

УДК 669.046.56

К ВОПРОСУ О МЕХАНИЗМЕ ОБЕЗУГЛЕРОЖИВАНИЯ МЕТАЛЛА И ОБРАЗОВАНИЯ ОКСИДА УГЛЕРОДА В ДУГОВОЙ ПЕЧИ

Меркер Э.Э., д.т.н., профессор кафедры «Металлургия и металловедение»

Черменев Е.А., к.т.н.

Степанов В.А., аспирант кафедры «Металлургия и металловедение» (viktor1990_31@mail.ru)

Старооскольский технологический институт им. А.А. Угарова, филиал НИТУ МИСиС
(309516, Россия, Белгородская обл., Старый Оскол, микрорайон Макаренко, 42)

Аннотация. Предложена математическая модель процесса обезуглероживания при непрерывной подаче окатышей и использовании топливно-кислородных горелок с учетом изменения по ходу плавки окисленности шлака и распределения кислорода на окисление компонентов расплава. Алгоритм и программу предложенной модели можно использовать для расчета управляемого окислительного рафинирования при электроплавке железорудных металлизированных окатышей в ванне дуговой печи. Рассмотрены рассчитанные по модели кривые составляющих процесса обезуглероживания металла, окисленности шлака и скорости нагрева металла от обезуглероживания в течение периода плавки стали до достижения конечной массы металла в ванне 150-т дуговой сталеплавильной печи при разных расходах окатышей и постоянного количества кислорода топливно-кислородных горелок на плавку. Данные подтверждают решающий вклад кислорода от топливно-кислородных горелок в обезуглероживание расплава. Общий вид кривых изменения составляющих процесса обезуглероживания совпадает с литературными и опытными данными. Это обстоятельство позволяет осуществлять эффективное управление электрическими параметрами электроплавки (током в электродах, ступенями напряжения и др.), что обеспечивает максимальное излучение электрических дуг на поверхность металла и шлака. Таким образом, подача кислорода через топливно-кислородные горелки позволяет реализовать технические решения по электроплавке окатышей в зоне высоких температур печи. При этом потоки окатышей, сыпучих материалов и газовых смесей концентрируются в области влияния электрических дуг на поверхности расплава, где процессы нагрева и плавления осуществляются с более высокими скоростями, чем во всех известных способах загрузки железорудных металлизированных окатышей в агрегат, что позволяет достигнуть более высоких технико-экономических и энерго-технологических показателей плавки металлизированных окатышей.

Ключевые слова: энергосбережение, дуговая печь, электроплавка стали, металлизированные окатыши, обезуглероживание, скорость нагрева, окисленность шлака.

DOI: 10.17073/0368-0797-2017-3-188-193

Основными источниками поступления углерода [1, 2] для его окисления кислородом в ванне дуговой печи, в которой в качестве основной составляющей шихты принято использовать железорудные металлизированные окатыши (ЖМО), являются углерод в металлическом расплаве [3], в составе окатышей и порошкообразном материале, подаваемом на шлак через

топливно-кислородные горелки (ТКГ) агрегата. Принципиальная схема протекания процессов обезуглероживания и образования оксида углерода СО в ванне дуговой печи приведена на рис. 1.

Исследование закономерностей процессов обезуглероживания [4] металла и образования СО в дуговой сталеплавильной печи (ДСП) при электроплавке ЖМО

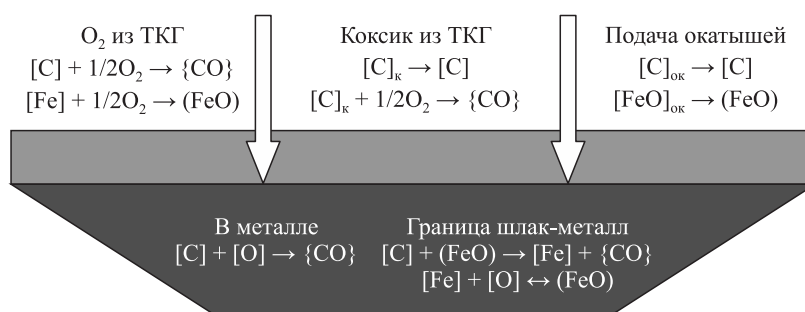


Рис. 1. Упрощенная схема обезуглероживания в ванне дуговой сталеплавильной печи при непрерывной загрузке окатышей и использовании топливно-кислородных горелок

Fig. 1. Simplified diagram of decarburization in the bath of electric arc furnace with continuous pellets supply and with the use of fuel-oxygen burners

проводили на основе известных теоретических положений, полученных экспериментальных данных и результатов моделирования процессов окисления углерода в ванне переменной массы с учетом составляющих и термодинамических особенностей режима обезуглероживания расплава в печи.

