

Устройство определения степени окисления углерода до окиси в полости конвертера

Проанализированы основные составляющие конвертерного процесса, которые влияют на устройство определения степени окисления углерода до окиси в полости конвертера. Исследования, представленные в статье, проводились в НТУУ «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского» по темам «Математические модели и алгоритмы системы управления кислородным конвертером», «Управление конвертерной плавкой в условиях неполной информации о начальных и конечных условиях продувки».

Ключевые слова: сталь, оптимизация, окисление углерода, кислородно-конвертерный процесс, температура металла, газы.

Введение. Кислородно-конвертерная плавка отличается сложностью физико-химических процессов, протекает с большой скоростью и при высокой температуре, характеризуется много-режимностью функционирования и большой размерностью решаемых задач, наличием нестационарных и взаимно коррелированных шумов и помех измерения, имеет существенный дрейф рабочих параметров.

Одним из методов повышения эффективности конвертерного производства является его автоматизация. В системах автоматизации важную роль играет контроль акустических характеристик процессов, происходящих в ванне, путем контроля параметров отходящих газов и вибраций оборудования. Многие исследования направлены на установление связи между упомянутыми характеристиками и основными параметрами процесса: скоростью обезуглероживания [1], уровня [2] и температуры ванны [3], шлакообразования [4]. Однако такой важный параметр как степень окисления углерода в полости конвертера оказался неисследованным. Учитывая, что газы, выходящие из конвертера, состоят приблизительно из 90% CO и 10% CO₂, а тепловой эффект дожигания CO составляет около 21000 кДж/кг углерода [5], большие резервы по увеличению теплового состояния ванны находятся в увеличении степени дожигания CO в конвертере. Известный метод контроля этого параметра по анализу химического состава газов в газоходе [6] сопряжен с большими трудностями, связанными с необходимостью очистки газов и большими запаздываниями результатов измерений.

Исследования, представленные в статье, проводились в НТУУ «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского» по темам «Математические модели и алгоритмы системы управления кислородным конвертером», «Управление конвертерной плавкой в условиях неполной информации о начальных и конечных условиях продувки» Государственные регистрационные номера 0110U002880 и 0114U005002.

Постановка задачи. Повышение точности и надежности определения степени окисления углерода до CO в полости конвертера за счет учета влияния

массообменных процессов и температурного режима ванны на величину параметров обезуглероживания.

Результаты исследований. Скорость обезуглероживания жидкой ванны характеризуется наличием пульсаций [7]. Пульсационный характер процесса обезуглероживания приводит к изменению давления газов в полости конвертера, которые передаются по газоотводящему тракту.

Согласно первому закону термодинамики:

$$\Delta Q = \Delta U, \quad (1)$$

где ΔQ – количество тепла, сообщаемое рабочему телу, Дж; ΔU – изменение внутренней энергии рабочего тела, Дж.

С другой стороны, тепловыделение в системе в течение одного цикла колебаний можно определить как:

$$\Delta Q = q \cdot v / f, \quad (2)$$

где q – удельный тепловой эффект горения топлива, Дж/кг (для газообразного топлива Дж/м³; v – расход топлива, кг/с; f – частота колебаний давления газа, Гц.

Согласно теории классической статистики Максвелла изменение внутренней энергии газа можно определить по формуле:

$$\Delta U = \frac{m}{\mu} \cdot \frac{i}{2} R \cdot \Delta T, \quad (3)$$

где m – масса газа, кг; μ – молекулярная масса газа, кг/моль; i – с учетом колебательных число степеней свободы движения одной молекулы газа; ΔT – изменение температуры газа, К; R – универсальная газовая постоянная, равная 8314 Дж/(кмоль · К).

Для описания состояния реальных газов при низких давлениях и высоких температурах, что имеет место в кислородно-конвертерном процессе, можно использовать уравнение Менделеева-Клапейрона:

$$\Delta p \cdot V = \frac{m}{\mu} R \cdot \Delta T, \quad (4)$$

где Δp – амплитуда колебаний давления газа, Па; V – объем газа, м³.

