



УДК 669.184

О ПРИМЕНИМОСТИ РАЗЛИЧНЫХ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ СОДЕРЖАНИЯ УГЛЕРОДА В ВАННЕ КОНВЕРТЕРА

В.С. Богушевский¹, К.В. Егоров², В.Ю. Сухенко³

¹ доктор технических наук, профессор кафедры физико-химических основ технологии металлов, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», г. Киев, Украина, e-mail: bogysh@gmail.com

² аспирант кафедры физико-химических основ технологии металлов, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», г. Киев, Украина

³ кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры физико-химических основ технологии металлов, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», г. Киев, Украина, e-mail: suhenko-victoria@mail.ru

Аннотация. В статье исследуются преимущества и недостатки предложенных косвенных методов контроля процесса обезуглероживания ванны конвертера с точки зрения повышения точности контроля этого процесса.

Ключевые слова: конвертер, обезуглероживание, контроль, отходящие газы.

ON THE APPLICABILITY OF VARIOUS METHODS OF CONTROL THE CARBON CONTENT IN THE BOF

V. Bogushevskiy¹, K. Yegorov², V. Sukhenko³

¹Doctor of technical Sciences, Professor of Department of Physicochemical Foundations of Metallurgical Processes, [National Technical University of Ukraine - "Kyiv Polytechnic Institute"](http://www.kyivpolytechnic.institute.ua), Kyiv, Ukraine, e-mail: bogysh@gmail.com

² graduate student of Department of Physicochemical Foundations of Metallurgical Processes, [National Technical University of Ukraine - "Kyiv Polytechnic Institute"](http://www.kyivpolytechnic.institute.ua), Kyiv, Ukraine

³Candidate of Technical Sciences, senior Lecturer of Department of Physicochemical Foundations of Metallurgical Processes, [National Technical University of Ukraine - "Kyiv Polytechnic Institute"](http://www.kyivpolytechnic.institute.ua), Kyiv, Ukraine, e-mail: suhenko-victoria@mail.ru

Abstract. The article examines the advantages and disadvantages of the proposed indirect control methods decarburization process baths of BOF in terms of increasing the accuracy of the control of this process.

Keywords: BOF, decarbonization, control, waste gases.

Введение. Физико-химическую основу производства стали в конвертере составляют процессы окисления примесей чугуна, в первую очередь углерода. Именно обезуглероживание ванны является определяющим



процессом, от которого зависят температурный режим и шлакообразование.

Современный уровень развития измерительной техники не позволяет осуществить в агрессивной, высокотемпературной, химически реагирующей среде прямой контроль скоростей протекания физико-химических процессов, определяющих управляемые координаты объекта – массовые доли элементов в металле и шлаке, их температуру [1].

Разовый прямой контроль состояния ванны с помощью измерительных погружаемых зондов является лишь корректировочным инструментом для различных методов контроля процесса обезуглероживания [2]. Корректировка производится в последние минуты продувки и направлена на получение заданной марки стали. При этом весь процесс продувки производится по заданной программе и практически не контролируется. В силу больших колебаний начальных (масса и химический состав металлической части шихты, ее температура, насыпная масса лома) и конечных (заданная марка стали, температура металла на выпуске) программы оказываются неэффективными и во многих случаях приводят к необходимости корректировки плавки после окончания продувки [3].

Моментом окончания продувки является достижение заданного маркой стали содержания углерода. При этом температура металла, определяемая температурным режимом плавки, и содержание серы, определяемой режимом шлакообразования, должны также соответствовать требованиям получения заданной марки стали. Таким образом, непрерывный контроль режима обезуглероживания позволит управлять температурным режимом и режимом шлакообразования ванны конвертера с целью одновременного достижения заданных маркой конечных параметров металла.

Несмотря на большое количество исследований, направленных на контроль процесса обезуглероживания [4 – 6], до настоящего времени отсутствует концептуальное решение этого вопроса, что снижает точность контроля.

Работа выполнялась в НТУУ «Киевский политехнический институт» по теме «Управление конвертерной плавкой в условиях неполной информации о начальных и конечных условиях продувки», Государственный регистрационный номер 0114U005002.

Цель работы. Целью исследований является повышение точности контроля процесса обезуглероживания ванны конвертера.