Блок-схема алгоритма модели и программа [5, 6] для расчета составляющих v_C (% [C]/мин), скорости нагрева (v_T , °C/мин) шлако-металлической ванны 150-т ДСП и других параметров приведена на рис. 2.

Процесс обезуглероживания [7] металла в ванне дуговой печи представляется обобщенным уравнением

$$\frac{d[C](\tau)}{d\tau} = v_C, \quad (1)$$

где v_C – обобщенная скорость окисления углерода в ванне дуговой печи при электроплавке ЖМО с учетом наличия составляющих в режиме обезуглероживания, $v_C = -v_{C,1} - v_{C,2} - v_{C,3} + v_{C,4}$, % [C]/мин; $v_{C,1}$ – скорость окисления углерода в объеме металла на поверхности пузырьков CO; $v_{C,2}$ – скорость окисления углерода на границе раздела шлак–металл; $v_{C,3}$ – скорость окисления углерода кислородом ТКГ; $v_{C,4}$ – скорость науглероживания металла за счет подачи ЖМО в ванну печи.

После расшифровки составляющих уравнение (1) принимает вид:

$$v_C = \begin{cases} -v_{C,1} = \frac{12}{16} \beta_O ([O] - [O]_{p.c.}) \frac{60 S_{пуз}}{V_{me} d_O} - \\ -v_{C,2} = \frac{12}{16} \beta_O ([O]_{p.ш.} - [O]) \frac{60 S_{ш.м.}}{V_{me} d_O} - \\ -v_{C,3} = \frac{\rho_{O_2} a_{O_2} x_{O_2} I_{O_2} \eta_C 100}{M_{me}} + \\ +v_{C,4} = \frac{v_{ок} ([C]_{ок} - [C]_{реакц}^{ок})}{M_{me}} \end{cases}, \quad \% [C]/\text{мин}, \quad (2)$$

где V_{me} и M_{me} – объем (m^3) и масса (кг) металла в печи; β_O – коэффициент массопереноса кислорода, ($10^{-3} \div 10^{-5}$ м/с); $S_{пуз}$ и $S_{ш.м.}$ – площадь поверхности пузырьков CO и поверхности шлак–металл, m^2 ; $[O]$, $[O]_{p.c.}$ и $[O]_{p.ш.}$ – содержание кислорода, текущее в металле, равновесное с углеродом металла и равновесное со шлаком, %; η_C – доля кислорода на окисление углерода; a_{O_2} – коэффициент усвоения кислорода ванной (для ДСП-100 $a_{O_2} = 0,8$); x_{O_2} – доля кислорода в дутье (для технического кислорода равна 0,995); ρ_{O_2} – плотность кислорода, kg/m^3 ; I_{O_2} – интенсивность продувки кислородом, m^3/c ; $V_{ок}$ – объемный расход окатышей, kg/c ; $[C]_{ок}$ – содержание углерода в окатышах, %; $[C]_{реакц}^{ок} = 12/16 [O]_{ок}$ – содержание углерода окатышей, идущего на довосстановление оксидов железа (FeO), находящихся в них, %.

Коэффициент, учитывающий накопление кислорода в металле:

$$d_O = 1 + 0,75 \frac{p_{CO} \cdot 10^{-5}}{K_{[C]} [C]^2} \left(1 + \frac{0,22 M_{шл}}{\gamma_{(FeO)} L_O M_{me}} \right), \quad (3)$$

где p_{CO} – давление пузырька CO, Па; $K_{[C]}$ – константа равновесия углерода в металле; $[C]$ – содержание углерода в металле, %; $M_{шл}$ – масса шлака, кг; $\gamma_{(FeO)}$ – коэффициент активности оксида железа в шлаке; M_{me} – масса металла, кг; L_O – коэффициент распределения кислорода.