Используя соотношения (1) – (4), получаем выражение для амплитуды колебаний давления газа:

$$\Delta p = \frac{2qv}{iVf} \quad (5)$$

В кислородно-конвертерном процессе газообразование по ходу продувки происходит в реторте и газоходе. Длина пути, на котором происходит полное молярное перемешивание конвертерного газа с подсосываемым воздухом, равна примерно десятикратному диаметру горловины конвертера. Поэтому наиболее достоверная амплитудно-частотная характеристика отходящих газов контролируется в верхней части подъемного газохода.

Считая, что во время продувки конвертера выделяются только углеродсодержащие газы CO и CO₂, выражение (5) можно преобразовать:

$$\Delta p_1 = \frac{2000[\gamma_{CO}q_{CO} + (1 - \gamma_{CO})q_{CO_2}]V_c}{[\gamma_{CO}i_{CO} + (1 - \gamma_{CO})i_{CO_2}](V_K - V_B)f_1} \quad (6)$$

и для подъемного газохода с дожиганием:

$$\Delta p_2 = \Delta p_{CO_2} \cdot \frac{1}{\gamma_{CO_2}} = \frac{2q_{CO}^* \frac{22,4}{12} V_c \gamma_{CO}}{i_{CO_2}(V_K + V_r)f_2} \cdot \frac{1}{\gamma_{CO_2}} \quad (7)$$

где Δp_1 , Δp_2 , Δp_{CO_2} – амплитуды колебания давления газа соответственно в конвертере, в верхней части подъемного газохода и парциального давления двуокиси от догорания окиси углерода, Па; γ_{CO} – степень окисления углерода до CO в полости конвертера, определяемая как объемная доля окиси углерода в конвертерных газах; γ_{CO_2} – объемная доля двуокиси углерода от догорания конвертерных газов; q_{CO} , q_{CO_2} – удельные тепловые эффекты горения углерода в ванны с участием холодного кислорода соответственно до CO и CO₂, равные 10460 и 31250 кДж/кг; f_1 , f_2 – частота колебаний давления газа соответственно в рабочем пространстве конвертера и в верхней части подъемного газохода, Гц; q_{CO}^* – удельная теплота сгорания окиси углерода от догорания конвертерных газов при нормальных условиях, равная 127·10⁵ Дж/м³; i_{CO} , i_{CO_2} – с учетом колебательных число степеней свободы движения одной молекулы соответственно окиси и двуокиси углерода, равные 6 и 8; V_B , V_K , V_{KC} , V_r – объемы соответственно ванны и внутренних полостей конвертера в середине кампании по футеровке, кессона и подъемного газохода, м³.

Величину γ_{CO_2} определяют как отношение значеный расхода двуокиси углерода от догорания конвертерных газов и подсосанного воздуха, который принимают пропорциональным разрежению в нижнем сечении кессона:

$$\gamma_{CO_2} = \frac{\frac{22,4}{12} \cdot V_c \cdot \gamma_{CO}}{\frac{22,4}{12} \cdot V_c + k\delta p} \quad (8)$$

где 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.

Разрешив уравнение (6) относительно γ_{CO} , получим:

$$\gamma_{CO} = \frac{2000V_c \cdot q_{CO_2} - i_{CO_2} \cdot \Delta p_1 \cdot f_1 (V_K - V_B)}{2000V_c \cdot (q_{CO_2} - q_{CO}) - (i_{CO_2} - i_{CO}) \Delta p_1 \cdot f_1} \quad (9)$$

Значение V_c находят из совместного решения уравнений (7) и (8):

$$V_c = \frac{\Delta p_2 \cdot f_2 \cdot i_{CO_2} (V_K + V_r) \cdot 0,268}{q_{CO}^*} - 0,536k \cdot \delta p \quad (10)$$

Подставляя численные значения параметров для условия 130-тонных конвертеров ($V_B = 19$ м³; $V_K = 190$ м³; $V_{KC} = 37$ м³; $V_r = 209$ м³), получаем:

$$\gamma_{CO} = \frac{31,25 \cdot V_c \cdot 2 \cdot 10^6 - 1368 \cdot \Delta p_1 \cdot f_1}{20,79 \cdot V_c \cdot 2 \cdot 10^6 - 342 \Delta p_1 \cdot f_1} \quad (11)$$

$$V_c = 0,416 \cdot 10^{-4} \Delta p_2 f_2 - 0,536k \cdot \delta p \quad (12)$$

Устройство для реализации предлагаемого решения (рис. 1) содержит блок 1 контроля скорости обезуглероживания, соединенный с отборами давления, которые установлены в газоходе 4. Измеритель 5 давления соединен с отбором 6 давления газа в полости конвертера 7. Выход измерителя 5 давления через предварительный усилитель 8 соединен с блоками 9 и 10 определения амплитуды и частоты колебания давления газа, подключенными к блоку 11 умножения. Выход блока 11 умножения связан через сумматор 12 с блоком деления-указания, к которому также подключен через сумматор 14 блок 1 контроля скорости обезуглероживания. Выход блока 11 умножения подсоединен к сумматору 14.