Материалы и результаты исследований. Наиболее эффективным методом контроля процесса обезуглероживания является контроль по составу газовой фазы. Именно первым косвенным методом определения обезуглероживания ванны с обратной связью по ходу продувки был спо-



соб, основанный на непрерывном определении химического состава и расхода отходящего газа. Автоматическое измерение этих параметров позволяет с некоторым запаздыванием определить: скорость окисления углерода в конвертере, степень использования кислорода на окисление углерода и на реакции шлакообразования, объемную долю CO и CO₂ в газовой фазе конвертера [7].

Основная трудность осуществления этого метода заключается в создании надежной и долговечной системы отбора пробы газа. Газ отбирается в характерной точке подъемного газотока охладителя конвертерных газов (ОКГ), где произошло перемешивание компонентов. Минимальная длина пути, на котором происходит полное молярное перемешивание отходящего газа, равна десятикратному диаметру горловины конвертера. Затем газ пропускается через фильтр и поступает в камеру пробоподготовки. Охлажденный и очищенный газ проходит через систему запуска масс-спектрометра. На основании результатов анализа отходящего газа на CO, CO₂ и O₂, а также информации, поступающей от датчиков температуры и давления отходящего газа с помощью ЭВМ автоматически рассчитывается скорость обезуглероживания и доля углерода в металле.

Основной трудностью применения этой системы является выбор точки отбора газа на анализ, так как возникает противоречие между обеспечением минимального запаздывания (точка отбора должна быть как можно ближе к началу газотока) и надежностью перемешивания компонентов газовой фазы, в том числе с подсасываемым воздухом (точка отбора должна быть в районе переходного газотока). Кроме того, возникают сложности с измерением расхода отходящего газа в точке отбора газа на химический анализ. Практически расход измеряется в районе дымососа, при этом транспортное запаздывание между точками измерения составляет несколько десятков секунд.

Таким образом, несмотря на достаточно хорошую теоретическую составляющую метода, контролю процесса обезуглероживания ним присущи погрешности, связанные с транспортным запаздыванием. Также метод имеет недостаточную надежность, определяемую трудностью эксплуатации отборных устройств.

Так как косвенному контролю скорости углерода по составу и расходу отходящего газа сопутствует запаздывание измеряемой информации, использование для этой цели давления отходящего газа как менее инерционного параметра имеет неоспоримое преимущество. Как показали исследования на 160-тонном конвертере, избыточное давление отходящего газа, измеряемое в опускном газотоке ОКГ, подвержено колебаниям. Это вызывается нестабильностью взаимодействия кислородных струй с ванной



и дополнительным поступлением окислителя с сыпучими материалами и влагой. Начало и конец продувки сопровождается резким пикообразным ростом разрежения в газоходе, которое можно объяснить эжектирующим влиянием кислородной струи в момент прохождения торца фурмы через кессон. Максимум газовой выделения после дачи известняка отображается примерно через 1 минуту.

Более четкие результаты дает измерение перепада давления отходящего газа в переходном газоходе, так как этот параметр в меньшей степени зависит от воздействия внешних факторов (зараствания горловины конвертера и газового тракта, изменения расхода воды на газоочистку и др.) [8].

Нами исследована возможность контроля скорости обезуглероживания ванны конвертера по информации об амплитудно-частотной характеристике отходящих газов [9]. Результатом механического и химического воздействия струи на ванну является возникновение ее турбулентных пульсаций. Известно, что скорость обезуглероживания жидкой ванны также характеризуется наличием пульсаций [10]. Пульсационный характер процесса обезуглероживания приводит к колебательному изменению давления газов в полости конвертера, которое передается по газовому тракту.

Итоговое уравнения контроля имеет вид

$$v_{\dot{N}} = 0,169 \cdot 10^{-6} (V_{\dot{e}\dot{n}} + V_{\dot{a}}) \Delta p_1 f_1 - 0,536 k \delta p, \quad (1)$$

где $v_{\dot{N}}$ – скорость обезуглероживания кг/с; $V_{\dot{e}\dot{n}}, V_{\dot{a}}$ – объемы соответственно кессона и газохода, м³; Δp_1 – амплитуда колебаний давления газа в верхней части подъемного газохода, Па; f_1 – частота колебаний давления в верхней части газохода, Гц; k – коэффициент пропорциональности, определяющий расход подсосываемого воздуха при нормальных условиях в зависимости от разрежения в нижнем сечении кессона, м³/(с · Па); δp – разрежение в нижнем сечении кессона, Па.

Для снижения влияния помех и получения максимального сигнала выявляют спектр частот, соответствующий резонансной частоте свободного объема конвертера.