Интегрирование выражения (1) дает зависимость концентрации углерода от времени, так как $v_C = \frac{\Delta[C]}{\Delta\tau} = \frac{[C] - [C]_{нач}}{\tau - \tau_0}$, и тогда, учитывая изменение массы металла, имеем:

$$[C] = \frac{([C]_{нач} - v_C(\tau - \tau_0)) M_{me,0}}{M_{me}}, \quad (4)$$

где τ_0 и τ – время начала и окончания окислительного процесса; $[C]_{нач}$ и $[C]$ – начальная и конечная концентрация углерода, %; $M_{me,0}$ – начальная масса металла в печи, кг.

В результате попадания потока ЖМО в высокотемпературную ванну ДСП за счет довосстановления части углерода в окатышах ($[C]_{реакц}^{ок}$) образуется следующее количество CO в соответствии с выражением

$$V_{CO}^{ок} = \frac{28 [C]_{реакц}^{ок} v_{ок}}{12 \cdot 60 \cdot 100 \rho_{CO}}, \quad m^3/c, \quad (5)$$

где $v_{ок}$ – скорость подачи окатышей в печь, $kg/\text{мин}$; ρ_{CO} – плотность газа пузырей, kg/m^3 .

Оставшаяся часть углерода в окатышах ($[C]_{ок} - [C]_{реакц}^{ок}$) затрачивается на науглероживание металлической ванны печи $v_{C,4}$.

За счет основных составляющих обезуглероживания (2) ванны образуется следующее количество CO:

$$V_{CO}^{обез} = \frac{28 (v_{C,1} + v_{C,2} + v_{C,3}) M_{me}}{12 \cdot 60 \cdot 100 \rho_{CO}}, \quad m^3/c. \quad (6)$$

Подача топлива, кислорода и порошкообразного углерода (коксыка) через ТКГ [8, 9] в ванну ДСП существенно интенсифицирует процессы электроплавки ЖМО с образованием следующего количества монооксида углерода (CO):

$$V_{CO}^k = \frac{28 v_k (1 - \varepsilon_C)}{12 \cdot 60 \rho_{CO}}, \quad m^3/c, \quad (7)$$

где v_k – расход коксыка на шлак в ванну печи, $kg/\text{мин}$; ε_C – доля углерода порошка из ТКГ, усваиваемая ванной.