Отбор давления газа в полости конвертера располагается в его шлемной части над цапфой и представляет собой трубу, приваренную к корпусу конвертера и сообщающуюся с его полостью через отверстие в футеровке. Измеритель давления располагается на наружном конце трубы в водоохлаждаемом кожухе. Коммуникации (для подвода газа, подвода и отвода воды, подсоединения электрического кабеля) введены через отверстие в неприводной цапфе конвертера. Подача сжатого воздуха в отбор давления осуществляется в период между плавками и предотвращает ошлакование отверстия в футеровке конвертера.

Устройство работает следующим образом. С момента начала продувки кислорода через фурму, сигнал о давлении газов в газоходе 4 и разрежении в нижнем сечении кессона поступает от отборов 2 и 3 в блок 1 контроля скорости обезуглероживания, в котором производится ее расчет. Одновременно сигнал

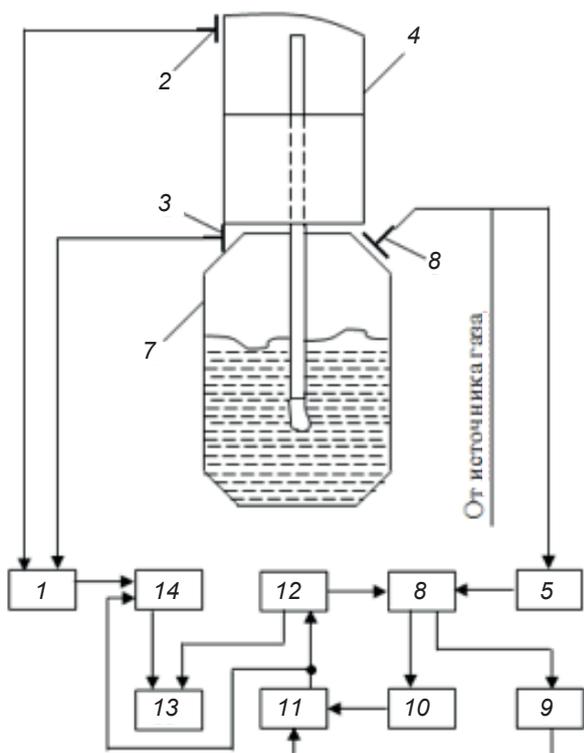


Рис. 1. Блок-схема устройства

о давлении газа в конвертере поступает от отбора 6 давления к измерителю 5. Сигнал от измерителя 5 усиливается в предварительном усилителе 8 и поступает в блоки 9 и 10 определения амплитуды и частоты колебания давления газа. Напряжение, пропорциональное значению амплитуды и частоты колебания давления газа, поступает в блок 11 умножения, в котором вычисляется произведение $\Delta p_1 f_1$.

Напряжение, пропорциональное вычисленному произведению, поступает на первый сумматор 12, на который одновременно поступает напряжение, пропорциональное скорости обезуглероживания. Выходное напряжение сумматора 12 пропорционально числителю формулы (11). Выходное напряжение сумматоров 12 и 14 поступает в блок 13 деления-указания, в котором вычисляется значение величины степени окисления углерода до СО в полости конвертера.

Блок контроля скорости обезуглероживания (рис. 2) содержит узлы 15 и 16 определения амплитуды и частоты колебаний давления газа, входы которых подключены к предварительному 17, а выходы к узлу 18 умножения. Выход узла 18 умножения подключен к узлу 19 суммирования, который также связан с узлом 20 умножения.

Блок контроля скорости обезуглероживания работает следующим образом.

