

Анализ информации о процессе обезуглероживания ванны конвертера

Проанализированы методы управления процессами обезуглероживания ванны сталеплавильного агрегата. Исследована возможность автоматического контроля и управления скоростью обезуглероживания металла. Изучена информация о процессе обезуглероживания ванны конвертера.

Ключевые слова: процесс, ванна, метод, контроль, масса, температура, углерод, расход, кислород, коэффициент, скорость, реакция, материал, газ, продувка, фильтр, параметры, термохимическая реакция

Введение. Сложные процессы переноса в ванне сталеплавильных агрегатов происходят в условиях вынужденно движущейся, термохимически реагирующей многокомпонентной среды, подвергаемой фазовым превращениям. Ванна как многосвязный объект представляет собой трехфазную, многокомпонентную систему, в которой протекают аэрогидродинамические, массо-, теплообменные, химические и другие необратимые процессы, определяющие кинетику рафинирования [1]. Использование кислородного дутья изменило механизм физико-химических процессов и настолько увеличило скорость их протекания, что последняя не может быть оценена с помощью соотношений равновесного состояния. Все это усложняет теоретический анализ явлений и делает его вообще неосуществимым, если не прибегать к различным упрощениям и условностям, сохраняя при этом возможность практического использования решения [2].

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 [3].

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.

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 «КПИ» по теме «Модель управления конвертерной плавкой по энергосберегающей технологии», Государственный регистрационный номер 0112U003476.

Постановка задачи исследований. Целью исследований является повышение точности контроля процесса обезуглероживания ванны конвертера.

Результаты исследований

Как показывают исследования для практических целей можно принять, что параметры, характеризующие состояние ванны, не изменяются относительно пространственных координат [7]. Нестационарный режим объекта управления с сосредоточенными параметрами характеризуется стационарными уравнениями, в которых в качестве независимой переменной выступает время. Уравнения контроля можно представить в виде

$$y_l = y_{l0} + \int_{\tau} \frac{dy_l}{d\tau} d\tau;$$

$$l \in t, C, Mn, Si, P, S, CaO, SiO_2, MnO, MgO,$$

$$\sum FeO, P_2O_5, Al_2O_3, TiO_2, \quad (1)$$

где y_l – расчетное значение параметра по ходу продувки; y_{l0} – начальное значение параметра, определяемое, например, по балансу; τ – текущее время продувки; $dy/d\tau$ – скорость изменения параметра по ходу продувки; t – текущая температура ванны; C, Mn, Si, P, S – текущие массовые доли в металле соответственно углерода, марганца, кремния, фосфора и серы; CaO, SiO₂, MnO, MgO – текущие массовые доли соответствующих оксидов в шлаке; $\sum FeO$ – текущая суммарная массовая доля оксидов железа в шлаке.

Учитывая, что прямое измерение компонентов ванны и ее температуры в процессе продувки осуществить практически невозможно, целесообразно использовать прогнозирующий фильтр вида

$$\frac{dy}{d\tau} \Big|_{\tau} = f \left[\begin{array}{l} \frac{dy_l}{d\tau} \Big|_{(\tau-\tau^*)}; \\ \Delta U_1(\tau-\tau^*), \\ \Delta U_2(\tau-\tau^*), \dots, \Delta U_k(\tau-\tau^*), \tau \end{array} \right], \quad (2)$$

где τ^* – временной интервал прогнозирования; $\Delta U_1(\tau-\tau^*)$, $\Delta U_2(\tau-\tau^*)$, ..., $\Delta U_k(\tau-\tau^*)$ – приращения соответствующих управляющих воздействий в момент $(\tau-\tau^*)$; k – число управляющих воздействий.

Значение dy/dt ($(\tau-\tau^*)$) может быть определено по значениям управляющих воздействий или выходных параметров процесса [8]. В качестве управляющих рассматриваем параметры управления дутьевым режимом (интенсивность подачи дутья и расстояние сопла фурмы до уровня спокойного металла) и ввод шлакообразующих и охлаждающих материалов.