Таким образом, суммарный расход образующегося CO в ванне ДСП будет равен

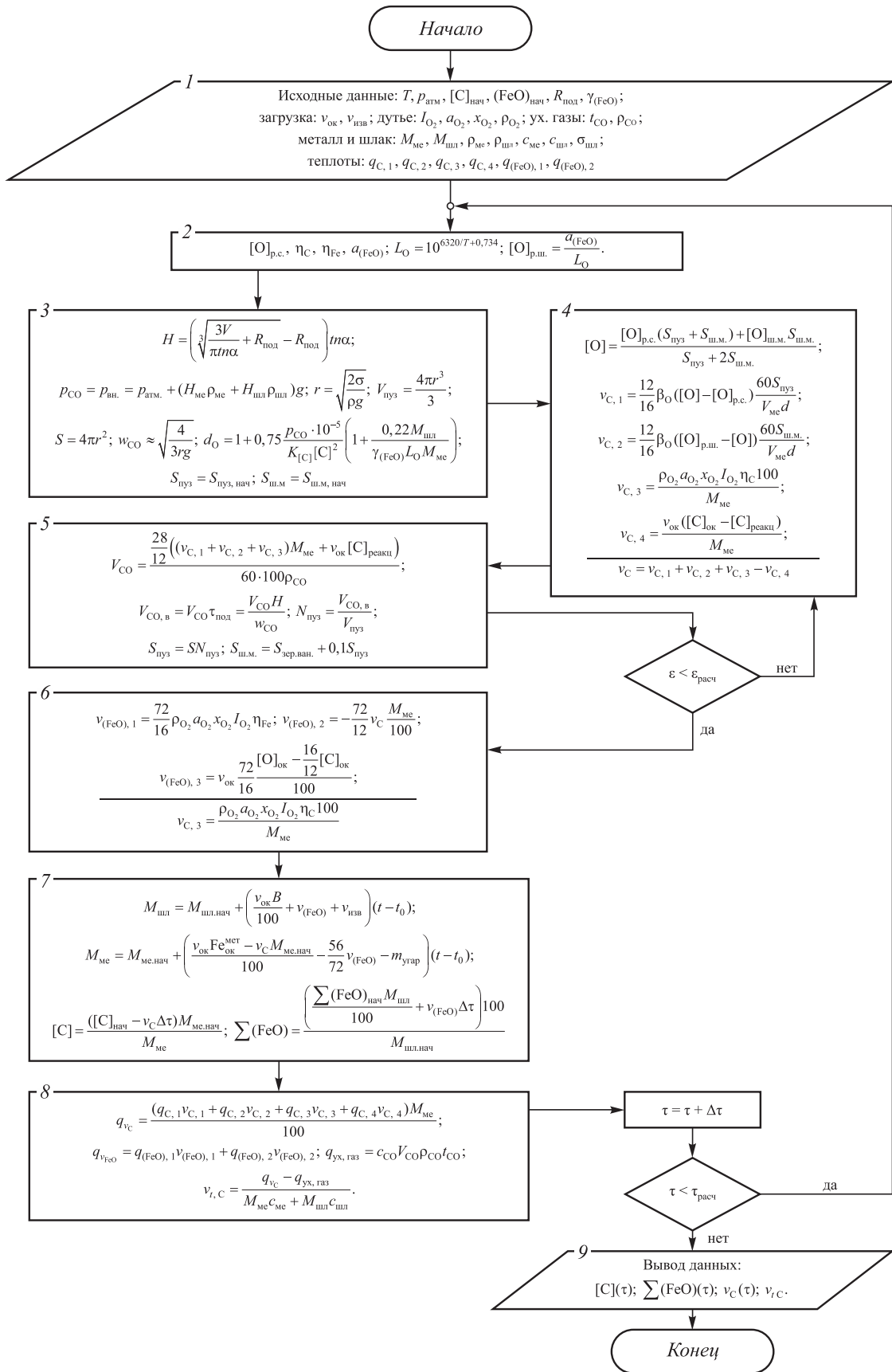


Рис. 2. Алгоритм расчета параметров режима обезуглероживания металла в дуговой печи с применением непрерывной подачи окатышей в ванну при дополнительном нагреве ее через топливно-кислородные горелки

Fig. 2. Calculating algorithm for the mode parameters of metal decarburization in an arc furnace using a continuous pellets supply into the bath at its additional heating through the fuel-oxygen burners

$$V_{CO} = \begin{cases} V_{CO}^{OK} = \frac{28[C]_{реакц}^{OK} v_{ок}}{12 \cdot 60 \cdot 100 \rho_{CO}} \\ V_{CO}^{обез} = \frac{28(v_{C,1} + v_{C,2} + v_{C,3}) M_{ме}}{12 \cdot 60 \cdot 100 \rho_{CO}}, \text{ м}^3/\text{с.} \quad (8) \\ V_{CO}^k = \frac{28v_k(1 - \varepsilon_C)}{12 \cdot 60 \rho_{CO}} \end{cases}$$

При сжигании кислородом от ТКГ образующегося при электроплавке ЖМО оксида углерода представляется возможным существенно повысить приход тепла в тепловом балансе ДСП.

Приведенные системы (2) и (8) составляют структуру алгоритма математической модели для расчета составляющих процесса обезуглероживания и объема образующегося оксида углерода (CO) над ванной в ДСП, работающей в основном на шихте ЖМО с применением ТКГ (см. рис. 2).

Результаты расчета (рис. 3) свидетельствуют об особенностях изменения составляющих v_C и v_t по ходу электроплавки стали при различных расходах ЖМО в ванну ДСП [10, 11, 12]. При этом кривые нагрева шлако-металлического расплава (рис. 3, z) имеют вид экспоненциальной зависимости, максимальны в начальный период плавки и непрерывно снижаются в связи с постоянным увеличением массы металла и шлака в ванне агрегата [13, 14].