Сигнал о давлении в газоходе усиливается в предварительном усилителе 17 и поступает на узел 15 определения амплитуды и узел 16 определения частоты колебаний давления газа. Выходные напряжения узлов 15 и 16 поступают на узел 18 умножения, выходное напряжение которого пропорционально величине $0,416 \cdot 10^{-4} \Delta p_2 f_2$. Сигнал о разрежении в нижнем сечении кессона поступает в узел 20 умножения, выходное напряжение которого пропорционально величине $0,536 k \cdot \delta p$. Выходное напряжение узлов 18 и 20 поступает на узел 19 суммирования, в котором вычисляется значение v_c .

На рис. 3 приведена структурная схема узла 15 определения амплитуды колебания давления газа (структурная схема блока 9 определения амплитуды колебания давления газа аналогична).

Узел 15 (9) определения амплитуды колебания давления работает следующим образом. Сигнал с выхода предварительного усилителя 17 (8) поступает на вход узла 21 сравнения, на второй вход которого поступает напряжение с узла 26 памяти (в данном случае напряжение соответствует «нулевому»). С выхода узла сравнения 21 снимается напряжение, соответствующее «единичному», которое открывает ключ 22. Ключ 22 пропускает сигнал с предварительного усилителя 17 (8) на вход узла 26 памяти. Сигнал задерживается в узле 25. При изменении значения давления газа в газоходе в сторону увеличения описанный цикл повторяется и новое значение записывается в узле 26 памяти. При этом старое значение сбрасывается по цепи: выход узла сравнения 21 – схема сброса узла 26 памяти. Время задержки в узле 15 обеспечивает последовательный сброс-запись в узле 26 памяти. При изменении значения давления

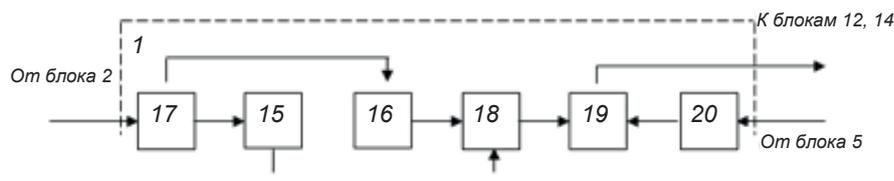


Рис. 2. Структурная схема блока контроля скорости обезуглероживания

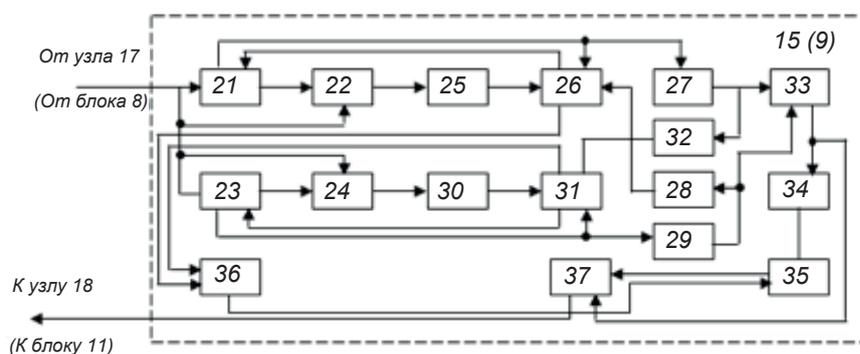


Рис. 3. Структурная схема узла определения амплитуды колебания давления газа

газов в сторону уменьшения напряжения, поступающее с узла 26 памяти на вход узла 21 сравнения, оказывается выше, чем напряжение с предварительного усилителя 17 (8), и на выходе узла 21 сравнения, появляется напряжение, соответствующее «нулевому». Ключ

22 остается запертым и значение, записанное в узле 26 памяти, не изменяется. Таким образом, в узле 26 памяти записывается значение, соответствующее максимальному значению давления газов в газоходе. Аналогично работает цепь узел 23 сравнения – ключ 24 – узел задержки 30 – узел 31 памяти, но при этом на вход задания узла 23 сравнения подключен сигнал с предварительного усилителя 17 (8), а на параметрический вход – с узла 31 памяти. Кроме того, сброс узла 31 памяти осуществляется в максимально возможное значение. Таким образом, в узле 31 памяти записывается значение, соответствующее минимальному значению давления газов в газоходе. Напряжение с выходов 26 и 31 узлов памяти алгебраически суммируются в узле 36. При появлении напряжения, соответствующего «нулевому», с выхода узла 21 сравнения на выходе узла 27 дифференцирования появляется напряжение, которое, пройдя через узел 33 или узел 34 задержки, открывает ключ 35. То же происходит при появлении напряжения, соответствующего «нулевому», с выхода узла 23 сравнения. В эти моменты сбрасывается старое значение в узле 37 памяти, а новое значение с выхода узла 36 суммирования, пропорциональное двойному значению амплитуды изменения сигнала давления газа в газоходе, переписывается в узел 37 памяти. После этого происходит сброс старого значения либо в узле 26 памяти, либо в 31. При появлении сигнала на выходе узла 29 дифференцирования через узел задержки сбрасывается узел 26 памяти, а при появлении сигнала на выходе узла 27 дифференцирования через узел 22 задержки сбрасывается узел 31 памяти.