Метод отличается высокой надежностью, не имеет запаздывания, однако его точность сильно зависит от изменения конструктивных размеров горловины конвертера, кессона и газохода, связанных с образованием настывей шлака и металла в процессе работы конвертера.

Нами также исследована информация о температуре отходящего газа в переходном газоходе, измеряемой бесконтактным методом с использованием пирометра селективного поглощения в ближней инфракрасной области излучения (диапазон 0,72...5,60 мк). С помощью светофильтров



исследованы области пропускания с длинами волн λ 4,0...4,4 и 5,0...5,4 мк, которые характеризуются максимумом поглощения CO₂ и H₂O соответственно. Эти данные успешно были использованы для определения массовой доли углерода в ванне. Итоговое уравнение контроля имеет вид

$$r_i = (100M_{\lambda_i^*} / \chi_{\lambda_i^*} p_i) \exp(-E_{\lambda_i} / kT), \quad (2)$$

где r_i – объемная доля i -го компонента в зоне контроля излучения факела, %; $M_{\lambda_i^*}$ – показания пирометра, пропорциональные объемной плотности монохроматической составляющей в зоне излучения факела в инфракрасном спектре, соответствующем максимуму поглощения CO₂ и паров H₂O, мВ; $\chi_{\lambda_i^*}$ – коэффициент пропорциональности, зависящий от спектральной области излучения газа и вида последнего, мВ/Па; p_i – парциальное давление i -го компонента в факеле, Па; $E_{\lambda_i} = hc/\lambda_i$ – энергия возбуждения линии спектра излучения факела, Дж; $h = 6,63 \times 10^{-34}$ – постоянная Планка, Дж · с; $c = 3 \cdot 10^8$ – скорость распространения электромагнитных волн в свободном пространстве, м/с; $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ – постоянная Больцмана, Дж · К⁻¹; T – температура газа в месте измерения интенсивности излучения, К.

Однако эксплуатация измерительных устройств вызывала определенные трудности в связи с запылением измерительного тракта в процессе работы.

Разработан метод контроля содержания углерода в ванне сталеплавильного агрегата с использованием скорости ультразвуковых колебаний, проходящих через ванну [11].

Скорость прохождения ультразвука через жидкий металл, кроме температуры последнего зависит от массообменного процесса в ванне, определяемого скоростью обезуглероживания металла.

$$v = \sqrt{E/\rho} + f(\gamma, t), \quad (3)$$

где γ – температурный коэффициент скорости ультразвука, м/с; t – температура жидкости, ОС.

Модуль объемной упругости – величина, обратно пропорциональная коэффициенту сжимаемости жидкого металла, в процессе продувки ванны кислородом в результате наличия в нем газовых пузырей зависит от их количества в объеме металла, определяющем уровень расплава, и, в конечном счете, от скорости обезуглероживания. Связь между уровнем металла и скоростью обезуглероживания представим выражением:

$$E = 1/\chi = 1/(\alpha_0 + \alpha_1 v_N^{0,7}), \quad (4)$$



где χ – коэффициент сжимаемости жидкости, $\text{м} \cdot \text{с}^2/\text{г}$; α_0, α_1 – коэффициенты.

Скорость распространения звука может быть измерена как отношение расстояния, проходимого звуком, ко времени прохождения этого расстояния

$$v = L/\Delta\tau, \quad (5)$$

где L – расстояние, проходимое звуком, м; $\Delta\tau$ – продолжительность времени прохождения ультразвуковыми колебаниями пути, равного L , с.

Рассматривая выражения (3), (4) и (5) совместно получаем:

$$t = \beta_0 + \frac{\beta_1}{\Delta\tau} - \sqrt{\frac{\beta_2}{\beta_3 + \beta_4 v_n^{0,7}}} + \beta_5 C, \quad (6)$$

где $\beta_0 - \beta_5$ – коэффициенты, C – содержание углерода в ванне.

Измеряя температуру металла и скорость распространения звука, используя итерационный метод можно непрерывно контролировать скорость обезуглероживания и содержания углерода в ванне сталеплавильного агрегата. Метод трудоемкий в эксплуатации. Его целесообразно использовать при отладке технологии или при проведении научных исследований.

Проведены исследования по контролю обезуглероживания ванны по ходу продувки с использованием информации об изменении массы агрегата с продуктами плавки. Кроме режима обезуглероживания, информация о взвешивании агрегата может быть использована для косвенной идентификации температурного режима, процесса шлакообразования, состояния футеровки [12].