В качестве выходных параметров, измеряемых с высокой надежностью и имеющих тесную стабильную связь с температурой и содержанием компонентов ванны, наибольшее распространение получили параметры отходящего газа (химсостав, расход, давление и температура), газохода и фурмы (удлинение, вибрация, температура охлаждающей воды), акустического контроля, вибрации конвертера и др. (рис. 1).

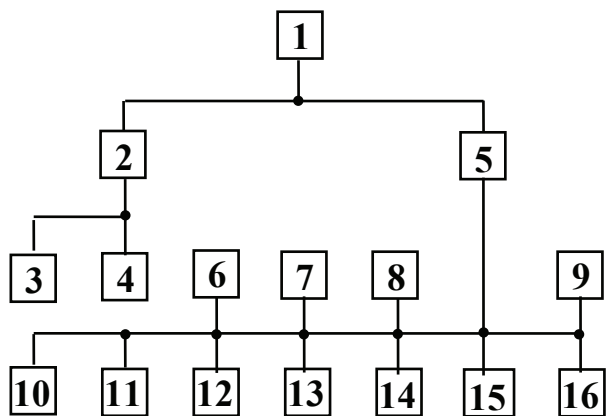


Рис. 1. Методы контроля процесса обезуглероживания конвертерной ванны (1); 2 – прямые: по химическому анализу пробы (3), по температуре ликвидус (4), контролируемой зондом; 5 – косвенные: с учетом информации о массе конвертера (6), скорости распространения ультразвука (7), тепловом потоке на водоохлаждаемых элементах (фурме, кессоне, экране ОКГ) (8), давлении (9) и его пульсациях (10), расходе (11), химическом анализе (12), электропроводимости (13), температуре (14), излучательности (15) и оптических характеристиках (16) газовой фазы

Для получения с надлежащей точностью заданных значений доли углерода и температуры металла измерение последних достаточно осуществить 1...3 раза во втором периоде продувки, и согласно соответствующему алгоритму определить момент окончания продувки. Для периодического контроля параметров ванны используют водоохлаждаемый погружной измерительный зонд, который вводят через горловину конвертера. Массовую долю углерода определяют по температуре ликвидус.

Рассмотрим влияние отдельных управляющих воздействий на скорость обезуглероживания. Как показано в [9] скорость обезуглероживания при прочих равных условиях пропорциональна интенсивности подачи дутья, в первом периоде

$$\frac{dC}{dt} = \varepsilon_1 v / [m(1 + \varepsilon / C_2)], \quad (3)$$

где dC/dt – скорость обезуглероживания ванны конвертера, %/мин; $\varepsilon_1 = 0,107\varepsilon_2\gamma_1$ – коэффициент, характеризующий интенсивность окисления углерода, %/м³ (ε_2 – коэффициент использования кислорода дутья

на реакцию обезуглероживания); γ_1 – коэффициент, характеризующий содержание кислорода в дутье; v – интенсивность подачи дутья, м³/мин; m – масса металлической части шихты, ε – коэффициент, (%)²; C – содержание углерода в металле.

Следовательно, зная изменение интенсивности подачи дутья можно определить величину изменения скорости обезуглероживания.

Из балансового уравнения расхода дутья на продувку [10] имеем

$$\frac{dC}{dt} = \frac{v\gamma_1(1-\gamma_2) - v_{O_2Si} - v_{O_2Mn} - v_{O_2Fe} - v_{O_2P}}{10\left(\frac{22,4}{24} + \gamma_{CO_2} \frac{22,4}{24}\right)m}, \quad (4)$$

где γ_2 – условно-постоянный коэффициент, характеризующий потери кислорода; v_{O_2Si} , v_{O_2Mn} , v_{O_2Fe} , v_{O_2P} – расход кислорода дутья на реакции окисления кремния, марганца, железа и фосфора соответственно; γ_{CO_2} – степень дожигания CO до CO₂ в ванне конвертера.

Отсюда видно, что коэффициент использования кислорода дутья на реакцию обезуглероживания не является постоянной величиной и зависит от расхода кислорода на окисление других примесей чугуна.

