения на ДП №9 ОАО «АрселорМиттал Кривой Рог» первой отечественной системы измерения профиля поверхности засыпи шихты ИЧМ разработан метод определения положения пластичной зоны в доменной печи по оценке вариации скорости опускания поверхности шихты на колошнике [27]. Согласно этому методу, расстояние от «технологического нуля» до точки начала образования жидких фаз определяется произведением интервала времени между максимальными среднеквадратичными отклонениями скорости, превышающими среднее их значение, и средних за эти интервалы значений скоростей опускания шихты в каждой зоне. Как показали исследования, рассчитанное с помощью предложенного метода положение пластичной зоны в ДП №9 согласуется с выходными показателями плавки. Предложенный метод позволяет оценить положение пластичной зоны в доменной печи в реальном времени, что может быть применено для управления ходом доменной плавки, а также оценить влияние программы загрузки и технологических параметров на формирование зоны плавления.

Заключение. Анализ литературных источников свидетельствует о том, что существующие методы контроля параметров, характеризующих положение пластичной зоны в доменной печи, позволяют получать информацию только на момент осуществления измерений и требуют значительных материальных затрат. Использование математических моделей позволяет лишь в первом приближении оценить положение пластичной зоны в печи, так как основано на ряде допущений и описывает статику процесса доменной плавки, что не позволяет решать конечную задачу оперативного выбора управляющих воздействий, направленных на формирование рациональной пластичной зоны. Поэтому, для управления процессом доменной плавки наиболее перспективны методы оперативно-го определения формы и положения пластичной зоны, в частности, разра-

ботанный в ИЧМ метод, основанный на показаниях стационарного профилемера.

1. *Металлургия чугуна* / Е.Ф.Вегман, Б.Н.Жербин, А.Н.Похвистнев, и др. // Москва. ИКЦ Академкнига, 2004. – 774с.
2. *Исследование состава твердых и жидких материалов в шахте и распаре доменной печи объемом 2000 м³* / З.И.Некрасов, В.Л.Покрышкин, М.Т.Бузовера // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 1969, №4. – С.3–12.
3. *Борц Ю.М., Серов Ю.В.* Контроль и управление зоной плавления в доменных печах. // *Черная металлургия, бюллетень НТЭИ*, – 1988, – №13. – С.18 – 32.
4. *Гуденау Г.В., Стендиш Н., Герлах В.* Физические условия в области пластической зоны доменной печи. Часть 1. Основные принципы модели // *Черные металлы*, –1992,–№8. – С.34–41.
5. *Исследование процессов восстановления в шахте доменной печи объемом 2000 м³* / Некрасов З.И., Бузовера М.Т. // *Сталь*, 1969. – №2. – С.110–115.
6. *А.С. 715626 СССР*. Способ определения технологических параметров доменной плавки / З.И.Некрасов, А.В.Праздников, В.И.Большаков и др. – Заявл. 12.04.1978, опубл. 15.02.80. Бюл. №6.
7. *Ивао Н.* Разработка зондов. I. Гибкий вертикальный зонд погружения // *Тецу то хаганэ*. 1983. Т. 69. №12, С.867.
8. *Хосидэ Й., Такаси С., Юномура А.* Совершенствование технологии доменной плавки в Японии // *Черные металлы*, 1980, 325 – 26. С.3–7.
9. *A. United States Patent № 4,641,083?* Date of patent 3.02.1987. Method and apparatus for supervising charges in blast furnace using electromagnetic waves. Appl. № 519,245. Filed 1.08.1983.
10. *Шюрман Э., Гуденау Г.В., Петерс К.Х.* Исследование пластичной зоны на доменной печи завода в Швельгерне // *Черные металлы*, 1982, – №6–7. – С.9–14.
11. *Петерс К.Х., Пот Г., Петерс М.* Исследование причин нарушения газопроницаемости в доменной печи // *Черные металлы*, 1986, № 22. – С.10 – 20.
12. *H.W. Gudenau, K. Kreibich.* On the cohesive zone phenomena in the blast furnace. // *Scandinavian Journal of Metallurgy*, 1982, №11. – P.107–114.
13. *Никитин Г.М.* Формирование вязкопластичной зоны – как способ эффективного управления доменным процессом. Дис. На соиск. Уч степени д.т.н. 1996 г. – 306с.
14. *Инада С., Кабаяси И., Исабэ М.* Разработка и применение математической модели пластичной зоны доменной печи // *Тэцу то хаганэ*, 1984, Т. 34, №4. – С.59–64.
15. *Непрерывное* определение профиля зоны когезии в доменной печи /С. Хатига, Р. Оно, К. Фусэ и др. //Тэцу то хаганэ, 1986. Т. 36. №3. – С.77–80.
16. *Федоров И.П., Никитин Л.Д., Бугаев С.Ф.* Автоматизированная система прогнозирования зоны вязкопластического состояния в доменной печи. *Металлург*, №2, 2006. – С.32–34.
17. *Vecchida G., Giuli M.* Amelioration realisees pour la deuxieme campagne du haut fourneau 5 de Tarente // *Revue de Metallurgie – CIT*. 1984. V. 81. №5. – P.369 – 383.