Анализ показывает, что скорость плавления ЖМО по ходу электроплавки в 150-т ДСП АО «Оскольский электрометаллургический комбинат» определяется скоростью изменения концентрации углерода в ванне v_C (% [C]/мин), температурой металла (t , °C) и уровнем его перегрева над ликвидусом (Δt , °C), уровнем тепlopитания ванны ($N_{эл}$, кВт·ч), теплопоглощения расплава, т.е. скоростью нагрева металла (v_t , °C/мин) в соответствии с уравнением регрессии

$$v_t = 0,811 - 5,77v_C - 0,013v_{ок} + 0,0019N_{эл}; R^2 = 0,85. \quad (9)$$

Выводы. Рассмотрены кинетические закономерности процессов обезуглероживания [15, 16, 17] металла в дуговой печи при электроплавке металлизированных окатышей и изучены условия образования монооксида углерода в ванне с учетом составляющих режима обезуглероживания и термодинамических особенностей. Предложена математическая модель, позволяющая рассчитывать кривые содержания углерода в металле, окисленность шлака и скорость нагрева металла с учетом обезуглероживания при непрерывной загрузке ЖМО в ДСП и подаче кислорода через ТКГ. Модель и ее программа [18, 19, 20] применимы для расчета управляемого окислительного рафинирования при непрерывной загрузке, нагреве и плавлении окатышей в ванне дуговой печи.

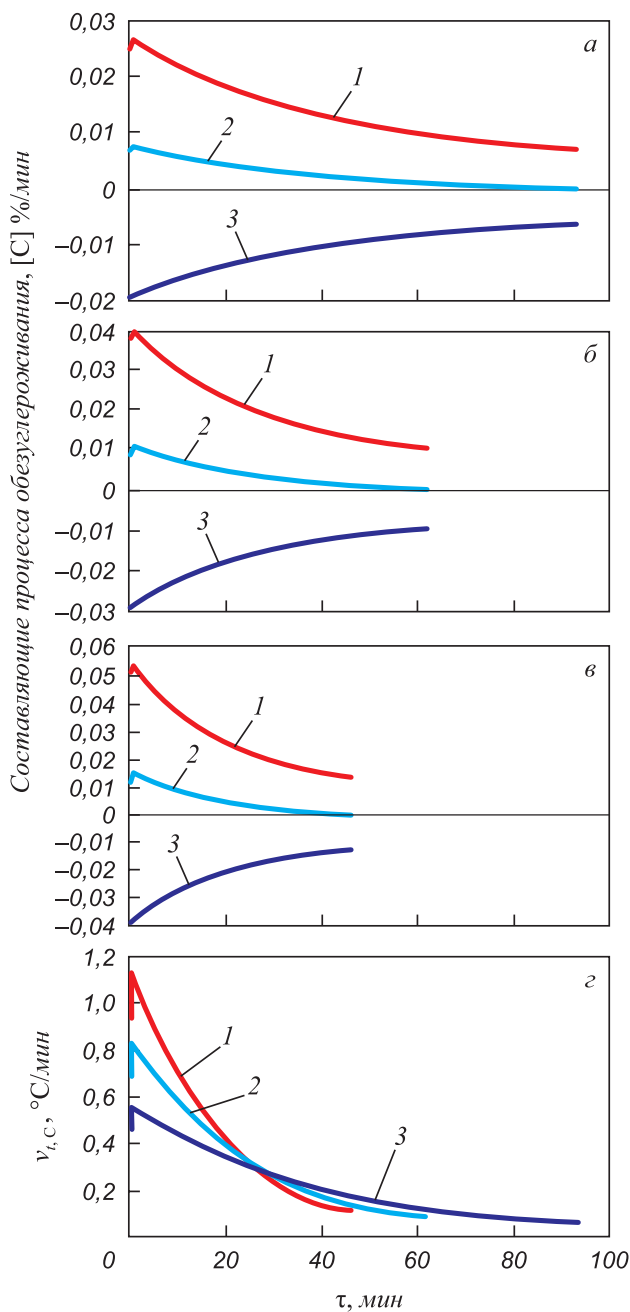


Рис. 3. Характер изменения составляющих режима обезуглероживания сталеплавильной ванны в 150-т дуговой печи (а - $v_{ок} = 20$ кг/с; б - $v_{ок} = 30$ кг/с; в - $v_{ок} = 40$ кг/с; 1, 2, 3 - $v_{C,1}, v_{C,3}, v_{C,4}$, % [C]/мин) и скорости нагрева шлако-металлического расплава (z) от обезуглероживания (1 - $v_{ок} = 40$ кг/с; 2 - $v_{ок} = 30$ кг/с; 3 - $v_{ок} = 20$ кг/с) по ходу плавки при непрерывной загрузке окатышей