Коэффициент ε_1 изменяется в ходе продувки: для первой части продувки, когда выгорают примеси чугуна, он возрастает соответственно уменьшению скорости выгорания примесей, во второй, когда скорости окисления кремния, марганца и фосфора и соответственно расход кислорода на эти реакции приближаются к нулю, определяется только интенсивностью и химическим составом дутья, в конечном периоде продувки опять уменьшается, соответственно с возрастанием в тот период количества кислорода, идущего на реакции окисления железа и дожигания CO до CO₂. Продолжительность первого периода составляет около 0,25 продолжительности продувки, третий начинается приблизительно на 0,8 продолжительности продувки. При интенсивности подачи дутья 400 м³/мин, расстоянии сопла фурмы до уровня спокойной ванны 1 м и $\gamma_1 = 0,995$, а $\gamma_2 = 0,99$, массе чугуна 125 т, содержания в чугуне, %: кремния – 0,8, марганца – 0,6, фосфора – 0,08, изменение коэффициента ε_1 в первом периоде, который для 160-тонного конвертера заканчивается на 5 минуте, можно представить уравнением

$$\varepsilon_1(\tau) = 173,23 + 72,933\tau - 7,9434\tau^2 + 0,3797\tau^3, \quad (5)$$

где τ продолжительность продувки, мин.

Графически зависимость имеет вид (рис. 2).

Во втором периоде продувки коэффициент ε_1 квазипостоянен и равен около 367 м³/мин.

В третьем периоде коэффициент ε_1 находим из уравнения

$$\varepsilon_1(\tau) = 386,98 - 109,038(\tau - 16) + 11,8748(\tau - 16)^2 - 0,5677(\tau - 16)^3. \quad (6)$$

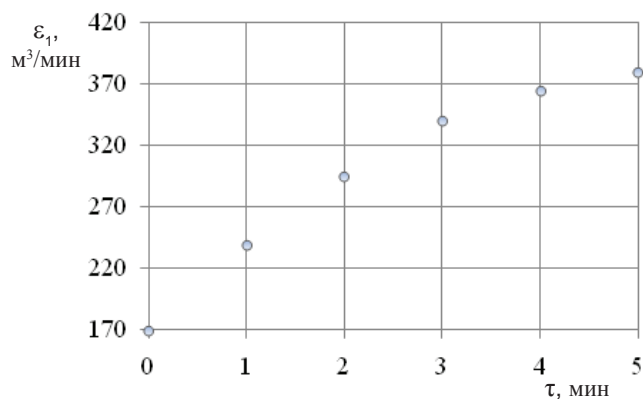


Рис. 2. Зависимость коэффициента ε_1 от продолжительности продувки в первом периоде

Таким образом, использование интенсивности подачи дутья как прогнозирующего фильтра целесообразно только во втором периоде продувки.

Рассмотрим возможность применения как прогнозирующего фильтра расстояния сопла фурмы до уровня спокойной ванны.

Как известно [11] величины γ_{CO_2} и содержание окислов железа в шлаке являются функциями расстояния сопла фурмы до уровня спокойной ванны

$$\gamma_{CO_2} = [10,2(H - 1,5)^2 + 3,1] \cdot 10^{-2}; \quad (7)$$

$$FeO = 16,34H - 5,63, \quad (8)$$

где H – расстояние сопла фурмы до уровня спокойной ванны, м; FeO – содержание окислов железа в шлаке, пересчитанное на его закись, %.

Из (6) найдем величину v_{O_2Fe}

$$v_{O_2Fe} = m\gamma_{ш} \frac{16}{72} \cdot \frac{22,4}{32} FeO\tau_p^{-1} \cdot 10, \quad (9)$$

где $\gamma_{ш}$ – доля шлака от массы металла; τ_p – средняя продолжительность продувки, мин.

Подставляя в (2), (5), (7) и принимая $\gamma_{ш} = 0,1$ получим

$$v_C = \frac{\alpha_0 - 20,42H}{0,93m[1,031 + 0,102(H - 1,5)^2]} \cdot 10, \quad (10)$$

где α_0 – коэффициент, определяемый количеством кислорода дутья, идущим на окисление углерода.

Из (8) следует, что при известном значении α_0 величину H можно использовать в качестве прогнозирующего фильтра.