На рис. 4 приведена структурная схема узла 15 определения частоты колебания давления газа (структурная схема блока 10 выполнена аналогично).

Узел 16 (10) определения частоты колебаний давления работает следующим образом. Сигнал с выхода предварительного усилителя 17 (8) поступает на

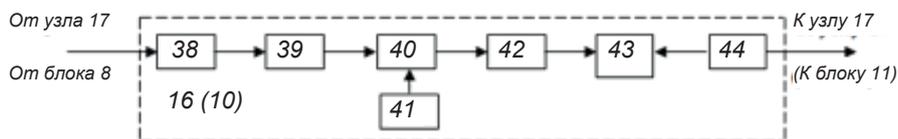


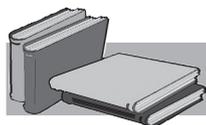
Рис. 4. Структурная схема узла определения частоты колебаний давления

низкочастотный фильтр 38, который выделяет спектр частот, соответствующий резонансной частоте свободного объема газохода (конвертера). Сигнал с выхода низкочастотного фильтра 38 поступает на вход узла 39 автоматического регулирования усиления, на выходе которого получается сигнал постоянной амплитуды со спектром частот, соответствующих резонансной частоте свободного объема газохода (конвертера). На смеситель 40 поступает сигнал с выхода блока 39 автоматического регулирования усиления и сигнал, выработанный гетеродином 41. Разность частот этих сигналов проходит через полосовой фильтр 42, усиливается усилителем 43 и выпрямляется детектором 44.

Испытание макета, реализующего техническое решение, показало, что использование устройства определения степени окисления углерода до СО в полости конвертера позволяет осуществить контроль процесса с более высокой точностью (количество плавки возрастает на 5-7%), что снижает себестоимость стали и повышает ее качество. Экономическая эффективность обеспечивается за счет повышения производительности конвертера на 1,1% и сокращения расхода огнеупорных материалов на 0,2%.

Выводы

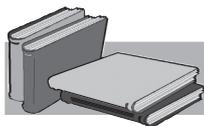
Исследования пульсационного процесса давления газов в полости конвертера и газохода показало, что процесс связан с пульсационным характером процесса обезуглероживания и может быть использован как для контроля скорости обезуглероживания, так и для определения степени окисления углерода до СО в полости конвертера. Точность и надежность метода превосходит эти характеристики метода, основанного на анализе отходящих газов.



ЛИТЕРАТУРА

1. Охотский В. Б., Рубан В. В. Инфразвук в шуме продувки в конвертере // Изв. вузов. Чер. металлургия. – 1990. – № 6. – С. 24-26.
2. Богушевский В. С., Сорокин Н. А., Церковницкий Н. С. Контроль обезуглероживания и шлакообразования кислородно-конвертерной плавки по амплитудно-частотным характеристикам газовой фазы // Изв. АН СССР. Металлы. – 1990. – № 6. – С. 15-20.
3. Исследование принципиальной возможности микроволнового мониторинга состава и свойств конвертерного шлака / В. В. Смокий, В. И. Головки, Л. А. Головки и др. // Науч.-техн. сб.: Электронная техника. – Сер. 1, СВЧ-техника. – Вып. 1 (147). – М.: ЦНИИ «Электроника», 1998. – С. 25-30.
4. Использование вибрационных характеристик конвертера для управления шлаковым режимом плавки // В. Г. Попов, С. Д. Зинченко, А. Т. Степанов и др. // Сталь. – 2004. – № 11. – С. 14-15.
5. Бигеев А. М. Металлургия стали. Теория и технология плавки стали. – Челябинск: Металлургия, 1988. – 480 с.