Fig. 3. The changes parameters of decarburization mode of the steel bath of 150-ton arc furnace (1, 2, 3 - $v_{C,1}, v_{C,3}, v_{C,4}$, % [C]/min) (а - $v_{pel} = 20$ kg/s; б - $v_{pel} = 30$ kg/s; в - $v_{pel} = 40$ kg/s) and the rate of the slag-metal heating from decarburization (z) (1 - $v_{pel} = 40$ kg/s; 2 - $v_{pel} = 30$ kg/s; 3 - $v_{pel} = 20$ kg/s) in the course of melting during continuous pellets supply

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бартенева О.И., Меркер Э.Э. Исследование процессов нагрева и обезуглероживания металла в 150-т дуговой печи с перемен-

- ной массой ванны // Изв. вуз. Черная металлургия. 2001. № 9. С. 65 – 66.
2. Белковский А.Г., Филиппов С.Ф., Кац Я.Л. Оптимальное содержание углерода в шихте ДСП // Металлург. 2012. № 11. С. 31 – 37.
 3. Бигеев А.М., Бигеев В.А. Металлургия стали. Теория и технология плавки стали. – Магнитогорск: МГТУ, 2000. – 544 с.
 4. Гугля В.Г. Горение углерода в шлаковом расплаве // Изв. вуз. Черная металлургия. 2006. № 1. С. 9 – 13.
 5. Копцев В.В., Казаков О.В., Горбулин В.Н. Физическое моделирование аэродинамики сопла горелочного устройства с центральным телом // Металлург. 2007. № 8. С. 81 – 82.
 6. Лапшин И.В. Автоматизация технологических процессов дуговой сталеплавильной печи. – М.: ООО «Квадратум», 2000. – 280 с.
 7. Гудим Ю.А., Зинуров И.Ю. Способы интенсификации плавки в дуговых печах // Электromеталлургия. 2005. № 9. С. 2 – 6.
 8. Дервянченко И.В., Лозин Г.А., Шумахер Е.А. и др. Совершенствование условий энергосбережения электросталеплавильного производства // Сталь. 2005. № 1. С. 45 – 50.
 9. Киселев А.Д., Зинуров И.Ю., Макаров Д.Н. и др. Эффективность применения газокислородных горелок в современных дуговых сталеплавильных печах // Металлург. 2006. № 10. С. 60 – 62.
 10. Лозин Г.А., Шумахер Э.А., Шумахер Э.Э. и др. Эффективность рассредоточения дутья при интенсификации сталеплавильного процесса // Металлург. 2004. № 12. С. 47 – 50.
 11. Макаров А.Н. Теория и практика теплообмена в электродуговых и факельных печах, топках, камерах сгорания. – Тверь: ТГТУ, 2007. – 184 с.
 12. Меркер Э.Э., Черменев Е.А. Математическая модель обезуглероживания металла при электроплавке железорудных окатышей в дуговой печи // Сталь. 2014. № 3. С. 28 – 33.
 13. Меркер Э.Э., Черменев Е.А., Степанов В.А. Энергосберегающий режим электроплавки металлизированных окатышей в ванне дуговой печи // Электromеталлургия. 2015. № 2. С. 2 – 7.
 14. Пат. 2567424 РФ. Способ плавки стали из железорудных металлизированных окатышей в дуговой сталеплавильной печи / Э.Э. Меркер, Е.А. Черменев, В.А. Степанов и др.; опублик. 10.11.2015. Бюл. № 31.
 15. Падерин С.Н., Падерин Е.П. Термодинамика и расчеты процесса глубокого обезуглероживания стали // Изв. вуз. Черная металлургия. 2005. № 10. С. 19 – 24.
 16. Падерин С.Н., Падерин П.С., Кузьмин И.В. Термодинамическое моделирование окислительных процессов при обезуглероживании стали // Изв. вуз. Черная металлургия. 2003. № 5. С. 6 – 11.
 17. Падерин С.Н., Филиппов В.В. Теория и расчеты металлургических систем и процессов. – М.: МИСиС, 2002. – 333 с.
 18. Хмелева С.Л., Падалко А.Г. Математическое моделирование процесса обезуглероживания в электродуговой печи // Тр. Всероссийской науч.-практич. конф. «Моделирование, программное обеспечение и наукоемкие технологии в металлургии». – Новокузнецк: СибГИУ, 2011. С. 347 – 355.
 19. Черняховский Б.П., Кручинин А.М., Смоляренко В.Д. Энергетические преимущества электроплавки стали с непрерывной загрузкой шихты // Электromеталлургия. 2005. № 6. С. 18 – 24.
 20. Logar V., Dovžan D., Škrjanc I. Mathematical Modeling and Experimental Validation of an Electric Arc Furnace // ISIJ international. 2011. Vol. 51. No. 3. P. 382 – 391.