Ввод шлакообразующих и охлаждающих материалов оказывает кратковременное воздействие на скорость обезуглероживания, присаживая ванну, но скорость обезуглероживания тут же восстанавливается [12]. Исключение составляет плавиковый шпат, особенно при вводе его в первый период продувки. Как показано в [11] это может привести к сокращению средней скорости обезуглероживания ванны на 3-4 % и соответственно удлинить продолжительность продувки (рис. 3).

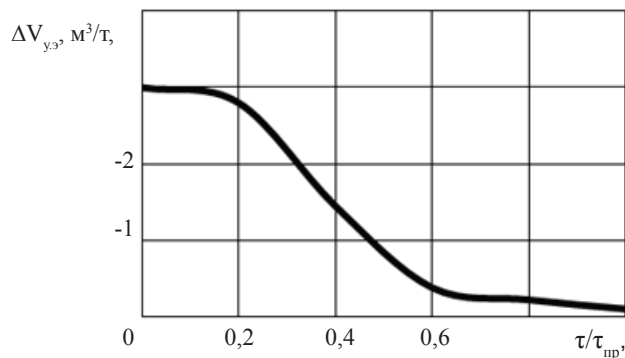


Рис. 3. Приращение удельного эффективного объема кислорода на плавку $\Delta V_{yэ}$ при добавке во время продувки плавикового шпата в количестве 2 кг/т (коэффициент корреляционного отношения равен $-0,68$ с достоверностью $P > 0,950$; среднее квадратичное отклонение σ составляет $0,028$ м³/т)

Уменьшение степени использования кислорода при дутье на реакцию обезуглероживания, обуславливается, вероятно, большим угаром железа и марганца, увеличением степени дожигания CO в CO_2 . Подача шпата после истечения 50 % времени продувки вызывает незначительное уменьшение удельного на тонну чугуна эффективного объема кислорода, так как к этому моменту шлак уже сформирован, достигнута достаточно высокая его основность, а протекание реакций по окислению железа, марганца и CO ограничено.

Использовать ввод шлакообразующих и охлаждающих материалов в качестве прогнозирующего фильтра нецелесообразно.

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 способ, 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 CO_2 в газовой фазе конвертера [13].

Основная трудность осуществления этого метода заключается в создании надежной и долговечной системы отбора пробы газа. Газ отбирается в характерной точке подъемного газохода охладителя конвертерных газок (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 , CO_2 и O_2 , 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, так как возникает противоречие между обеспечением минимального запаздывания (точка отбора должна быть как можно ближе к началу газотока) и надежностью перемешивания компонентов газовой фазы (точка отбора должна быть в районе переходного газотока).

Была исследована информация о температуре отходящего газа в переходном газотоке, измеряемой бесконтактным методом с использованием пирометра селективного поглощения в ближней инфракрасной области излучения (диапазон 0,72...5,60 мкм). С помощью светофильтров исследованы области пропускания с длинами волн 4,0...4,4 и 5,0...5,4 мкм, которые характеризуются максимумом поглощения CO_2 и H_2O соответственно. Эти данные успешно были использованы для определения массовой доли углерода в ванне.

Согласно уравнению испускания факела

$$M_{\lambda_i} = \chi_{\lambda_i} p_i \exp(-E_{\lambda_i}/kT), \text{ и есть } \text{CO}_2, \text{ H}_2\text{O}, \quad (11)$$

где M_{λ_i} – объемная плотность суммарного потока монохроматической излучательности для полного излучателя, Вт/м³; λ – индекс спектральной области; χ_{λ_i} – коэффициент пропорциональности, Вт/(м³·Па); p_i – парциальное давление i -го компонента в факеле, Па; $E_{\lambda_i} = hc/\lambda_i$ – энергия возбуждения линии спектра излучения факела, Дж; $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ – 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.

Парциальное давление компонентов газообразных продуктов для условий работы ОКГ с дожиганием при стабильной подаче дымососной установки численно почти совпадает с объемной долей каждой составляющей смеси. Однако при большой емкости конвертеров и переходе их в режим работы с неполным дожиганием, а также на агрегатах без дожигания расхождение между этими параметрами увеличивается. Это связано с тем, что в этих условиях давление отходящего газа изменяется значительно, в результате чего излучательная способность факела колеблется при неизменных долях CO_2 и H_2O .