Однако, взвешивание путем установки работающих на сжатие массоизмерителей между опорами и подшипниками цапф вызывает значительные трудности при монтаже и обслуживании датчиков, чувствительность которых из-за большого соотношения массы порожнего конвертера и загружаемых компонентов существенно снижается. Исследование продольных деформаций опорных конструкций показало, что осуществлять контроль нагрузки на опорных конструкциях, не нарушая их целостности, методически выгоднее. Кроме того, датчик измерения продольных деформаций может устанавливаться на опорах без остановки конвертера, что значительно упрощает монтаж и обслуживание.

Нами разработано устройство измерения массы конвертера, позволяющее контролировать технологический процесс плавки и износ футеровки конвертера. В качестве чувствительного элемента использован датчик малых перемещений, содержащий установленный на опорах плоский



упругий элемент и индуктивный преобразователь перемещения, якорь которого закреплен в центре этого элемента. Последний выполнен с возможностью регулируемого перемещения (рис. 1).

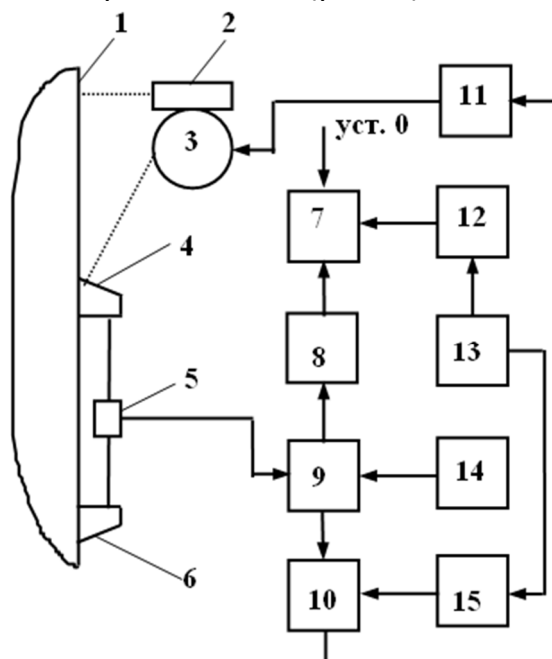


Рисунок 1. – Структурная схема устройства контроля массы

Чувствительный элемент 5, установленный между подвижным 4 и неподвижным 6 основаниями, подключен к регистратору массы 9. При поступлении сигнала от блока “Пуск” 13 показания блока 9 преобразуются в блоке 8 в цифровую информацию. Сигнал “Пуск” поступает через блок задержки 12 в схему разрешения счета сумматора 7, показания которого перед автоматическим регулированием преобразователя 5 обнуляют. Сигнал, равный разности напряжения с чувствительного элемента 5 и задатчика опорного сигнала 14, через ключ 10 поступает на усилитель 11, откуда электрическое напряжение подается на привод 3. Напряжение, установленное на задатчике опорного сигнала 14, пропорционально величине наибольшего массового износа футеровки на плавку. Привод 3 автоматически перемещает основание 4 до тех пор, пока сигнал с чувствительного элемента не сравняется с заданным сигналом на задатчике 14. При завалке лома, заливке чугуна и загрузке сыпучих происходит деформация опорной конструкции конвертера 1, приводящая к перемещению неподвижного основания 2 вместе с приводом 3. Последний перемещает подвижное основание 4 чувствительного элемента преобразователя. При этом регистратор 9 показывает массу загруженных материалов, а при сливе – массу слитого металла и шлака. Остаточное показание пропорционально значению износа футеровки на текущей плавке. При последующих включениях блока “Пуск” устройство работает аналогично, но сумматор 7 не обнуля-



ется. Следовательно, его показание пропорционально массовому износу футеровки. Величина задержки блока 12 определяется продолжительностью переходных процессов АЦП 8, а значение задержки блока 15 – продолжительностью переходных процессов электрического считывания показаний регистратора 9.

Информация о загруженных материалах, слитом металле и шлаке используется для контроля уровня ванны в процессе продувки.

Устройство может быть оттарировано при загрузке любых материалов (лома, чугуна, сыпучих) масса которых хорошо известна. Оно решает комплексные задачи контроля процесса продувки. Что же касается контроля обезуглероживания (удаления продуктов реакции в газовую фазу и снижение массы конвертера в результате этого), то точный контроль возможен только в периоды, когда другие примеси (кремний, марганец, железо) не окисляются (увеличение массы конвертера), что соответствует второму периоду продувки.