18. Betriebsverfahren mit dem Prozederungs- und Optimierungssystem für den Hochofen Schweißern / K.H. Peters, W. Alperer, H.Y. Bachhofen et al // Stahl and Eisen, 1984. Bd. 104. № 14. – С.59–62.
19. *Development of monitoring system for lumpy and cohesive zones in the blast furnace* / T Yamamoto, T. Shokyu, H. Kanoshima et al // Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan. 1982. № 10. – P.774.
20. *Математическая модель зоны размягчения – плавления доменной печи и ее практическое применение* / ВЦП, № И–2532. Пер. ст.: Ohno Y., Kondo K., Fukushima T. // Revue de Metallurgie. CIT, 1983. № 10. – P.809–825.
21. Кувабара М. Оценка формы зоны размягчения и оплавления в доменной печи с помощью математической модели // Тэцу то хаганэ, 1981. Т. 67, №12. – С.752.
22. *Измерение параметров кусковой зоны доменной печи с использованием полученных результатов* / М.Ёкэда, Т.Сёкю, М.Мацуи и др. // Тэцу то хаганэ. 1984. – Т.70. №9. – С.1146–1152.
23. Kyle I. Blast furnace model development and application in the British Steel Corp. // Proceeding Conference September 11–13. 1979. London, 1980. – P.403–415.
24. *Определение границ пластичной зоны в доменной печи* / В. И. Большаков, Н.А.Гладков, И.Г.Муравьева, Е.А.Белошапка // Бюл. «ЧМ», 2006. – №12. – С.29–33.
25. *Изучение влияния зоны размягчения и плавления на процессы и показатели доменной плавки* / [И.Г.Товаровский, В. И.Большаков, Д.Н.Тогобицкая, А.Ф.Хамхотко] – Сталь, 2009. – №1. – С.8–15.
26. *Товаровский И.Г., Большаков В. И., Меркулов А. Е.* Аналитические исследования доменной плавки. // Днепрпетровск, ЧМП «Экономика», 2011. – 206с.
27. *Метод оперативного контроля положения пластичной зоны в доменной печи* / И.Г.Муравьева, Ю.С.Семенов, Н.А.Гладков, Е.А.Белошапка, А.В.Наследов // Бюл. «ЧМ», 2011. – №8. – С.38–44.

*Статья рекомендована к печати
канд.техн.наук Н.М.Можаренко*

В.И.Большаков, И.Г.Муравьёва, Н.А.Гладков., О.О.Белошапка

Аналіз методів визначення форми та положення пластичної зони в доменній печі

Метою дослідження є аналіз відомих методів контролю, оцінки форми та положення пластичної зони у доменній печі. Розглянуто методи визначення положення пластичної зони в доменній печі за допомогою безпосереднього контролю та використання математичних моделей.