Поступила 30 октября 2014 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2017. Vol. 60. No. 3, pp. 181–186.

MECHANISM OF METAL DECARBURIZATION AND FORMATION OF CARBON OXIDE IN AN ARC FURNACE

E.E. Merker, E.A. Chermeney, V.A. Stepanov

Stary Oskol Technological Institute of National University of Science and Technology “MISiS”, Stary Oskol, Belgorod Region, Russia

Abstract. The paper presents a mathematical model of decarburization process with continuous supply of pellets and using fuel-oxygen burners subject to changes of slag oxidation and oxygen distribution on the of melt components oxidation during the melting. The algorithm and program of the proposed model can be used to calculate the controlled oxidative refining at electric melting of metalized pellets in an arc furnace bath. The article considers calculated by the model curves of the process components of metal decarburization, slag oxidation and the rate of steel heating from decarburization during the period of steel melting to achievement of the final metal weight in the bath of 150-t EAF at different consumption of pellets and constant supply of oxygen by fuel-oxygen burners at the melting. The data confirm the decisive contribution of oxygen from fuel-oxygen burners in the melt decarburization. General view of the curves of changes of the decarburization process components coincides with the literature and experimental data. This makes it possible to exercise effective control of electric parameters of electric melting (with electrodes current, voltage steps, etc.), providing maximum radiation of electric arcs on the surface of metal and slag. Thus, the oxygen flow through the fuel-oxygen burner allows to realize technical solutions for the electric melting of pellets in high temperature zone of the furnace. The flow of pellets, granular materials and gas mixtures are concentrated in the influence zone of electric arcs on the surface of the melt, where the processes of heating and melting of pellets are made with higher speeds than all the known methods of loading of metalized pellets into the unit, allowing you

to achieve higher technical, economic and energy-technological parameters of metalized pellets melting.

Keywords: energy efficiency, electric arc furnace, electric melting of steel, metalized pellets, decarburization, heating rate, slag oxidation.

DOI: 10.17073/0368-0797-2017-3-181-186

REFERENCES

1. Barteneva O.I., Merker E.E. Research of processes of heating and decarburization of the metal in 150-t electric arc furnace with a variable bath's mass. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2001, no. 9, pp. 65–66. (In Russ.).
2. Belkovskii A.G., Filippov S.F., Kats Ya.L. Optimum content of carbon in the charge of an EAF. *Metallurgist*. 2013, vol. 56, no. 11–12, pp. 810–816.
3. Bigeev A.M., Bigeev V.A. *Metallurgiya stali. Teoriya i tekhnologiya plavki stali* [Metallurgy of steel. Theory and technology of steel melting]. Magnitogorsk: MGTU, 2000, 544 p. (In Russ.).
4. Guglya V.G. Combustion of carbon in the slag melt. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2006, no. 1, pp. 9–13. (In Russ.).
5. Koptsev V.V., Kazakov O.V., Gorbulin V.N. Physical modeling of the nozzle aerodynamics of a burner with a central body. *Metallurgist*. 2007, vol. 51, no. 7–8, pp. 469–471.
6. Lapshin I.V. *Avtomatizatsiya tekhnologicheskikh protsessov dugo-voi staleplavil'noi pechi* [Automation of technological processes in electric arc furnace]. Moscow: ООО “Квадратум”, 2000, 280 p. (In Russ.).
7. Gudim Yu.A., Zinurov I.Yu. Ways of melting intensification in arc furnaces. *Elektrometallurgiya*. 2005, no. 9, pp. 2–6. (In Russ.).