Каждому из рассмотренных методов присущи погрешности разной природы. Поэтому решение задачи лежит на пути создания алгоритмов контроля процесса обезуглероживания на основе комплексного использования нескольких методов.

Выводы. Непрерывный контроль процесса обезуглероживания ванны конвертера прямыми методами в промышленных условиях невозможен. Возможны лишь разовые замеры состояния ванны измерительными погружаемыми зондами. Результаты этих измерений целесообразно использовать для корректировки косвенных методов измерения.

Ни один из известных методов контроля процесса обезуглероживания не может гарантировать 100 % контроль плавки в силу недостаточной точности или надежности устройств.

Положительные результаты могут быть получены при комплексном применении нескольких косвенных методов или при сочетании одного из них с разовыми замерами состояния ванны погружаемыми измерительными зондами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Охотский В. Б. Использование многоканальных фурм в сталеплавильных процессах. Конвертер. / Охотский В. Б. // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2011. – №2. – С. 28 – 29.
2. Богушевский В.С. АСУ ТП производства стали в конвертерах / Богушевский В.С., Рюмшин Н.А., Сорокин Н.А. – К.: «Техніка», 1991. – 180 с.
3. Бойченко Б.М. Конвертерне виробництво сталі: теорія, технологія, якість сталі, конструкції агрегатів, рециркуляція матеріалів і екологія: підручник / Бойченко Б.М., Охотський В.Б., Харлашин П.С. – Дніпропетровськ: РВА „Дніпро-ВАЛ”, 2004. – 454 с.



4. Создание базовой интегральной динамической модели современных конвертерных процессов на основе законов неравновесной термодинамики. Сообщение 1. / Б.Н.Окороков, П.Ю.Шендриков, О.А.Комолова, В.Г.Поздняков // Изв. вузов. Чер. металлургия. – 2010. – № 5. – С. 31 – 36.
5. Охотский В.Б. Термо- и гидродинамические критические концентрации углерода при продувке сталеплавильной ванны / В.Б. Охотский // Изв. вузов. Чер. металлургия. – 2010. – № 10. – С. 15 – 19.
6. Бигеев А.М. Определение основных параметров кислородно-конвертерного процесса в конце продувки в условиях кислородно-конвертерного цеха ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» / А.М. Бигеев, В.В. Байтман // Изв. вузов. Чер. металлургия. – 2007. – № 4. – С. 31 – 34.
7. Богушевский В.С. Опыт эксплуатации и перспективы развития АСУТП в конвертерном производстве / В.С. Богушевский // Автоматизация производственных процессов. – 1996. – № 1. – С. 18 – 23.
8. Система управления кислородно-конвертерной плавкой / В.С.Богушевский, С.К.Соболев, Н.А.Сорокин и др. // Черная металлургия: Бюллетень НТИ. – 1986. – № 4. – С. 39 – 41.
9. Богушевский В.С. Определение скорости обезуглероживания конвертерной ванны по информации об амплитудно-частотной характеристике отходящих газов / В.С. Богушевский, Н.А. Сорокин // Использование вычислительной техники при создании АСУТП. – К.: Ин-т автоматизации, 1987. – С. 26 – 31.
10. Переработка ванадиевого чугуна в конвертере с продувкой пульсирующим потоком кислорода / А.В. Явойский, Н.Е. Хисамутдинов, В.Г. Корогодский и др. // Сталь. – 1979. – № 8. – С. 577 – 578.
11. Богушевский В.С., Егоров К.В., Скачок А.Э. Контроль содержания углерода в ванне сталеплавильного агрегата // Материалы VII НТК молодых ученых и специалистов «Сварка и родственные технологии», Киев, 22-24 мая 2013 г. – С. 189.
12. Grenfell H.W., Bowen D.G. BOF blow control by furnace weight // Journal of Metals. – 1974. – Vol. 26, № 7. – P. 9 – 19.

УДК 621.313.3-7.017

ПОЛУМАРКОВСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ ПЕРИОДИЧНОСТЕЙ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

В.Е. Кажан¹, А.Ю. Козаков², Б.С. Медяник³

¹ кандидат технических наук, доцент кафедры электротехники и электропривода, Национальная металлургическая академия Украины, г. Днепропетровск, Украина

² магистрант группы АП-01-10М кафедры электротехники и электропривода, Национальная металлургическая академия Украины, г. Днепропетровск, Украина

³ магистрант группы АП-01-10М кафедры электротехники и электропривода, Национальная металлургическая академия Украины, г. Днепропетровск, Украина, e-mail: karyakamariya@gmail.com