6. *Богушевский 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.
7. *Металургія сталі. Конвертерне виробництво: Теорія, технологія, конструкції агрегатів, рециркуляція матеріалів і екологія. Підручник / О. Г. Величко, Б. М. Бойченко, П. С. Харлашин та інш.* Дніпропетровськ: РВА «Дніпро-вал», 2015. – 434 с.



REFERENCES

1. Okhotskii V. B., Ruban V. V. (1990). Infrazvuk v shume produkci v konvertere. [Infrasound noise in the converter blowing]. *Izv. vuzov. Cher. metallurgii*, no. 6, pp. 24-26. [in Russian].
2. Bogushevskii V. S., Sorokin N. A., Tserkovnitskii N. S. (1990). Kontrol' obezугlerozhivaniia i shlakoobrazovaniia kislorodno-konvertvernoi plavki po amplitudno-chastotnym kharakteristikam gazovoi fazy. [Control of decarburization and oxygen converter slag smelting on amplitude-frequency characteristics of the gas phase]. *Izv. AN SSSR. Metally*, no. 6, pp. 15-20. [in Russian].
3. Smoktii V. V., Golovko V. I., Golovko L. A. et al. (1998). Issledovanie principial'noi vozmozhnosti mikrovolnovogo monitoringa sostava i svoistv konverternogo shlaka. [Investigation of the fundamental possibility of the microwave monitoring of composition and properties of converter slag]. Moscow: TSNII «Elektronika», Vol. 1 (147), pp. 25-30. [in Russian].
4. Popov V. G., Zinchenko S. D., Stepanov A. T. et al. (2004). Ispol'zovanie vibracionnykh kharakteristik konvertera dlia upravleniia shlakovym rezhimom plavki. [The use of vibration characteristics of the converter to control the slag smelting regime]. *Stal'*, no. 11, pp. 14-15. [in Russian].
5. Bigeev A. M. (1988). Metallurgiiia stali. Teoriia i tekhnologiiia plavki stali. [The theory and technology of steel smelting]. Cheliabinsk: Metallurgiiia, 480 p. [in Russian].
6. Bogushevskii V. S., Zhuk S. V., Zubova E. N. (2012). Parametry otkhodiashchego gaza kak indikatory masso- i teploobmennyykh processov v vanne konvertera. [Parameters as indicators of the exhaust gas mass and heat exchange processes in the converter bath]. *Metall i lit'e Ukrainy*, no. 7, pp. 16-20. [in Russian].
7. Velichko O. G., Boichenko B. M., Kharlashin P. S. et al. (2015). Metallurgiiia stali. Konverterne vyrobnytstvo: Teoriia, tekhnologiiia, konstrukcii agregativ, recyrkuliaciia materialiv i ekologiiia. Pidruchnyk. [Metallurgy of steel. Converter production: Theory, technology, construction aggregates, recycling of materials and ecology. Tutorial]. Dnipropetrovs'k: PBA «Dnipro-val.», 434 p. [in Ukrainian].

Анотація

Богушевський В. С., Сирбу Ю. І.

Пристрій визначення ступеня окислення вуглецю до окису в порожнині конвертера

Проаналізовано основні складові конвертерного процесу, які впливають на пристрій визначення ступеня окислення вуглецю до окису в порожнині конвертера. Дослідження, представлені в статті, проводилися в НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за темами «Математичні моделі та алгоритми системи управління кисневим конвертером», «Управління конвертерною плавкою в умовах неповної інформації про початкові та кінцеві умови продувки».

Ключові слова

Сталь, оптимізація, окислення вуглецю, киснево-конвертерний процес, температура металу, газу.

Summary

Bogushevskii V., Syrbu Yu.

The device of definition of the extent of oxidation of carbon to the oxide in the converter cavity

The main components of the converter process, affecting the device of definition of the extent of oxidation of carbon to the oxide in the converter cavity are analyzed. The studies presented in this article were conducted in NTUU «Igor Sikorsky Kiev Polytechnic Institute» on the subjects «Mathematical models and control algorithms for basic oxygen furnace», «Control converter process under conditions of incomplete information about the initial and final conditions of the purge».

Keywords

Steel, optimization, oxidation of the carbon, oxygen-converter process, metal temperature, gases.

Поступила 25.11.16