8. Derevyanchenko I.V., Lozin G.A., Shumakher E.A., Shumakher E.E., Kucherenko O.L. Improved power supply for electrosmelting. *Steel in Translation*. 2005, vol. 35, no. 1, pp. 19–25.
9. Kiselev A.D., Zinurov I.Yu., Makarov D.N., Mamenko Yu.F., Pigin S.N. Effectiveness of using oxygen-gas burners in modern arc steelmaking furnaces. *Metallurgist*. 2006, vol. 50, no. 9–10, pp. 529–533.
10. Lozin G.A., Shumakher E.A., Shumakher E.E., Derevyanchenko I.V., Kuznetsov A.V. Effectiveness of dispersing the blow to speed up the steelmaking operation. *Metallurgist*. 2004, vol. 48, no. 11–12, pp. 593–596.
11. Makarov A.N. *Teoriya i praktika teploobmena v elektrodugovykh i fakel'nykh pechakh, topkakh, kamerakh sgoraniya* [Theory and practice of heat exchange in electric arc and torch furnaces, fire chambers, combustion chambers]. Tver: TGTU, 2007, 184 p. (In Russ.).
12. Merker E.E., Chermenev E.A. Mathematical model of metal decarburization at electric melting of iron ore pellets in an arc furnace. *Stal'*. 2014, no. 3, pp. 28–33. (In Russ.).
13. Merker E.E., Chermenev E.A., Stepanov V.A. Power saving mode of electric melting of metallized pellets in the bath of arc furnace. *Elektrometallurgiya*. 2015, no. 2, pp. 2–7. (In Russ.).
14. Merker E.E., Chermenev E.A., Stepanov V.A., Kiseleva N.A., Gracheva I.Yu. *Sposob plavki stali iz zhelezorudnykh metallizovannykh okatyshей v dugovoi staleplavil'noi pechi* [Method of steel melting from iron ore metallized pellets EAF]. Patent RF no. 2567424. Published 10.11.2015. *Byulleten' izobretenii*. 2015, no. 31. (In Russ.).
15. Paderin S.N., Paderin E.P. Thermodynamics and calculations of deep decarburization process of steel. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2005, no. 10, pp. 19–24. (In Russ.).
16. Paderin S.N., Paderin P.S., Kuz'min I.V. Thermodynamic modeling of oxidative processes at steel decarburization. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2003, no. 5, pp. 6–11. (In Russ.).
17. Paderin S.N., Filippov V.V. *Teoriya i raschety metallurgicheskikh sistem i protsessov* [Theory and calculations of metallurgical systems and processes]. Moscow: MISiS, 2002, 333 p. (In Russ.).
18. Khmeleva S.L., Padalko A.G. Mathematical modeling of the decarburization process in an electric arc furnace. In: *Tr. Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Modelirovanie, programmnoe obespechenie i naukoemkie tekhnologii v metallurgii" 2011 g., Novokuznetsk* [Proceedings of the All-Russian scientific-practical conference "Modeling software and high technologies in the industry" 2011, Novokuznetsk]. Novokuznetsk: SibGIU, 2011, pp. 347–355. (In Russ.).
19. Chernyakhovskii B.P., Kruchinin A.M., Smolyarenko V.D. Energy benefits of electric steel melting with continuous charge supply. *Elektrometallurgiya*. 2005, no. 6, pp. 18–24. (In Russ.).
20. Logar V., Dovžan D., Škrjanc I. Mathematical modeling and experimental validation of an electric arc furnace. *ISIJ international*. 2011, vol. 51, no. 3, pp. 382–391.

Information about the authors:

E.E. Merker, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair "Metallurgy and Metallography"

E.A. Chermenev, Cand. Sci. (Eng.)

V.A. Stepanov, Postgraduate of the Chair "Metallurgy and Metallography" (viktor1990_31@mail.ru)

Received October 30, 2014