Для описания реальных газов при низком давлении и высокой температуре, что имеет место в кислородно-конвертерном процессе, можно использовать известное соотношение для идеального газа

$$p_i = 0,01 r_i, \quad (12)$$

где r_i – объемная доля i -го компонента в зоне контроля излучательности факела, %.

Переходя к показаниям пирометра, с учетом соотношений (9) и (10), получаем откорректированное значение объемной доли i -го компонента газа

$$r_i = (100 M_{\lambda_i} / \chi_{\lambda_i} p) \exp(-E_{\lambda_i}/kT), \quad (13)$$

где M_{λ_i} – показания пирометра, пропорциональные объемной плотности монохроматической излучательности факела в инфракрасном спектре, соответ-

ствующем максимуму поглощения CO_2 и паров H_2O , мВ; χ_{λ_i} – коэффициент пропорциональности, зависящий от спектральной области излучения газа и вида последнего, мВ/Па.

Экспериментальная проверка метода на 160-тонном конвертере с ОКГ-100-2р, для которого $\chi_{\lambda_{\text{CO}_2}} = 5,85 \cdot 10^{-4}$ и $\chi_{\lambda_{\text{H}_2\text{O}}} = 3,94 \cdot 10^{-3}$ мВ/Па, выявила повышение точности контроля скорости обезуглероживания и соответственно массовой доли углерода в ванне на 0,009 % для высокоуглеродистых и 0,004 – для низкоуглеродистых марок стали.

Нами исследована возможность контроля процесса обезуглероживания ванны конвертера по тепловой работе газоотводящего тракта ОКГ. Основной вклад в энергетику водопарового тракта ОКГ вносят термохимические реакции окисления углерода и СО. Статистическая обработка экспериментальных данных выявила корреляционную связь между полезным тепловосприятием ОКГ с генерацией пара и скоростью обезуглероживания ванны по ходу продувки без и с учетом динамических свойств соответственно

$$\frac{dC}{d\tau} = 0,072 + 0,31 \cdot 10^{-6} D (i_s - i_B); \quad (14)$$

коэффициент корреляции $r = 0,52$; $\sigma = 0,012$ %; $P > 0,950$ и

$$\frac{dC}{d\tau} = 0,058 + 0,33 \cdot 10^{-6} [10^3 D (i_s - i_B) + A_p dp_s/d\tau];$$

$$r = 0,63; \sigma = 0,011\%; P > 0,950, \quad (15)$$

где D – расход пара, т/мин; i_s – удельная энтальпия соответственно насыщенного пара и питательной воды на входе в контур, кДж/кг; p_s – давление насыщенного пара в барабане котла-утилизатора, Па; A_p – удельная аккумулирующая способность ОКГ, генерирующего пар, кДж/Па.

Связь между параметрами в уравнениях можно объяснить самовыравниванием теплового баланса ОКГ, которое выражается в стабилизации его КПД в значительном диапазоне изменения $dC/d\tau$. Как видно из уравнений, более тесная связь наблюдается при условии учета динамических свойств ОКГ. Методическая погрешность не превышает 3,5 %.

Общий недостаток рассмотренных прогнозирующих фильтров контроля обезуглероживания ванны по выходным параметрам процесса – запаздывание в результатах измерений, которое снижает точность контроля.

Рассмотрение прогнозирующих фильтров для определения скорости обезуглероживания ванны конвертера по значениям управляющих воздействий или выходных параметров процесса показывает, что каждому подходу присущи недостатки разной природы. Наибольшую точность контроля можно обеспечить при создании модели, основанной на совокупном применении обоих подходов.

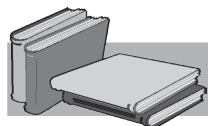
Выводы

Проведен анализ исследований направленных на повышение точности контроля процесса обезуглероживания ванны конвертера.

В связи с невозможностью непрерывного прямого контроля скорости обезуглероживания ванны конвертера приводит к необходимости разработки прогнозирующих фильтров. Рассмотрение фильтров, основанных на изменении управляющих воздействий, показало, что они приводят к положительным результатам только в определенные периоды продувки, причем в эти периоды точность прогноза до-

вольно высока. Фильтры, основанные на измерении выходных параметров процесса, приводят к положительным результатам в течении всей продувки, но подвержены влиянию транспортного запаздывания.

Модель процесса обезуглероживания целесообразно строить как комбинированную, включающую фильтры по значениям управляющих воздействий и выходных параметров процесса.



ЛИТЕРАТУРА

1. Основи металургійного виробництва металів і сплавів: Підручник / 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. Бойченко Б. М., Охотський В. Б., Харлашин П. С. Конвертерне виробництво сталі: теорія, технологія, якість сталі, конструкції агрегатів, рециркуляція матеріалів і екологія: Підручник. – Дніпропетровськ: РВА «Дніпро-ВАЛ», 2004. – 454 с.
3. Охотський В. Б. Использование многоканальных фурм в сталеплавильных процессах. Конвертер. // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2011. – №2. – С. 28 – 29.
4. Создание базовой интегральной динамической модели современных конвертерных процессов на основе законов неравновесной термодинамики. Сообщение 1. / Б. Н. Окорочков, П. Ю. Шендриков, О. А. Комолова, В. Г. Поздняков // Изв. вузов. Чер. металлургия. – 2010. – № 5. – С. 31-36.
5. Охотський В. Б. Термо- и гидродинамические критические концентрации углерода при продувке сталеплавильной ванны // Там же. – 2010. – № 10. – С. 15-19.
6. Богушевський В. С., Зубова К. М., Сухенко В. Ю. Керування конвертерною плавкою в умовах енергозберігаючої технології // Наукові вісті НТУУ «КПІ». – 2011. – №5. – С. 65-69.
7. Бигеев А. М., Байтман В. В. Определение основных параметров кислородно-конвертерного процесса в конце продувки в условиях кислородно-конвертерного цеха ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» // Изв. вузов. Чер. металлургия. – 2007. – № 4. – С. 31-34.
8. Богушевський В. С., Єгоров К. В. Контроль динаміки ванни по ходу продувки як складова системи керування конвертерною плавкою // Наукові вісті НТУУ «КПІ». – 2013. – № 1. – С. 51-56.
9. Богушевський В. С., Мельник С. Г., Жук С. В. Обезуглероживание стали как основной параметр оптимального управления кислородно-конвертерного процесса // Металл и литье Украины. – 2014. – № 2. – С. 14-16.
10. Богушевський В. С., Зубова К. М. Математичне моделювання конвертерного процесу за енергозберігаючою технологією // Технологічні комплекси. – 2013. – № 2(8). – С. 32-38.
11. Математическая модель АСУ конвертерной плавки // В. С. Богушевский, Ю. В. Оробцев, Н. А. Рюшин, Н. А. Сорокин – К.: НПК «Киевский институт автоматики», 1996. – 212 с.
12. Богушевський В. С., Рюшин Н. А., Сорокин Н. А. АСУ ТП производства стали в конвертерах. – К.: «Техніка», 1991. – 180 с.
13. Богушевський В. С., Жук С. В., Зубова Е. Н. Параметры отходящего газа как индикаторы массо- и теплообменных процессов в ванне конвертера // Металл и литье Украины. – 2012. – № 7. – С. 16-20.

Анотація

Єгоров К. В., Богушевський В. С.

Аналіз інформації про процес зневуглицювання ванни конвертера

Проаналізовано методи управління процесами зневуглицювання ванни сталеплавильного агрегату. Досліджено можливість автоматичного контролю та управління швидкістю зневуглицювання металу. Вивчено інформацію про процеси зневуглицювання ванни конвертера.

Ключові слова

процес, ванна, метод, контроль, маса, температура, вуглець, витрати, кисень, коефіцієнт, швидкість, реакція, матеріал, газ, продувка, фільтр, параметри, термохімічна реакція

Summary

Yegorov K., Bogushevskiy V.

Analysis of information on decarburization process bath converter

The methods of process control decarburization bath steelmaking unit. The possibility of automatic control and speed metal decarbonization of information from the pattern during decarburization converter bath.

Keywords

process, bath, method, control, mass, temperature, carbon, oxygen, consumption rate, speed, reflexes, material, gas, purge, the filter, parameters, thermochemical reaction

Поступила 20.08.14